

OSUD – UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

Școala doctorală de Inginerie Mecanică și Industrială



# TEZĂ DE DOCTORAT

## REZUMAT

**CERCETĂRI PRIVIND SUDAREA MECANIZATĂ MAG-M ÎN CONDIȚII  
DE MONTAJ A ÎNVELIȘULUI NAVEI DE CERCETARE MARINĂ**

**Doctorand**

**Ing. Ștefan Nabi FLORESCU**

**Președinte**

**Prof. univ. dr. ing. Cătălin FETECĂU**  
Președintele Senatului

**Conducător științific**

Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați  
**Prof. univ. dr. ing. Dănuț MIHĂILESCU**  
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

**Referenți științifici**

**Prof. univ. dr. ing. Ionelia VOICULESCU**  
Universitatea "Politehnica" din București  
**Prof. univ. dr. ing. Remus ZĂGAN**  
Universitatea Maritimă din Constanța  
**Prof. univ. dr. ing. Elena SCUTELNICU**  
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați

**Seria I 4: Inginerie industrială Nr. 73**

**GALAȚI**

**2020**

Seriile tezelor de doctorat susținute public în UDJG începând cu 1 octombrie 2013 sunt:

Domeniul fundamental ȘTIINTE INGINERESTI

- Seria I 1: **Biotehnologii**
- Seria I 2: **Calculatoare și tehnologia informației**
- Seria I 3: **Inginerie electrică**
- Seria I 4: **Inginerie industrială**
- Seria I 5: **Ingineria materialelor**
- Seria I 6: **Inginerie mecanică**
- Seria I 7: **Ingineria produselor alimentare**
- Seria I 8: **Ingineria sistemelor**
- Seria I 9: **Inginerie și management în agricultură și dezvoltare rurală**

Domeniul fundamental ȘTIINTE SOCIALE

- Seria E 1: **Economie**
- Seria E 2: **Management**
- Seria SSEF: **Știința sportului și educației fizice**

Domeniul fundamental ȘTIINTE UMANISTE ȘI ARTE

- Seria U 1: **Filologie- Engleză**
- Seria U 2: **Filologie- Română**
- Seria U 3: **Istorie**
- Seria U 4: **Filologie - Franceză**

Domeniul fundamental MATEMATICĂ ȘI ȘTIINTE ALE NATURII

- Seria C: **Chimie**

Domeniul fundamental ȘTIINTE BIOLOGICE ȘI BIOMEDICALE

- Seria M: **Medicină**

## MULȚUMIRI

Respectul și mulțumirile mele se îndreaptă către toți cei care, prin încurajări, sugestii și critici, bine venite, au contribuit direct sau indirect la realizarea acestui demers științific, m-au susținut și m-au ajutat să finalizez această lucrare.

Acum, după încheierea vastelor programe de cercetare științifică și finalizarea tezei de doctorat, doresc să transmit mulțumiri conducătorului științific, *Prof. univ. dr. ing. Dănuț MIHĂILESCU*, pentru permanenta îndrumare, profesionalismul de înaltă ținută academică, observațiile critice prețioase și pentru ideile valoroase de care am beneficiat pe toată perioada de pregătire doctorală și elaborare a tezei de doctorat. Cu răbdare și înțelegere, am deslușit aspectele complexe privind comportarea oțelului naval EH 36 la sudarea mecanizată cap la cap MAG-M, analizele tensiunilor și a deformațiilor la sudare și analizele comportărilor la coroziune în mediu marin a oțelului naval EH 36 și a îmbinărilor sudate. În toți acești ani, am fost încurajat în susținerea cu argumente a ideilor inovative, în depășirea obstacolelor întâmpinate în derularea programelor experimentale și în finalizarea acestei lucrări. Sub îndrumarea conducătorului științific am elaborat articole științifice, care au fost prezentate la conferințe naționale și internaționale, publicate în volumele acestora sau în reviste cu impact în lumea științifică și care reflectă importanța și nivelul rezultatelor cercetărilor.

Mă simt foarte onorat și mulțumesc *Prof. univ. dr. ing. Cătălin FETECĂU*, Președintele Senatului Universității "Dunărea de Jos" din Galați, pentru onoarea de a accepta să facă parte în calitate de președinte, din comisia de evaluare și susținere publică a tezei mele de doctorat.

În mod deosebit, aș dori să adresez mulțumiri referenților oficiali, *Prof. univ. dr. ing. Ionelia VOICULESCU* - Universitatea "Politehnica" din București, *Prof. univ. dr. ing. Remus ZĂGAN* - Universitatea Maritimă din Constanța și *Prof. univ. dr. ing. Elena SCUTELNICU* - Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, pentru onoarea de a accepta să facă parte din comisia de evaluare și susținere publică a tezei de doctorat, pentru analiza și evaluarea rezultatelor cercetărilor mele și pentru informațiile și sfaturile foarte utile pe care le-am primit, în special în ultima perioadă de finalizare a lucrării. Mulțumesc deasemenea, *Prof. univ. dr. ing. Ionelia VOICULESCU*, pentru sprijinul acordat în caracterizarea metalurgică a cordoanelor depuse și a îmbinărilor sudate realizate.

Pe toată perioada mea de pregătire doctorală, am beneficiat de sprijinul permanent și necondiționat al comisiei de îndrumare, formată din *Prof. univ. dr. ing. Dănuț MIHĂILESCU* - conducător științific, *Prof. univ. dr. ing. Elena SCUTELNICU*, *Conf. univ. dr. ing. Octavian MIRCEA* și *Șef. lucr. dr. ing. Dan Cătălin BÂRSAN* - membri, din cadrul Centrului de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (SUDAV), Departamentul Ingineria Fabricației, Facultatea de Inginerie, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați. Observațiile dumnealor, îndeosebi a *Prof. univ. dr. ing. Elena SCUTELNICU*, m-au ajutat să organizez într-o succesiune logică și clară programele experimentale și să evidențiez aspectele inovative și aplicative ale cercetărilor teoretice și experimentale. De asemenea, aș dori să îi mulțumesc încă odată *Prof. univ. dr. ing. Elena SCUTELNICU*, pentru includerea mea în lista persoanelor implicate în proiectul PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0875 - HEAPROTECT, *Sisteme de protecție individuală și colectivă pentru domeniul militar pe bază de aliaje cu entropie ridicată (Individual and collective protection systems for the military field based on high entropy alloys)*, care mi-a oferit posibilitatea de a-mi dezvolta competențele de cercetare și de a acumula experiență în domeniul sudării.

Alese mulțumiri și recunoștință aduc *ing. Răzvan BĂTRÎNU* Președintele Asociației de Sudură din România (ASR) și Director General SC Ductil SA Buzău, pentru sârmele pline și tubulare necesare în cadrul vastelor cercetări experimentale și pentru sprijinul în verificarea nedistructivă și distructivă a îmbinărilor sudate.

Aș vrea să îi mulțumesc și *Dr. ing. EWE / IWE Adrian Mihai CÂMPUREAN*, consilier Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină (GeoEcoMar) București, pentru echipamentele de sudare și asistența tehnică, fără de care cercetările experimentale nu s-ar fi putut realiza.

Mulțumiri se cuvin aduse colaboratorilor din cadrul Universității "Dunărea de Jos" din Galați: *Prof. univ. dr. ing. Costel Iulian MOCANU, Prof. univ. dr. ing. Virgil TEODOR, Conf. univ. dr. ing. Ionel Gavrilescu, Șef. lucr. dr. ing. EWE / IWE Carmen Cătălina RUSU, Șef. lucr. dr. ing. EWE / IWE Luigi Renato MISTODIE, Șef. lucr. dr. ing. Bogdan Georgescu, Șef. lucr. dr. fiz. Alina-Mihaela CEOROMILA, As. dr. ing. EWE / IWE Marius Corneliu GHEONEA, Dr. ing. Laurențiu MARDARE* etc.

Alese mulțumiri și recunoștință aduc *Dr. ing. Adrian STĂNICĂ*, Președinte al Consiliului de Administrație și Director General al Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină (GeoEcoMar) București, pentru înțelegerea și sprijinul acordat în toată această perioadă.

Mulțumesc de asemenea, tuturor celor care și-au făcut timp să arunce o privire asupra conținutului tezei de doctorat și să facă aprecieri și/sau observații în scopul îmbunătățirii ei.

Sunt profund recunoscător și adresez cele mai calde mulțumiri familiei mele pentru sprijinul moral, permanent și pentru înțelegerea pe care mi-au acordat-o, în toată perioada de desfășurare a studiilor doctorale și finalizare a tezei de doctorat.

Galați, Septembrie 2020

Ing. Ștefan Nabi FLORESCU

## CUPRINS

	Nr. pag. Teză	Nr. pag. Rez.
Mulțumiri.....	I	1
Cuprins.....	III	3
Content.....	VII	-
Introducere.....	XI	7
Introduction.....	XV	-
Notații și abrevieri.....	XIX	-
Listă figuri. Listă tabele.....	XXII	-

### **STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR**

<b>CAPITOLUL 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL TEZEI DE DOCTORAT.....</b>		
	<b>1</b>	<b>11</b>
<b>1.1. Noțiuni introductive.....</b>	<b>1</b>	<b>11</b>
1.1.1. Clasificarea navelor.....	1	11
1.1.2. Corpul și învelișul navei.....	2	11
1.1.3. Descrierea navei de cercetare marină multifuncțională.....	3	11
1.1.4. Criterii tehnico-economice de selecție a procedurii de sudare.....	4	12
<b>1.2. Stadiu actual al cercetărilor privind sudarea mecanizată cap la cap MAG pe suport ceramic a oțelurilor navale.....</b>	<b>5</b>	<b>13</b>
1.2.1. Principiul procedurii, avantaje, dezavantaje și domenii de utilizare.....	5	-
1.2.2. Sârme pentru sudare.....	6	-
1.2.3. Gaze și amestecuri de gaze de protecție active.....	7	-
1.2.4. Susținerea băii de metal topit pe suporturi ceramice.....	8	13
1.2.5. Stadiul actual al cercetărilor privind sudarea cap la cap MAG pe suport ceramic a oțelurilor navale.....	9	-
<b>1.3. Stadiu actual al cercetărilor privind tensiunile și deformațiile la sudare.....</b>	<b>12</b>	<b>14</b>
1.3.1. Noțiuni teoretice privind tensiunile și deformațiile la sudare.....	12	14
1.3.2. Tensometria electro-rezistivă.....	17	-
1.3.3. Stadiul actual al cercetărilor privind analizele tensiunilor și deformațiilor la sudare.....	20	-
<b>1.4. Stadiu actual al cercetărilor privind coroziunea marină.....</b>	<b>21</b>	<b>16</b>
1.4.1. Noțiuni teoretice privind coroziunea.....	21	16
1.4.2. Metode electrochimice de evaluare a rezistenței la coroziune.....	24	16
1.4.3. Zonele de coroziune a structurilor marine.....	25	17
1.4.4. Aspecte ale coroziunii metalelor.....	26	18
1.4.5. Stadiul actual al cercetărilor privind comportarea la coroziune.....	27	18
<b>1.5. Concluzii parțiale.....</b>	<b>30</b>	<b>-</b>
<b>1.6. Scopul, motivația și obiectivele cercetărilor experimentale.....</b>	<b>31</b>	<b>-</b>
<b>1.7. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare.....</b>	<b>32</b>	<b>19</b>

### **CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE**

<b>CAPITOLUL 2. MATERIALE STANDURI ȘI ECHIPAMENTE UTILIZATE ÎN CADRUL PROGRAMELOR EXPERIMENTALE.....</b>		
	<b>35</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Materiale.....</b>	<b>35</b>	<b>21</b>
2.1.1. Materialul de bază.....	35	21

2.1.2. Materiale de adaos.....	38	21
2.1.3. Materiale auxiliare.....	38	21
<b>2.2. Standuri.....</b>	<b>39</b>	<b>22</b>
2.2.1. Stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția PA.....	39	22
2.2.2. Stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în pozițiile PF și PE.....	39	22
2.2.3. Stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția PC.....	40	23
2.2.4. Stand pentru analiza câmpurilor termice și a tensiunilor la sudare.....	40	23
<b>2.3. Echipamente.....</b>	<b>40</b>	<b>23</b>
2.3.1. Echipamente și accesorii pentru sudare.....	40	23
2.3.2. Echipamente suplimentare.....	44	24
<b>2.4. Concluzii parțiale.....</b>	<b>44</b>	<b>-</b>

### **CAPITOLUL 3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRELIMINARE PRIVIND ANALIZELE CORDOANELOR DEPUSE.....**

<b>3.1. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare.....</b>	<b>45</b>	<b>25</b>
<b>3.2. Determinarea caracteristicilor de topire și de depunere ale sârmelor.....</b>	<b>45</b>	<b>25</b>
3.2.1. Materiale și echipamente pentru sudare.....	45	25
3.2.2. Program experimental.....	45	25
3.2.3. Prelucrarea grafică și interpretarea rezultatelor experimentale.....	49	26
<b>3.3. Analizele macroscopice și microscopice.....</b>	<b>50</b>	<b>26</b>
<b>3.4. Analizele microdureității Vickers HV1 sub cordoanele depuse.....</b>	<b>52</b>	<b>27</b>
<b>3.5. Concluzii parțiale.....</b>	<b>54</b>	<b>-</b>

### **CAPITOLUL 4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA LA SUDARE A OȚELULUI NAVAL EH 36.....**

<b>4.1. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare.....</b>	<b>55</b>	<b>28</b>
<b>4.2. Optimizarea rostului la sudare.....</b>	<b>55</b>	<b>-</b>
<b>4.3. Stabilirea și simbolizarea numărului de probe sudate.....</b>	<b>58</b>	<b>-</b>
<b>4.4. Stabilirea metodelor de control nedistructiv.....</b>	<b>58</b>	<b>28</b>
4.4.1. Controlul vizual.....	58	29
4.4.2. Controlul radiografic.....	58	29
<b>4.5. Stabilirea metodelor de control distructiv.....</b>	<b>59</b>	<b>29</b>
4.5.1. Încercarea la tracțiune transversală.....	59	-
4.5.2. Încercarea la îndoire transversală frontală.....	59	-
4.5.3. Încercarea la încovoiere prin șoc KV.....	60	-
4.5.4. Examinarea macroscopică și microscopică.....	60	-
4.5.5. Încercarea de microdureitate Vickers HV1.....	61	-
<b>4.6. Stabilirea dimensiunilor probelor sudate cap la cap și a modului de prelevare a epruvetelor.....</b>	<b>62</b>	<b>29</b>
<b>4.7. Cercetări experimentale privind stabilirea parametrilor regimurilor de sudare.....</b>	<b>63</b>	<b>30</b>
4.7.1. Materiale și echipamente pentru sudare.....	63	30
4.7.2. Pregătirea componentelor în vederea sudării.....	63	30
4.7.3. Selectarea modurilor de transfer al picăturilor prin coloana arcului electric.....	63	-
4.7.4. Program experimental.....	64	-
<b>4.8. Sudarea mecanizată MAG-M cu sârme tubulare pe suport ceramic plat.....</b>	<b>68</b>	<b>30</b>
<b>4.9. Controlul nedistructiv al probelor sudate.....</b>	<b>69</b>	<b>32</b>
4.9.1. Controlul vizual.....	69	32
4.9.2. Controlul cu radiații penetrante.....	69	32
<b>4.10. Controlul distructiv al probelor sudate.....</b>	<b>70</b>	<b>32</b>

4.10.1. Încercarea la tracțiune transversală.....	70	32
4.10.2. Încercarea la îndoire transversală frontală.....	72	32
4.10.3. Încercarea la încovoiere prin șoc KV.....	73	33
4.10.4. Examinarea macroscopică și microscopică.....	75	33
4.10.5. Încercarea de microduritate Vickers HV1.....	78	34
<b>4.11. Concluzii parțiale.....</b>	<b>80</b>	<b>-</b>
 <b>CAPITOLUL 5. CERCETĂRI PRIVIND ANALIZELE MEF ȘI EXPERIMENTALE ALE TENSIUNILOR ȘI DEFORMAȚIILOR LA SUDAREA CAP LA CAP MAG-M.....</b>		
<b>5.1. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare.....</b>	<b>81</b>	<b>36</b>
<b>5.2. Discretizarea îmbinării sudate.....</b>	<b>81</b>	<b>36</b>
<b>5.3. Alegerea zonelor de analize MEF ale tensiunilor și deformațiilor....</b>	<b>85</b>	<b>36</b>
5.3.1. Alegerea zonelor de analize pe direcția longitudinală a îmbinării sudate.....	85	36
5.3.2. Alegerea zonelor de analize pe direcția transversală a îmbinării sudate.....	86	36
<b>5.4. Câmpurile de tensiuni obținute în urma analizei MEF pentru cele două straturi.....</b>	<b>87</b>	<b>-</b>
<b>5.5. Câmpurile de deformații obținute în urma analizei MEF pentru cele două straturi.....</b>	<b>89</b>	<b>-</b>
<b>5.6. Programul experimental privind sudarea probei.....</b>	<b>89</b>	<b>30</b>
5.6.1. Materiale și echipamente pentru sudare.....	89	38
5.6.2. Proiectarea, realizarea și experimentarea standului pentru analizele câmpurilor termice și a tensiunilor.....	90	39
5.6.3. Realizarea și etalonarea traductoarelor pentru măsurarea tensiunilor.....	91	39
5.6.4. Realizarea probei sudate cap la cap.....	94	40
5.6.5. Achiziția și prelucrarea datelor privind evoluțiile tensiunilor.....	96	-
<b>5.7. Analiza comparativă ale stărilor de tensiuni și deformații în procesul de sudare mecanizată MAG-M.....</b>	<b>97</b>	<b>41</b>
5.7.1. Analizele MEF și experimental ale stărilor de tensiuni normale pe cele trei zone de analiză.....	97	41
5.7.2. Analizele stărilor de deformații plastice efective și de deformații elastice echivalente pe cele trei zone de analiză.....	113	46
<b>5.8. Analiza contactului dintre probă și standul de sudare.....</b>	<b>124</b>	<b>-</b>
<b>5.9. Concluzii parțiale.....</b>	<b>126</b>	<b>-</b>
 <b>CAPITOLUL 6. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ANALIZELE COMPORTĂRILOR LA COROZIUNE MARINĂ.....</b>		
<b>6.1. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare.....</b>	<b>127</b>	<b>49</b>
<b>6.2. Prelevarea apei de mare.....</b>	<b>127</b>	<b>49</b>
<b>6.3. Analizele comportărilor la coroziune prin metoda electrochimică....</b>	<b>128</b>	<b>49</b>
6.3.1. Program experimental.....	128	51
6.3.2. Prelucrarea grafică și interpretarea rezultatelor.....	131	-
<b>6.4. Analizele adâncimilor asperităților suprafețelor epruvetelor.....</b>	<b>136</b>	<b>51</b>
6.4.1. Program experimental.....	136	51
6.4.2. Prelucrarea grafică și interpretarea rezultatelor.....	136	52
<b>6.5. Analizele microstructurale SEM și compoziționale EDX.....</b>	<b>138</b>	<b>53</b>
6.5.1. Program experimental.....	138	53
6.5.2. Prelucrarea grafică și interpretarea rezultatelor.....	139	53
<b>6.6. Concluzii parțiale.....</b>	<b>146</b>	<b>-</b>
 <b>CAPITOLUL 7. CONCLUZII CONTRIBUȚII REALIZĂRI ȘI PERSPECTIVE.....</b>	 <b>147</b>	 <b>56</b>

<b>7.1. Concluzii generale.....</b>	<b>147</b>	<b>56</b>
<b>7.2. Contribuții personale.....</b>	<b>150</b>	<b>59</b>
7.2.1. Contribuții teoretice.....	151	60
7.2.2. Contribuții experimentale.....	151	60
<b>7.3. Realizări în domeniul tezei de doctorat.....</b>	<b>152</b>	<b>60</b>
<b>7.4. Direcții viitoare de cercetare.....</b>	<b>153</b>	<b>61</b>
<b>LISTĂ LUCRĂRI PUBLICATE ȘI PREZENTATE.....</b>	<b>154</b>	<b>62</b>
<b>BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ.....</b>	<b>158</b>	<b>66</b>
<b>ANEXA 1. CERTIFICATE DE CALITATE MATERIALE DE BAZĂ ȘI DE ADAOS.....</b>	<b>170</b>	<b>-</b>
<b>ANEXA 2. RAPOARTE DE EXAMINARE PRIN MICROSCOPIE OPTICĂ ȘI DE MĂSURARE DURITATE.....</b>	<b>174</b>	<b>-</b>
<b>ANEXA 3. BULETINE DE EXAMINARE CU RADIAȚII PENETRANTE ȘI DE ÎNCERCĂRI MECANICE.....</b>	<b>195</b>	<b>-</b>
<b>ANEXA 4. PARAMETRII IMPORTANȚI AI APEI DE MARE PE TOATĂ COLOANA DE APĂ ANALIZATĂ.....</b>	<b>203</b>	<b>-</b>

**Conducător științific,**

Prof. univ. dr. ing. Dănuț MIHĂILESCU

**Comisia de îndrumare:**

Prof. univ. dr. ing. Elena SCUTELNICU

Conf. univ. dr. ing. Octavian MIRCEA

Șef. lucr. univ. dr. ing. Dan Cătălin BÎRSAN

**Cuvinte cheie:** sudare mecanizată MAG-M, suport ceramic, amestec de gaze de protecție activ, sârmă tubulară, material de bază, material de adaos, metode de testare nedistructive, metode de testare distructive, examinare macroscopică, examinare microscopică, microduritate Vickers HV1, tensiuni, deformații, coroziune

**Observație:** În rezumatul tezei de doctorat se păstrează numerotarea ecuațiilor, figurilor, tabelor și referințelor bibliografice din teza de doctorat.



## INTRODUCERE

Teza de doctorat **Cercetări privind sudarea mecanizată MAG-M în condiții de montaj a învelișului navei de cercetare marină**, aparține domeniului **Ingineria și managementul producției**, domeniul de studii universitate de doctorat **Inginerie Industrială**.

**Scopul principal al cercetărilor experimentale din teza de doctorat**, este acela de a crește gradul de cunoaștere în domeniul sudării mecanizate MAG-M a îmbinărilor sudate cap la cap cu sârme tubulare pe suport ceramic plat, și de a oferi informații prețioase și utile celor din domeniul naval, și nu numai.

**Pregătirea inginerescă în specializarea Utilajul și Tehnologia Sudării** (Institutul Politehnic "Traian Vuia" din Timișoara), **activitățile în producție** în cadrul Șantierului Naval Orșova (1989 - 2001) și SC Omnisud Vest SRL Drobeta Turnu Severin (2001 - 2003), precum **și activitatea de cercetare** în cadrul Institutului Național de Cercetare Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină (GeoEcoMar) București (2003 - prezent), **au contribuit la dezvoltarea mea inginerescă și de cercetare științifică în domeniul marin**.

Funcția de Director Departament Nave de Cercetare în cadrul Institutului Național de Cercetare Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină (GeoEcoMar) din București, mi-a permis să cunosc foarte bine **nava de cercetare maritimă multifuncțională "Mare Nigrum"**. Viata activă a unei nave de cercetare, este limitată în timp de cerințele și reglementările internaționale deosebit de stricte, care nu recomandă utilizarea lor mai mult de 45...50 de ani. În acest an, această navă **construită în anul 1971** la Șantierul Naval Stralsund din fosta Republică Democrată Germană, împlinește 49 de ani de funcționare. În consecință, **se impune înlocuirea acestei nave de cercetare cu o navă nouă**, care să corespundă normelor tehnice europene actuale de dotare tehnico-stiințifică și de securitate maximă de navigație, fără limitare de zonă. România va trebui să se implice mai mult în realizarea acestei nave de cercetări marine, **care ar însemna un fanion al dezvoltării științifice din țara noastră**:

➤ **avantajele navei**: date de achiziție la standarde înalte utilizând echipamente științifice de generație nouă; poluarea mediului marin "zero"; mărirea securității personalului care operează pe navă precum și a echipamentelor; fiabilitatea sistemului operațional și accesul mai ușor în ceea ce privește interoperabilitatea cu alte infrastructuri de cercetare europene și internaționale;

➤ **caracteristicile tehnice**: lungimea: 67,4 m; lungimea între perpendiculare: 59,4 m; lățimea: 16 m; pescajul: 4,8 m; înălțimea la puntea principală: 6,8 m și viteza maximă: 12,5 knots.

Noua navă pe care noi dorim să o construim, ar putea avea o încărcare mare atât pentru programele din Marea Neagră cât și pentru alte programe internaționale desfășurate pe tot globul.

În anul 2015, am avut plăcerea și onoarea să cunosc pe **Prof. univ. dr. ing. Dănuț Mihăilescu**, cu o bogată experiență practică și de cercetare științifică în domeniul naval, și, totodată conducător de doctorat în domeniul de studii universitate de doctorat Inginerie Industrială (Ingineria Sudării). Împreună, am convenit să abordăm în cadrul specializării mele la doctorat, tema menționată anterior.

**Motivația alegerii temei** abordate în cadrul prezentei teze de doctorat, este **creșterea gradului de cunoaștere în domeniul comportării mecano-metalurgice a oțelurilor navale de înaltă rezistență (High Strength Low Alloy - HSLA) la sudarea mecanizată MAG-M cu sârme tubulare pe suport ceramic plat, fără a genera modificări mecano-metalurgice în materialul de bază, asigurându-se îmbinări sudate de bună calitate, prin reducerea substanțială a tensiunilor și a deformațiilor și cu o bună rezistență la coroziune marină**.

**Gradul de noutate al tezei de doctorat**, constă în asigurarea de avantaje economice certe beneficiarilor, prin folosirea procedurii de sudare mecanizată MAG-M ce asigură o productivitate ridicată în comparație cu procedeul semimecanizat, utilizarea la sudarea cap la cap a rosturilor înguste și a suporturilor ceramice plate, care conduc la o reducere substanțială de manoperă, materiale de adaos, materiale auxiliare și energie electrică. Deasemenea, utilizarea reductorului de presiune cu economizor pentru amestecul de gaze de protecție activ, contribuie la reducerea substanțială a consumului de gaz de protecție. Modul de transfer al picăturilor de metal topit prin coloana arcului electric de sudare ForceArc, asigură o mare productivitate a straturilor de umplere și a straturilor finale ale îmbinărilor sudate cap la cap (productivitate mare la sudare, deformații reduse, îmbinări sudate concave cu geometrii ideale fără arsuri marginale și minimizarea schimbărilor structurale ale materialului de bază). Proiectarea, execuția și utilizarea standului pentru sudarea mecanizată MAG-M cu sârme tubulare pe suport ceramic plat, a permis achizițiile simultane de date privind evoluțiile câmpurilor termice și a tensiunilor la sudare. Cercetările experimentale privind analizele comportării la coroziune au permis analizele comportării oțelului naval EH 36 și a îmbinărilor sudate în apă de mare naturală (extrasă din Marea Neagră de la adâncimea de 5 m). Efectuarea în paralel a analizelor microstructurale SEM și a analizelor compoziționale EDX s-a realizat folosind microscopul electronic de baleiaj (SEM / ESEM / EDAX) Quanta 200.

Pentru atingerea scopului principal, cercetările experimentale din cadrul tezei de doctorat s-au axat pe atingerea a **cinci obiective specifice**:

- O1. Materiale, standuri și echipamente utilizate în cadrul programelor experimentale;
- O2. Cercetări experimentale preliminare privind analizele cordoanelor depuse;
- O3. Cercetări experimentale privind comportarea la sudarea mecanizată MAG-M a oțelului naval EH 36;
- O4. Cercetări privind analizele FEM și experimentale ale tensiunilor și deformațiilor la sudarea cap la cap MAG-M;
- O5. Cercetări experimentale privind analizele comportărilor la coroziune marină.

**Activitățile de cercetare** efectuate pe parcursul studiului doctorat, **au fost derulate utilizând infrastructurile moderne din cadrul a două universități, un institut de cercetări și o societate comercială**, după cum urmează:

- **Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați:**
  - Laboratorul de Dezvoltare Procese și Tehnologii de Sudare prin Topire (LDPTST) și Laboratorul de Control Nedistructiv (LCN), Centrul de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (SUDAV), Departamentul Ingineria Fabricației, Facultatea de Inginerie;
  - Laboratorul de Modelarea Generării Suprafețelor, Centrul de Cercetare Inginerie Tehnologică în Construcția de Mașini (ITCM), Facultatea de Inginerie;
  - Laboratorul de Modelare și Grafică, Centrul de Cercetare Științifică Mecanica și Tribologia Sraturilor Superficiale (MTSS), Departamentul de Inginerie Mecanică, Facultatea de Inginerie;
  - Laboratorul de Electrochimie și Coroziune, Centrul de Cercetare (Competențe) Interfețe-Tribocoroziune-Sisteme Electrochimice (CC-ITSE), Departamentul de Ingineria Mediului și Securității în Industrie, Facultatea de Inginerie;
  - Laboratorul de Analiză Structurală și Control Nedistructiv, Centrul de Cercetare Analize Fizico-chimice, Morfo-funcționale și Chemometrie, Departamentul de Chimie, Fizică și Mediu, Facultatea de Științe și Mediu;
- **Universitatea "Politehnica" din București:**
  - Laboratorul pentru Încercări Metalografice (LAMET), Departamentul Ingineria Calității și Tehnologii Industriale, Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică;
- **Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină (GeoEcoMar) din București:**
  - Nava de cercetare maritimă multifuncțională "Mare Nigrum";
- **SC Ductil SA Buzău:**
  - Departamentul Calitate, Serviciul Laboratoare.

Teza de doctorat este structurată în două părți (**Stadiul actual al cercetărilor 22,2% și**

**Cercetări teoretice și experimentale reprezentând 77,8%**), urmate de lista de lucrări publicate și prezentate, bibliografie (**235 referințe bibliografice**), **4 anexe și curriculum vitae** a doctorandului. Lucrarea totalizează **7 capitole**, desfășurate pe **237 pagini** și cuprinde **214 figuri, 38 tabele și 52 relații matematice**.

Pornind de la o vastă bibliografie realizată pe plan național și internațional, capitolul 1 tratează pe larg, **Stadiu actual al cercetărilor în domeniul tezei de doctorat**. În prima parte, sunt prezentate, clasificarea navelor, corpul și învelișul navei, descrierea navei de cercetare maritimă multifuncțională și criteriile tehnico-economice de selecție a procedurii de sudare. În continuare, sunt tratate stadiile actuale ale cercetărilor privind sudarea mecanizată cap la cap MAG, analiza tensiunilor și a deformațiilor și a comportărilor la coroziune în apă de mare a oțelurilor navale și a îmbinărilor sudate. Finalul capitolului 1, este rezervat concluziilor parțiale, motivației, obiectivelor și descrierii programului experimental și a metodologiei de cercetare din cadrul tezei de doctorat.

În capitolul 2, **Materiale, standuri și echipamente utilizate în cadrul programelor experimentale**, sunt descrise pentru început, programul experimental și metodologia de cercetare. În cadrul cercetărilor experimentale din cadrul tezei de doctorat, s-au folosit table din oțel naval de înaltă rezistență marca EH 36 cu grosimea de 10 mm, o sârmă plină, două sârme tubulare (cu pulberi metalice și cu flux rutilic), amestecul de gaze de protecție activ M21 (Corgon 18) și suporturi ceramice plate cu canal concav. Suplimentar, s-au folosit patru standuri echipate cu sursa de sudare universală Phoenix 405 Progress puls MM TDM și tractorul de sudare K-BUG 5102 și 13 echipamente performante (verificate metrologic). Acest capitol, se finalizează cu concluziile parțiale desprinse din alegerea materialelor, dispozitivelor și a echipamentelor utilizate în cadrul programelor experimentale.

Capitolul 3, **Cercetări experimentale preliminare privind analiza cordoanelor depuse**, debutează cu descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare. În continuare, sunt determinate caracteristicile de topire și de depunere ale sârmelor și sunt prezentate analizele macroscopice, microscopice și de microduritate Vickers HV1 ale cordoanelor depuse. Finalul capitolului 3 este rezervat concluziilor parțiale.

În capitolul 4, **Cercetări experimentale privind comportarea la sudare a oțelului naval EH 36**, este prezentată pentru început, descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare. În continuare sunt prezentate, stabilirea și simbolizarea numărului de probe sudate, stabilirea metodelor de control nedistructiv și distructiv, stabilirea dimensiunilor probelor sudate cap la cap și a modului de prelevare a epruvetelor, cercetările experimentale privind stabilirea parametrilor regimurilor de sudare, sudarea mecanizată MAG-M cu sârme tubulare pe suport ceramic plat în poziție comodă și în poziții dificile, controlul nedistructiv și distructiv. În finalul capitolului sunt prezentate concluziile parțiale privind comportarea oțelului naval EH 36 la sudarea mecanizată MAG-M.

Capitolul 5, **Cercetări privind analizele MEF și experimentale ale tensiunilor și deformațiilor la sudarea cap la cap MAG-M**, prezintă descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare, discretizarea îmbinării sudate, alegerea zonelor de analize MEF ale tensiunilor și deformațiilor, câmpurile de tensiuni obținute în urma analizei MEF pentru cele două straturi, câmpurile de deformații obținute în urma analizei MEF pentru cele două straturi, programul experimental privind sudarea probei, analiza comparativă ale stărilor de tensiuni și deformații în procesul de sudare mecanizată MAG-M, analiza contactului dintre probă și standul de sudare și concluziile parțiale.

În capitolul 6, **Cercetări experimentale privind analizele comportărilor la coroziune marină**, este prezentată descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare, prelevarea apei de mare, analizele comportărilor la coroziune prin metoda electrochimică, analizele rugozităților suprafețelor epruvetelor, analizele microstructurale SEM, analizele compoziționale EDX și

concluziile parțiale.

În încheiere, în capitolul 7, **Concluzii, contribuții, realizări și perspective**, sunt prezentate concluziile generale, contribuțiile originale (teoretice și experimentale), realizările în domeniul tezei de doctorat și perspectivele de cercetare viitoare în domeniu.

Studiul doctoral s-a realizat sub coordonarea științifică a comisiei de îndrumare cu următoarea componență: *Prof. univ. dr. ing. Dănuț MIHĂILESCU - conducător științific, Prof. univ. dr. ing. Elena SCUTELNICU, Conf. univ. dr. ing. Octavian MIRCEA și Șef. lucr. dr. ing. Dan Cătălin BÂRSAN - membri.*

În perioada de pregătire doctorală, **am fost implicat în cadrul unui proiect de cercetare-dezvoltare-inovare** câștigat prin competiție, PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0875-HEAPROTECT, *Sisteme de protecție individuală și colectivă pentru domeniul militar pe bază de aliaje cu entropie ridicată (Individual and collective protection systems for the military field based on high entropy alloys)*, poziția 51 în lista persoanelor implicate în proiect.

Diseminarea rezultatelor cercetărilor experimentale efectuate pe parcursul studiilor doctorale, s-a materializat prin **publicarea a 4 articole în reviste internaționale de prestigiu în domeniul abordat (ISI Proceeding), publicarea a 4 articole în reviste BDI, publicarea sau comunicarea a 11 articole la manifestări științifice naționale și internaționale**, după cum urmează:

- *publicate în reviste cotate/indexate ISI Proceeding: 4 (1 prim autor);*
- *publicate în reviste BDI: 4 (3 prim autor);*
- *publicate în volumul unor manifestări științifice naționale: 1 prim autor;*
- *prezentate oral sau poster la conferințe internaționale: 8 (4 prim autor);*
- *prezentate oral sau poster la conferințe naționale: 4 prim autor, un premiu II (2017) și un premiu III (2018) la Scientific Conferences of Doctoral Schools, Perspectives and challenges in doctoral research!, organizate de CSSD-UDJG;*
- **2 citări;**
- **elaborarea și susținerea în fața comisiei de îndrumare a 3 rapoarte științifice.**

**Principalele contribuții originale** în cadrul programelor experimentale cuprinse în teza de doctorat se referă la **utilizarea:** *echipamentelor performante la nivel mondial; reductorului de presiune cu economizor; amestecului de gaze de protecție activ; rostului îngust ( $\alpha = 40^\circ$ ); suporturilor ceramice plate cu canal concav; modurilor de transfer RootArc și ForceArc; pendulării triunghiulare cu staționare pe marginile componentelor de sudat; echipamentelor suplimentare verificate metrologic; standului pentru achizițiile simultane ale datelor privind evoluțiile câmpurilor termice și a tensiunilor la sudare; apei naturale din Marea Neagră și a microscopului electronic de baleiaj (SEM/ESEM-EDAX) Quanta 200.*

**Rezultatele cercetărilor experimentale din cadrul tezei de doctorat, au o aplicabilitate practică imediată, începând cu locul meu de muncă și continuând cu șantierele navale și societățile comerciale în cadrul cărora se realizează sau se repară nave fluviale și maritime.**

# CAPITOLUL 1

## STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR ÎN DOMENIUL TEZEI DE DOCTORAT

### 1.1. Noțiuni introductive

#### 1.1.3. Descrierea navei de cercetare maritimă multifuncțională

Institutul Național de Cercetare - Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină (GeoEcoMar) din București are în dotare: nava de cercetări marine multifuncțională "Mare Nigrum", o instalație de interes național (Fig. 1.3), nava de cercetări fluviale și costiere "Istros" și pontonul laborator "Halmyris".



**Fig. 1.3.** Nava de cercetări marine multifuncțională "Mare Nigrum" (imagine preluată din [1, 6, 7])

Viata activă a unei nave este limitată în timp, iar în cazul navelor de cercetare, cerințele și reglementările internaționale sunt deosebit de stricte și nu permit utilizarea lor mai mult de 45...50 de ani.

Nava de cercetare maritimă multifuncțională "Mare Nigrum", a fost construită în anul 1971, în Șantierul Naval Stralsund din Republica Democrată Germană și a făcut parte din flota de pescuit oceanic a Republicii Socialiste România.

În perioada 1998 - 2003, a trecut printr-un lung proces de re tehnologizare și transformare într-o navă de cercetări marine complexe.

În prezent, nava datorită calităților de navigație și dotărilor tehnico-stiințifice specifice, este considerată nava reprezentativă a Uniunii Europene în Marea Neagră.

Datorită vechimii (peste 49 ani), aria de activitate a navei a fost limitată doar la Marea Neagră. În consecință, se impune înlocuirea navei de cercetare "Mare Nigrum" cu o navă nouă care să corespundă normelor tehnice europene și internaționale actuale pentru navele de cercetare marină, de dotare tehnico-stiințifică și de securitate maximă de navigație fără limitare de zonă.

Noua navă care urmează a fi construită este foarte importantă pentru poziționarea României la standarde internaționale în ceea ce privește cercetarea științifică și s-a propus includerea acesteia în noua strategie națională de dezvoltare a cercetării științifice (2015 - 2020).

European Strategy Founding (ESF) recomandă, creșterea și extinderea unui nou sistem de barter între infrastructurile de cercetare europene, pentru a elimina timpii morți rezultați între expedițiile de cercetare. Sistemul este mai atractiv, deoarece acesta permite eficientizarea costurilor de cercetare.

Atunci când se analizează în special infrastructuri de cercetare din domeniul cercetării marine, unde se utilizează echipamente rare și foarte scumpe, există o nevoie de finanțare a acestor achiziții publice, la nivel multinațional.

O țară nu este capabilă din punct de vedere financiar să dețină de una singură și să opereze aceste echipamente costisitoare. În cadrul acestui sistem, Uniunea Europeană ar putea fi un

partener, care ar putea contribui financiar atât la achiziționarea cât și la exploatarea acestor echipamente.

Aceste cereri implică existența unor nave moderne de cercetare și noua navă pe care noi dorim să o construim ar putea avea o încărcare mare atât pentru programele din Marea Neagră cât și pentru alte programe internaționale desfășurate pe tot globul. Investigarea adâncă a mărilor și oceanelor, ne conduce la cunoașterea fenomenelor care generează: cutremure, vulcani, tsunami, precum și la descoperirea de mari depozite de petrol, gaze și minerale, ce fac posibil asigurarea resurselor de trai necesare ale omenirii, iar cercetările fundului mărilor și oceanelor ne mai conduc la indici cheie în ceea ce privește evoluția vieții pe pământ precum și posibilitatea existenței vieții pe alte planete.

Toate aceste aspecte importante și goana continuă spre cunoaștere, sunt elementele esențiale pentru care România va trebui să se implice mai mult, iar această navă ar însemna un fanion al dezvoltării științifice din țara noastră [8]:

➤ *avantajele navei*: date de achiziție la standarde înalte utilizând echipamente științifice de generație nouă; poluarea mediului marin "zero"; mărirea securității personalului care operează pe navă precum și a echipamentelor; fiabilitatea sistemului operațional și accesul mai ușor în ceea ce privește interoperabilitatea cu alte infrastructuri de cercetare europene și internaționale;

➤ *caracteristicile tehnice*: lungimea: 67,4 m; lungimea între perpendiculare: 59,4 m; lățimea: 16 m; pescajul: 4,8 m; înălțimea la puntea principală: 6,8 m și viteza maximă: 12,5 knots.

#### 1.1.4. Criterii tehnico-economice de selecție a procedurii de sudare prin topire

Principalele criterii tehnico-economice de selecție a procedurii de sudare prin topire, cap la cap a tablelor din domeniul naval, sunt următoarele [9...11]:

- să asigure îmbinări sudate de calitate în poziții dificile de sudare;
- să asigure o pătrundere completă a stratului de rădăcină prin sudare dintr-o singură parte (din exterior);
- să asigure o calitate bună a îmbinării sudate executate de sudori sau operatori-sudori având o pregătire și o experiență medie;
- să asigure o calitate bună a îmbinării sudate executate în condițiile climatice dificile de la locul de montaj (în aer liber);
- productivitatea procedurii de sudare să fie cât mai mare și în concordanță cu volumul de lucrări și cu termenele de execuție;
- costul lucrărilor și a echipamentelor de sudare, verificare și remediere să fie cât mai mic;
- costul echipamentelor de sudare să poată fi amortizat cât mai rapid. La sudarea cap la cap a tablelor din domeniul naval, pot fi utilizate numai șase procedee de sudare [9...11].

În tabelul 1.1 sunt centralizate domeniile de aplicabilitate a procedurilor de sudare prin topire în pozițiile comode și dificile.

Pentru sudarea prin topire cap la cap a tablelor din domeniul naval, în toate pozițiile de sudare, singurele procedee aplicabile sunt: 111; 135 și 136.

**Tabel 1.1. Domeniile de aplicabilitate a procedurilor de sudare prin topire în domeniul naval (adaptat din [1, 9...13])**

Procedee de sudare	Poziții de sudare conform ASME/EN ISO				
	1G/PA	2G/PC	2G/PF	2G/PG	4G/PE
111- sudarea manuală cu arc electric cu electrod învelit	x	x	x	x	x
135- sudarea cu arc electric cu electrod fuzibil în mediu de gaz protector (sudarea MAG)	x	x	x	x	x
136- sudarea MAG cu sârmă tubulară	x	x	x	x	x
121- sudarea cu arc electric sub strat de flux cu electrod sârmă	x	x	-	-	-
72- sudarea electrică în baie de zgură	-	-	x	-	-
73- sudarea electrogaz	-	-	x	-	-

Procedeul de sudare manuală cu electrozi înveliți (111) este cel mai dezavantajos, datorită unei productivități mici și a celor mai slabe calități a îmbinărilor sudate. Cele mai avantajoase procedee de sudare sunt cu arc electric cu electrod fuzibil în mediu de gaz protector, sudare MAG (135) și sudare MAG cu sârmă tubulară (136).

În funcție de volumul lucrărilor de sudare și de termenele impuse, se va lua decizia privind gradul de mecanizare necesar pentru asigurarea unei productivități optime la sudare, având în vedere faptul că procedeele de sudare (135) și (136) se pot utiliza atât semiautomat, mecanizat, automatizat cât și robotizat.

*Din acest motiv, se consideră faptul că selecția procedurii de sudare mecanizată MAG cu sârmă plină 135 sau cu sârmă tubulară 136 este soluția cea mai recomandată.*

## **1.2. Stadiul actual al cercetărilor privind sudarea mecanizată cap la cap MAG pe suport ceramic a oțelurilor navale**

### **1.2.4. Susținerea băii de metal topit pe suporturi ceramice**

La realizarea construcțiilor metalice sudate de mari dimensiuni, de foarte multe ori, se impune folosirea unor suporturi de susținere a băii de metal lichid, în timpul formării băii și până la răcirea acesteia, pentru evitarea curgerii metalului lichid din rostul dintre componentele de sudat.

Aceste suporturi sunt amplasate în partea opusă a arcului electric și trebuie să aibă o anumită formă, care să corespundă cerințelor dimensionale impuse cordonului și anumite caracteristici fizico-chimice.

Principalul avantaj al acestor tipuri de suporturi, este că, prezintă o temperatură de topire foarte ridicată, evitându-se astfel riscul topirii și amestecării cu baia de metal lichid.

Pentru a răspunde condițiilor de la sudare, suporturile ceramice trebuie să corespundă anumitor cerințe, ca de exemplu [37...43]:

1. *Stabilitate termică*, prin acesta înțelegând:

➤ capacitatea de a rezista la temperatura concretă a băii topite, fără pierderea caracteristicilor de rezistență mecanică, formă, dimensiuni sau alte reacții chimice care să altereze baia de metal;

➤ capacitatea de a rezista șocului termic la care este supus materialul ceramic respectiv, prin expunere la arcul electric sau baia de metal în mod brusc, precum și la răcirea ulterioară, relativ rapidă.

2. *Stabilitate chimică*, în sensul de a nu introduce în baia de metal topit gaze sau alți componenți de descompunere ai suportului ceramic, respectiv o stabilitate a suportului ceramic față de zgura rezultată la sudare, precum și la atmosfera din mediul învecinat sudării.

3. *Accesibilitatea tehnologică și economică*, respectiv posibilitatea fabricării acestor suporturi ceramice refractare, prin procedee industriale și la un preț de cost cât mai scăzut.

Forma și dimensiunile suporturilor ceramice, precum și canalul acestora se aleg în funcție de procedeul de sudare care se aplică la executarea stratului de rădăcină, tipul îmbinării (cap la cap sau de colț), grosimea componentelor ce urmează a fi sudate, forma și dimensiunile rostului, precizia asamblării, traiectoria liniară sau circumferențială și accesul unilateral sau bilateral.

Utilizarea suporturilor ceramice are următoarele *avantaje* [37...43]:

➤ asigurarea calității stratului de rădăcină eliminând operațiile auxiliare;

➤ posibilitatea sudării unilateral cu pătrundere;

➤ sudarea cu procedee de sudare și materiale de aport cu rată mare de depunere;

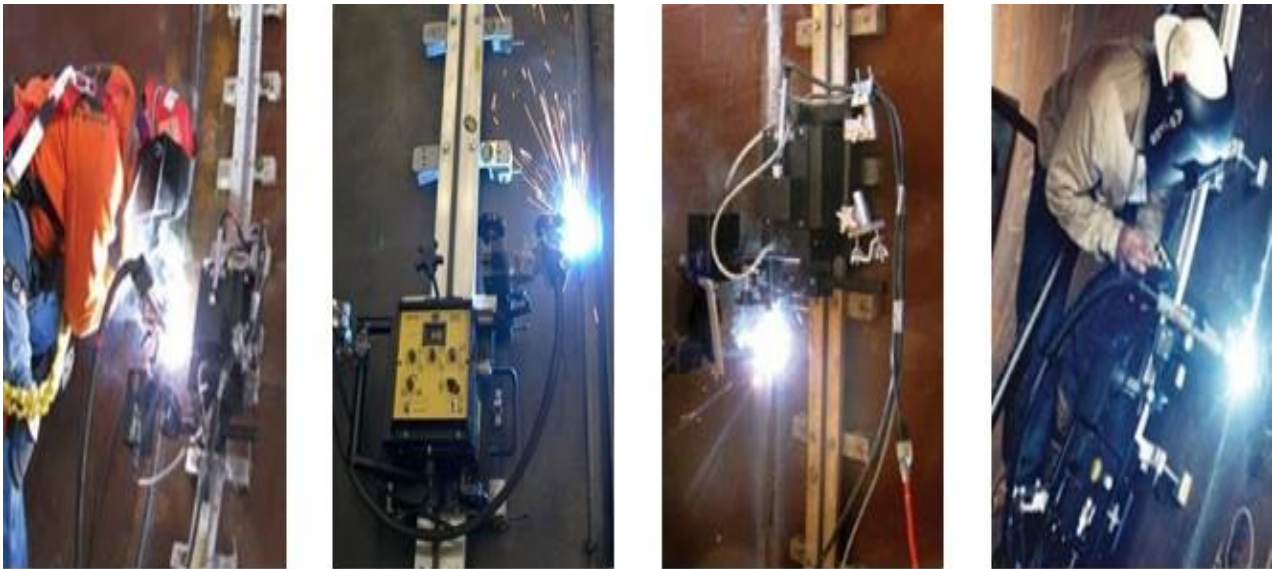
➤ utilizarea curenților mari de sudare;

➤ scăderea costurilor și a timpilor necesari pentru pregătirea componentelor;

➤ prezintă o temperatură de topire foarte ridicată, evitându-se astfel riscul topirii și amestecării cu baia de metal lichid.

Suporturile ceramice se utilizează cu precădere la sudarea construcțiilor metalice de mari dimensiuni, puternic solicitate în exploatare (nave, poduri, boilere etc).

În figura 1.3 sunt prezentate aspecte ale sudării mecanizate MAG a îmbinărilor sudate cap la cap, în domeniul naval.



**Fig. 1.3.** Aplicații ale suporturilor ceramice la sudarea mecanizată MAG a îmbinărilor sudate cap la cap în domeniul naval (imagini preluate din [44...47])

Șantierul naval *Swan Hunter (Tyneside) Ltd. din Wallsend (Marea Britanie)*, pentru realizarea a două nave militare pentru Flota Regală Auxiliară, s-a confruntat cu menținerea unor standarde de înaltă calitate, reducând în același timp costurile de producție și respectând orarele de livrare strânse. Pentru a face față acestor provocări, Swan Hunter a trebuit să revizuiască procesul de producție și să identifice zonele în care sudarea poate fi automatizată [49].

În cadrul *Șantierului Naval Damen SA Mangalia*, au fost elaborate zece proceduri de sudare cap la cap semimecanizat MAG-C ( $D_G = 20$  l/min) cu sârmă tubulară rutilică E71T-1 conform AWS A5.20, cu diametrul de 1,2 mm (DC<sup>+</sup>), material de bază oțel AH 36 cu grosimea de 16 mm, rost în V ( $\alpha = 40...60^\circ$ , deschiderea rostului  $b = 6 \pm 2$  mm), temperatura interpas max. 220 °C, suport ceramic plat, în conformitate cu regulile registrelor navale ABS, BV și GL [51...53].

În cadrul *Șantierului Naval Damen SA Galați*, colectivul Laboratorului de Sudură în colaborare cu secțiile de corp I și IA, au trecut la extinderea sudării semimecanizate și mecanizate MAG-M în amestec de gaze protectoare ușor oxidant M21 (Corgon 18).

În acest sens, s-au folosit atât sârmă plină (ER70S-6 conform AWS A5.18) cât și sârmă tubulară rutilică (E71T-1 conform AWS A5.20) cu diametrele de 1,2 mm, în conformitate cu regulile registrelor navale GL și LRS [54...59].

### 1.3. Stadiul actual al cercetărilor privind tensiunile și deformațiile

#### 1.3.1. Noțiuni teoretice privind tensiunile și deformațiile la sudare

În timpul operației de sudare, materialul de bază care participă în procesul de sudare, se încălzește până la punctul de topire a metalului. Materialul de bază încălzit încearcă să se dilate în toate direcțiile, dar el este totuși împiedicat de materialul rece din jur. Dacă izoterma de 600 °C este depășită, oțelul pierde capacitatea de rezistență elastică și apare o deformație plastică de comprimare.

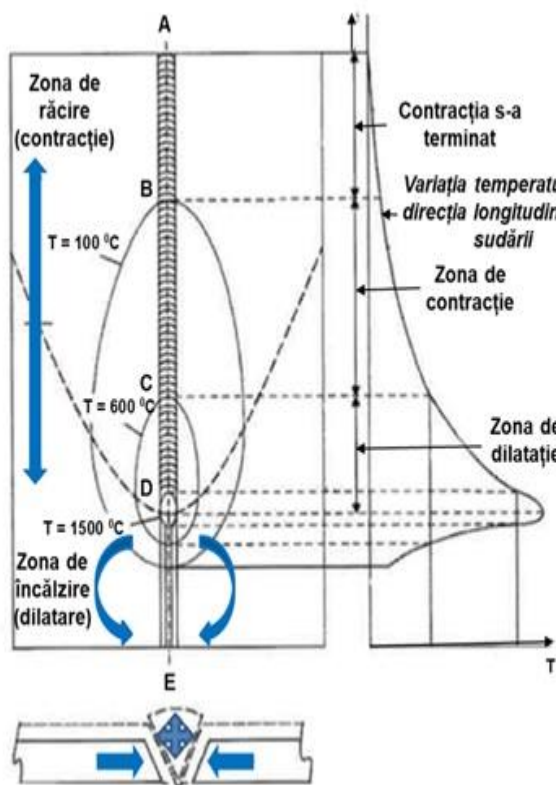
Chiar și în zonele cu temperaturi mai mici apar tensiuni de compresiune care depășesc limita de curgere și apar deformări plastice de intensitate mai redusă (Fig. 1.9).

Extinderea băi topite este deasemenea împiedicată de către zonele adiacente mai reci. Aici la fel este o comprimare-refulare a metalului. La o temperatură mai mare de 600 °C punctul de cedare a metalului este foarte scăzut și deformarea plastică a materialului poate fi ușor obținută.

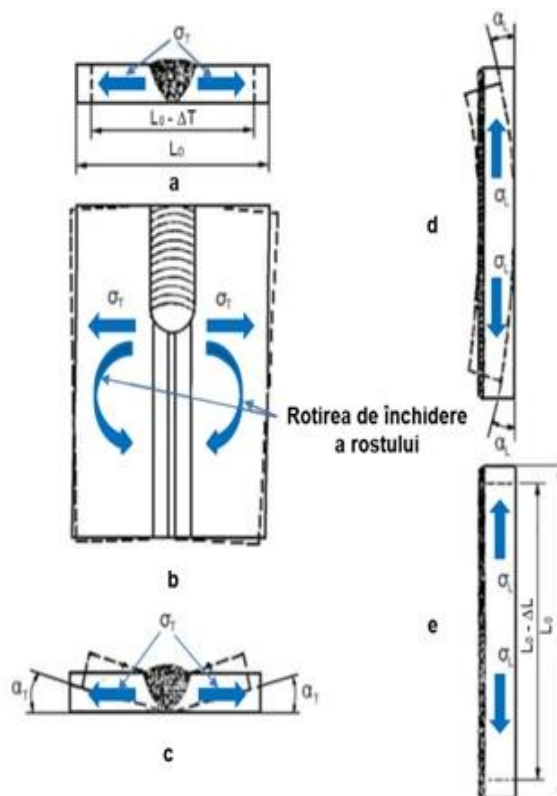
Tensiunile reziduale apar ca urmare a refulării deformării plastice. Cu scăderea temperaturii, crește punctul de cedare și capacitatea de deformare plastică scade.



Deformări plastice nu mai sunt posibile. Deformația apare când tensiunile reziduale nu mai pot fi reduse sau împiedicate.



**Fig. 1.9.** Variația temperaturii la o îmbinare sudată cap la cap (preluare și prelucrare din [60])



**Fig. 1.10.** Tensiunile și deformațiile în îmbinările sudate cap la cap (preluare și prelucrare din [60])

**Contractia transversală** (Fig. 1.10. a) apare datorită faptului că cele două componente nu sunt libere să se dilate și să se contracte. De aceea, piesa sudată va avea o lățime mai mică. Reducerea lățimii după sudare este contractia transversală  $\Delta T$ . În cazul în care contractia este împiedicată, apar tensiuni transversale de întindere  $\sigma_T$ . Dacă acestea depășesc rezistența materialului, atunci apar fisuri longitudinale în cusătură sau în ZIT.

**Contractia rostului** (Fig. 1.10. b) în timpul sudării se datorează contracției transversale ce progresează pe măsură ce se realizează îmbinarea sudată. Rostul între componente are tendința să se închidă. Dacă această contracție este împiedicată, atunci în secțiunea cusăturii apar tensiuni transversale de întindere  $\sigma_T$  și, în cazul când se depășește rezistența materialului, apar fisuri longitudinale în cusătură sau în ZIT.

**Rotația componentelor în jurul axei cusăturii** (Fig. 1.10. c) se produce din cauza încălzirii diferite a feței pe care se sudează în comparație cu fața opusă. Componentele se rotesc fiecare cu un unghi  $\alpha_T$ . Dacă rotația este împiedicată, vor apare tensiuni de întindere transversale  $\sigma_T$ , care, la depășirea valorilor de rezistență a materialului provoacă fisuri longitudinale în cusătură sau ZIT.

**Îndoirea componentelor în jurul unei axe perpendiculare pe axa cusăturii și aflată în planul tablelor** (Fig. 1.10. d) se produce din cauza contracției mari pe fața pe care s-au sudat în comparație cu fața opusă. Componentele se îndoiesc fiecare cu un unghi  $\alpha_L$ . Dacă îndoirea este împiedicată, vor apare tensiuni de întindere  $\sigma_L$  pe fața pe care s-a sudat și la depășirea valorilor de rezistență a materialului, aceste tensiuni conduc la apariția fisurilor transversale în ZIT sau cusătură.

**Contractia longitudinală** se datorează aceluiași cauze ca și cea transversală (Fig. 1.10. e). Ca urmare, după sudare, piesa realizată va avea o lungime mai mică. Reducerea  $\Delta L$  a lungimii este contractia longitudinală. În cazul în care contractia longitudinală este împiedicată, apar tensiuni de întindere  $\sigma_L$  și acestea, la depășirea rezistenței materialului, provoacă fisuri transversale în cusătură sau în ZIT.

*Tensiunile interne datorate procesului de sudare sunt nedorite deoarece [61]:*

- formează în îmbinările sudate vârfuri de solicitare care conduc la apariția fisurilor și la amorsarea ruperii fragile;
  - produc stări de solicitare biaxiale și triaxiale (de obicei de întindere) care fac materialul de bază casant;
  - dau naștere la deformații plastice care schimbă forma și înrăutățește precizia dimensională a construcției metalice sudate;
  - micșorează sarcina portantă a asamblării, deoarece tensiunile interne se pot cumula cu tensiunile provenite din solicitările exterioare, până la limita de rupere.
- Tensiunile interne datorate sudării pot fi intenționate sau folositoare* când [61]:
- pot da naștere unor deformații dorite, în scopul fasonării unor elemente de structură metalică, cu ajutorul tensiunilor interne de natură termică;
  - pot mări rezistența construcției metalice mai ales când sunt de compresie, iar construcția este solicitată la întindere;
  - se realizează asamblări sau fretări ale diferitelor subansamble.

Caracteristicile materialului de bază influențează tensiunile și deformațiile remanente prin următorii parametri [61]: *coeficientul de dilatare termică liniară  $\alpha$ ; conductibilitatea termică  $\lambda$ ; limita de curgere  $\sigma_c$ ; modulul de elasticitate longitudinal  $E$  și temperatura de topire a materialului de bază  $t_t$ .*

## 1.4. Stadiul actual al cercetărilor privind coroziunea marină

### 1.4.1. Noțiuni teoretice

*Coroziunea* este definită ca fiind interacțiunea fizico-chimică între un metal și mediul său, care duce la schimbări în proprietățile metalului, și care poate conduce la afectarea semnificativă a funcției de metal, mediu sau sistem tehnic, din care acestea fac parte [104]. Aceasta este practic un proces de distrugere a materialelor, sub acțiunea chimică sau electrochimică a mediului înconjurător, sau a substanțelor cu care acestea vin în contact [104...113]. Coroziunea naturală se produce datorită prezenței simultane a aerului și a apei, fiind un proces nedorit, ruginirea fierului este păgubitoare pentru economie.

Metalele și aliajele reacționează ușor cu medii foarte diverse corodându-se (oxidându-se), datorită structurii lor electronice, caracterizată prin prezența electronilor "liberi" în rețeaua cristalină. În natură, cu excepția metalelor nobile (Au, Ag și Pt), majoritatea metalelor se găsesc în stare combinată (oxidată-minereuri). Din punct de vedere energetic, tendința metalelor de a se coroda, este caracterizată de valoarea entalpiei libere  $\Delta G$ . Toate metalele au tendința de a se oxida, în funcție de locul lor în seria galvanică, cunoașterea locului metalului în această serie, fiind foarte importantă pentru decizia utilizării lui în diferite aplicații industriale [110...113].

În cazul fierului, cel mai comun minereu de fier este *hematita*, care este un oxid al fierului. Cel mai comun produs de coroziune al fierului este *rugina* care are o compoziție chimică și culoare asemănătoare cu hematita (roșu brun). Componentul principal care dă culoarea ruginii este *oxidul feric hidratat*  $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ , scris uneori ca  $Fe(OH)_3$ .

La evaluarea pierderilor prin coroziune, se ține seama nu numai de pierderile efective de oțel prin coroziune (aprox. 10% din producția anuală), ci și de cheltuielile de reparații, de înlocuire a pieselor corodate, de protejare ca și de costul materialelor de protecție anticorozivă. Din acest motiv, pe plan mondial, se fac cercetări ample în domeniul protecției împotriva coroziunii, în laboratoare publice sau private [107, 113]. Coroziunea și prevenirea ei sunt aspecte foarte importante pentru o dezvoltare sustenabilă a unei societăți [112, 113]. La nivel mondial, societățile comerciale de succes fac eforturi considerabile în investițiile privind controlul coroziunii din etapa de proiectare până la etapa operațională.

Distrugerile provocate de coroziune sunt condiționate de specificul oțelului, mediul coroziv și condițiile de operare. În cazul metalelor, întâlnim două tipuri de coroziune:

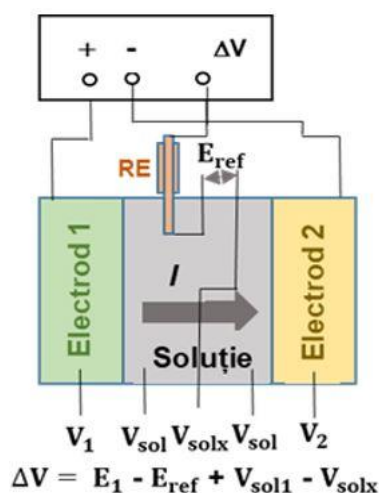
- *coroziunea chimică* care are loc la suprafața metalelor în contact cu gazele uscate sau cu soluțiile de neelectroliti;
- *coroziunea electrochimică* care are loc la suprafața metalelor în contact cu soluții de electroliți sau în prezența umidității.

Rugina este o peliculă roșie-marou solidă și hidratată, sau pulbere. Produsul primar de coroziune este  $Fe(OH)_2$  sau mai exact  $FeO \cdot nH_2O$ , dar oxigenul și apa pot conduce și la alți produși de coroziune cu diferite culori [104]:

- $Fe_2O_3 \cdot H_2O$  sau  $Fe(OH)_3$  - oxid feric hidratat care dă în principal culoarea roșu-brun;
- $Fe_3O_4 \cdot H_2O$  sau  $Fe_2O_3 \cdot FeO$  - magnetită hidratată sau oxidul fero-feric, de obicei de culoare verde, dar poate fi și albastru închis în prezența unor complexanți;
- $Fe_3O_4$  - magnetită de culoare neagră.

#### 1.4.2. Metode electrochimice de evaluare a rezistenței la coroziune

Metodele de investigare a coroziunii pot fi electrochimice și neelectrochimice. Metodele electrochimice sunt metodele în care perturbarea sistemului studiat și urmărirea răspunsului dat de sistem la această perturbare se face cu un semnal de natură electrică (curent, potențial, cantitate de electricitate etc). Metodele neelectrochimice sunt metodele care apelează la alte mărimi decât cele electrice, ele utilizându-se pentru obținerea unor informații complementare celor furnizate de metodele electrochimice (metode spectroscopice, optice, microscopie electronică, difracție de raze X etc). Metodele electrochimice sunt cele mai eficiente pentru investigațiile în situ, ele fiind totodată cele mai utilizate pentru caracterizarea și evaluarea rezistenței la coroziune. Variabila urmărită în metodele electrochimice poate fi: curentul (cronoamperometrie, voltametrie); potențialul (cromopotentiometrie); sarcina electrică (cronoculometrie) sau impedanța sistemului.



**Fig. 1.17.** Celula de electroliză (electrochimică) cu trei electrozi (imagine adaptată din [104])

#### 3. Electrodele de referință RE

Acest electrod se alege în funcție de natura soluției sau a mediului coroziv. Dacă electrolitul nu conține ioni de clor, se preferă un electrod de referință altul decât cel de calomel. Dacă electrolitul conține ioni de clor, se preferă un electrod de referință de calomel sau de  $Ag-AgCl$ .

#### 4. Celula de electroliză (electrochimică)

Celula de electroliză (electrochimică) este de tipul a trei electrozi ( $WE$ ,  $CE$  și  $RE$ ) imersați în electrolit (Fig. 1.17).

#### 5. Electrolit

Compoziții electrolitul se cântăresc la balanța analitică, se dizolvă în apă distilată și se aduc la semn la balonul de cotat.

#### 1.4.3. Zonele de coroziune a structurilor marine

*International Association of Classification Societies (IACS)* a clasificat mediile de coroziune la care sunt expuse structurile metalice marine, precum și mecanismele de coroziune care au loc în diferite zone de expunere și efectuează anchete periodice, pentru a garanta că structura navală se află într-o stare bine întreținută ce nu afectează integritatea.

*International Maritime Organization (IMO)* joacă un rol important, cu scopul de a spori eficiența siguranței în exploatare la nivel internațional. Registrele navale grupează pentru navele și

Pentru acuratețea programului experimental și a rezultatelor obținute, se va stabili un *protocol experimental* care cuprinde toate măsurătorile și etapele necesare [104]:

#### 1. Pregătirea catodului sau a electrodului de lucru WE

Proba metalică pentru testarea rezistenței la coroziune este supusă proceselor de: curățare; delimitare exactă a suprafeței active de testare (1...4  $cm^2$ ); realizarea de contact electric pentru conexiunea la bornele aparatului electrochimic și izolarea perfectă a celorlalte suprafețe cu rășină izolatoare.

#### 2. Pregătirea anodului sau contraelectrodului sau electrodului auxiliar AE

Pentru testele de coroziune, contraelectrodul trebuie să fie din material inert, platină ( $Pt$ ), aliaj platină-rhodium ( $Pt-Rh$ ), cu o formă cât mai corespunzătoare electrodului de lucru  $WE$ , având suprafața activă bine definită și curată și dacă este cazul, se vor izola celelalte suprafețe.

structurile metalice plutitoare din mediul marin, șase zone de coroziune. Fiecare zonă prezintă diferite forme de coroziune specifice. De aceea, pentru fiecare zonă, trebuie avute în vedere, formele de atac coroziv, pentru a se stabili sistemul de protecție adecvat (Fig. 1.18), [114...116].



Fig. 1.18. Zonele de coroziune la o navă maritimă (imagine prelucrată din [114...116])

#### 1.4.4. Aspecte ale coroziunii metalelor

În figura 1.20 sunt prezentate exemple de coroziuni la corpul navei oceanografice pentru cercetări științifice multidisciplinare "Mare Nigrum", constatate în anul 2017.

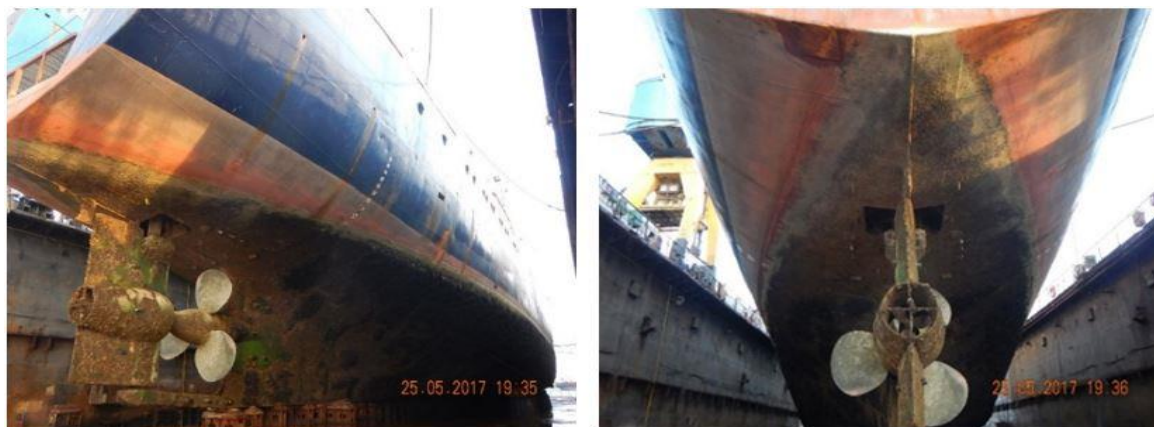


Fig. 1.20. Exemple de coroziuni la corpul navei "Mare Nigrum" (imagini preluate din [121])

#### 1.4.5. Stadiu actual al cercetărilor privind comportarea la coroziune

Metodele electrochimice utilizate în cadrul unui protocol experimental folosit pentru a evalua comportamentul la coroziune sunt următoarele [105]:

- variația în timp a potențialului de electrod în circuit deschis (*Open Circuit Potențial - OCP*);
- trasarea curbelor de polarizare;
- evaluarea curbelor de polarizare în regim potențiodinamic (*PD*), trasate în domeniul de potențial cuprins între - 1,5 V vs. Ag/AgCl și + 1,5 V vs. Ag/AgCl, cu viteze de baleiere a potențialului de 1 mV/s și 5 mV/s;

➤ evaluarea curbelor de voltametrie ciclică (CV) în domeniul de potențial ce a fost cuprins între - 1,5 V vs. Ag/AgCl și + 1,5 V vs. Ag/AgCl și retur la - 1,5 V, cu viteze de baleiere a potențialului de 1 mV/s și 5 mV/s.

Pe plan internațional, criza de materii prime și resurse energetice a condus la creșterea numărului de structuri metalice sudate, parțial sau total imerse în mări și oceane. Acest lucru a condus la extinderea și dezvoltarea cercetărilor privind coroziunea marină, cu precădere în ultimii cinci ani [136...150]. În prezent, încă din etapa de proiectare a structurilor metalice navale, se fac studii complexe privind comportarea la coroziune în mediu marin a materialului de bază cât și a îmbinărilor sudate. Deasemenea, o atenție deosebită este acordată metodelor de protecție a corpurilor metalice ale navelor maritime la coroziunea marină, atât la navele noi cât și la cele aflate în exploatare [135...165].

## 1.7. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare

Pornind de la obiectivele tezei de doctorat, mi-am propus realizarea programului experimental descris detaliat tot în figura 1.23.

Activitățile de cercetare din cadrul tezei de doctorat se vor derula în cadrul a *două universități* (Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați și Universitatea "Politehnica" din București), *un institut de cercetări* (Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină GeoEcoMar București) și *o societate comercială* (SC Ductil SA Buzău), după cum urmează:

➤ Depunerea cordoanelor în vederea realizării cercetărilor experimentale preliminare privind analiza cordoanelor depuse, sudarea mecanizată MAG-M pe suport ceramic plat cu sârme tubulare în vederea analizelor comportării oțelului naval EH 36 la sudare și în vederea analizelor experimentale ale câmpurilor termice, tensiunilor și a deformațiilor, precum și controalele vizuale ale îmbinărilor sudate, se vor realiza în cadrul *Laboratorului de Dezvoltare Procese și Tehnologii de Sudare prin Topire (LDPTST) și a Laboratorului de Control Nedistructiv (LCDT), ale Centrului de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (SUDAV), Departamentul Ingineria Fabricației, Facultatea de Inginerie, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați;*

➤ Controalele nedistructive RX ale îmbinărilor sudate, prelevarea și prelucrarea epruvetelor și încercările mecanice de laborator, se vor realiza în cadrul *Departamentului Calitate, Serviciul Laboratoare, SC Ductil SA Buzău;*

➤ Analizele macroscopice, microscopice și de microduritate Vickers HV1, se vor realiza în cadrul *Laboratorului pentru Încercări Metalografice (LAMET), Departamentul Ingineria Calității și Tehnologii Industriale, Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică, Universitatea "Politehnica" din București;*

➤ Modelările cu elemente finite și experimentale ale tensiunilor și deformațiilor, se vor realiza în cadrul *Centrului de Cercetare Științifică Mecanica și Tribologia Straturilor Superficiale (MTSS), Laboratorul de Modelare și Grafică, Departamentul de Inginerie Mecanică, Facultatea de Inginerie, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați;*

➤ Colectarea probelor de apă din Marea Neagră necesare analizelor la coroziune, se va realiza pe *Nava de cercetare maritimă multifuncțională "Mare Nigrum" a Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină-GeoEcoMar București.*

➤ Analizele comportărilor la coroziune, se vor realiza în cadrul *Laboratorului de Electrochimie și Coroziune a Centrului de Cercetare (Competențe) Interfețe-Tribocoroziune-Sisteme Electrochimice (CC-ITES), Departamentul de Ingineria Mediului și Securității în Industrie, Facultatea de Inginerie, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați;*

➤ Analizele microstructurale SEM și a compozițiilor chimice EDX, înainte și după efectuarea comportărilor la coroziune, se vor realiza în cadrul *Laboratorului de Analiză Structurală și Control Nedistructiv, Centrul de Cercetare Analize Fizico-chimice, Morfo-funcționale și Chemometrie, Departamentul de Chimie, Fizică și Mediu, Facultatea de Științe și Mediu, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați.*

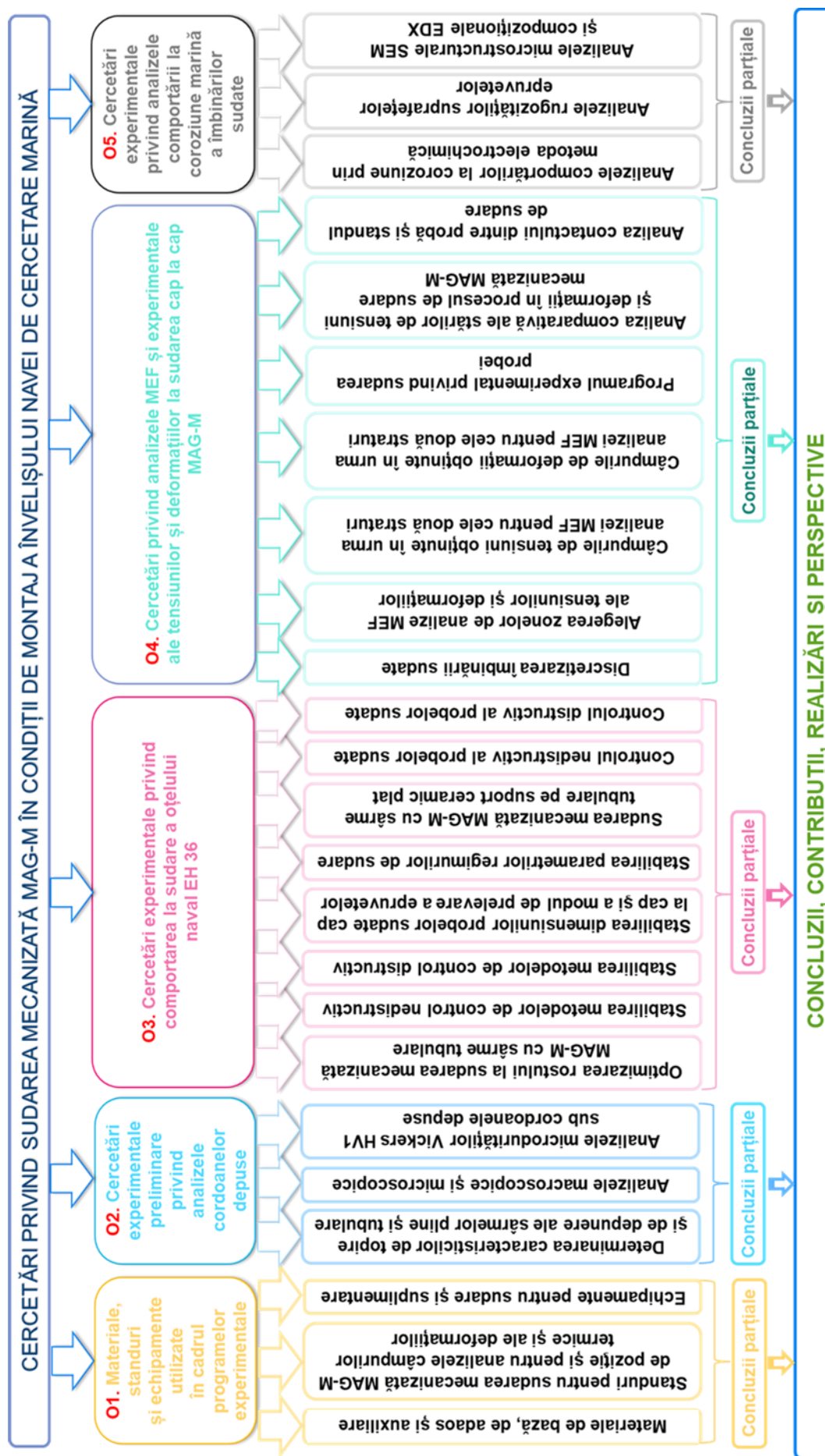


Fig. 1.23. Obiectivele și descrierea programul experimental al tezei de doctorat [1]

## CAPITOLUL 2

### MATERIALE, STANDURI ȘI ECHIPAMENTE UTILIZATE ÎN CADRUL PROGRAMELOR EXPERIMENTALE

#### 2.1. Materiale

În acest capitol 2, în cadrul obiectivului O1 al tezei de doctorat, s-au parcurs 3 etape (materiale, standuri și echipamente), prezentate în figura 2.1.

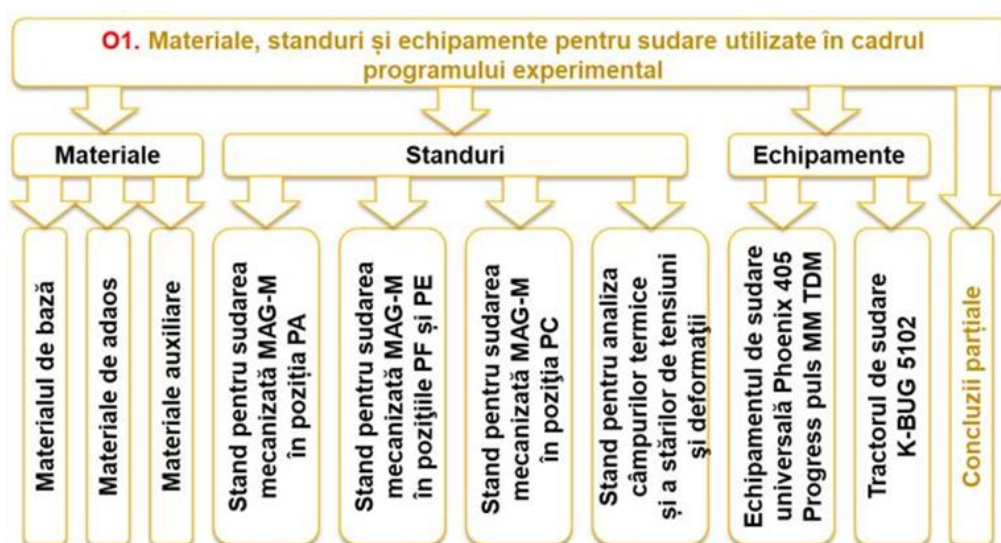


Fig. 2.1. Etapele parcurse în cadrul obiectivului O1 al tezei de doctorat (imagine adaptată din [166])

##### 2.1.1. Materialul de bază

În cadrul programelor de cercetări experimentale din cadrul tezei de doctorat, s-au folosit *table din oțel naval de înaltă rezistență marca EH 36 cu grosimea de 10 mm*. Aceste table din oțel au avut compoziția chimică și caracteristicile mecanice, conform certificatului de calitate (ANEXA 1).

##### 2.1.2. Materiale de adaos

În cadrul programelor de cercetări experimentale din cadrul tezei de doctorat, s-au folosit o *sârmă plină (ER70S-6 conform AWS A5.18)* și două tipuri de *sârme tubulare (cu pulberi metalice E70C-6MH4 conform AWS A5.18 și cu flux rutilic E81T1-Ni1MJH4 conform AWS A5.29)*, cu diametrele de 1,2 mm, având compozițiile chimice și caracteristicile mecanice conform certificatelor de calitate (ANEXA 1)

##### 2.1.3. Materiale auxiliare

###### 1. Amestecul de gaze de protecție

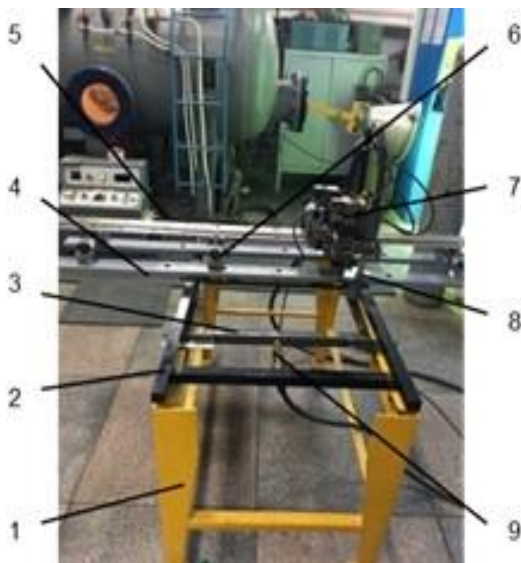
În cadrul programelor de cercetări experimentale, s-a folosit *amestecul de gaze de protecție activ M21 cunoscut sub denumirea de Corgon 18 (82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>)* care combină avantajele CO<sub>2</sub>-lui pur cu stropirea redusă a amestecurilor Ar + O<sub>2</sub>.

###### 2. Suporturi ceramice

Pentru cercetările experimentale, s-au ales *suporturi ceramice plate pe bandă de aluminiu auto-adezivă cu canal concav Keraline TF2-9* [189].

## 2.2. Standuri

### 2.2.1. Stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția PA



**Fig. 2.4.** Stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția PA (imagine preluată din [166])

Pe acest stand experimental (Fig. 2.4), au fost realizate:

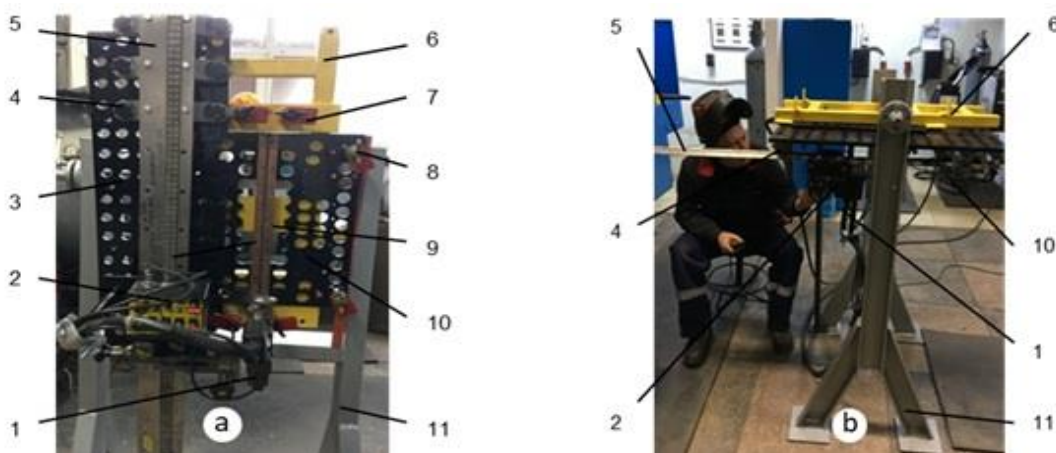
- cercetările experimentale preliminare privind analiza cordoanelor depuse cu sârme pline și tubulare;
- cercetările experimentale privind comportarea oțelului naval EH 36 la sudarea mecanizată MAG-M în poziția PA.

Elementele componente ale acestui stand, sunt [166]: 1- masă suport; 2- cadru metalic; 3- suport probă; 4- traverse; 5- șină flexibilă Hi-Flex Rail FMD-1050 pentru ghidarea tractorului de sudare; 6- perechi de magneți ficși FMD-2010; 7- tractor de sudare K-BUG 5102; 8- pistolul de sudare SBG-450-E; 9- clemă de masă. Cele două traverse rectangulare 4 (1.500 x 60 x 2 mm), au fost dispuse paralel cu axa viitoarelor îmbinări sudate, amplasate la distanța dintre ele de 200 mm, corespunzătoare distanței dintre magneți.

### 2.2.2. Stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în pozițiile PF și PE

În cadrul cercetărilor experimentale privind comportarea oțelului naval EH 36 la sudarea mecanizată MAG-M în pozițiile vertical ascendent PF și peste cap PE, folosind sârme pline și tubulare, a fost utilizat standul prezentat detaliat în figura 2.5. Acest stand este compus din [166]: a- PF; b- PE; 1- pistol de sudare SBG-450-E; 2- tractor de sudare K-BUG 5102; 3- placă susținere magneți; 4- perechi de magneți ficși FMD-2010; 5- șină flexibilă Hi-Flex Rail FMD-1050 pentru ghidarea tractorului de sudare; 6- suport metalic; 7, 8- bride cu șurub rigidizare probă de sudat; 9- șină de cupru susținere suport ceramic; 10- placă suport probă de sudat; 11- cadru metalic.

Pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția incomodă PE, s-a demontat șina 5 cu cele patru suporturi magneți 4, s-a basculat în față cu 90° placa rigidizare placă susținere magneți și placă susținere probă de sudat 6, s-a blocat dispozitivul și s-a re poziționat din nou șina de ghidare tractor de sudare 5 cu ajutorul celor patru suporturi cu magneți 4, realizându-se paralelismul dintre șina 5 și canalul practicat în șina de cupru susținere suport ceramic 9.



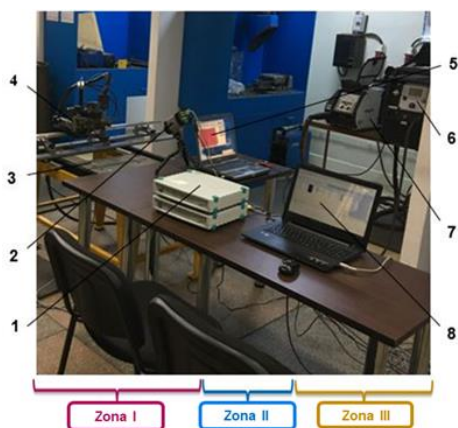
**Fig. 2.5.** Stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în pozițiile incomode PF și PE (imagine preluată din [166])



### 2.2.3. Stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția PC



**Fig. 2.6.** Stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția incomodă PC (imagine preluată din [166])



**Fig. 2.7.** Stand pentru analiza câmpurilor termice și a deformațiilor la sudarea mecanizată MAG-M în poziția orizontală PA (imagine preluată din [166])

Pentru cercetările experimentale privind comportarea oțelului naval EH 36 la sudarea mecanizată MAG-M în poziția orizontală pe perete vertical sau de cornișă PC, standului pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția verticală ascendentă PF prezentat în figura 2.5. a, a fost dispus culcat pe masa standului pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția PA (Fig. 2.4) și fixat conform figurii 2.6.

Elementele componente ale acestui stand, sunt [166]: 1- cadru metalic; 2- placă susținere magnetă; 10- masă suport; 3- tractor de sudare K-BUG 5102; 4- perechi de magneti ficși FMD-2010; 5- șină flexibilă Hi-Flex Rail FMD-1050 pentru ghidarea tractorului de sudare; 6- cablu de masă; 7- bride cu șurub; 8- proba de sudat; 9- pistolul de sudare SBG-450-E; 10- masă suport (Fig. 2.10).

### 2.2.4. Stand pentru analiza câmpurilor termice și a tensiunilor la sudare

În cadrul cercetărilor experimentale privind analiza câmpurilor termice și a tensiunilor la sudarea mecanizată MAG-M în poziția orizontală PA, folosind sârme tubulare, a fost utilizat standul prezentat detaliat în figura 2.7.

Acest stand, este format din trei zone [166]:

- Zona I- sudarea probelor;
- Zona II- înregistrarea datelor privind

câmpurile termice este constituită din: 2- camera de termografiere Flir A20M și 5- sistem de achiziții date câmpuri termice.

➤ Zona III- înregistrarea datelor privind tensiunile și deformațiile este constituită din: 1- sistem electronic de măsurare Spider 8 și 8- sistem de achiziții date tensiuni.

## 2.3. Echipamente

### 2.3.1. Echipamente și accesorii pentru sudare

#### 2.3.1.1. Sursa de sudare universală Phoenix 405 Progress puls MM TDM

Echipamentul de sudare universală Phoenix 405 Progress puls MM TDM, (Fig. 2.8, a- conform catalog; b- în timpul cercetărilor experimentale) permite sudarea prin trei procedee (MIG-MAG, WIG și MMA).

Sudarea MIG-MAG se poate realiza prin cinci moduri de transfer al picăturilor prin coloana arcului electric de sudare: ForceArc; ForceArc Puls; RootArc; RootArc Puls; Impuls și Super Puls.

#### 2.3.1.2. Tractorul de sudare K-BUG 5102

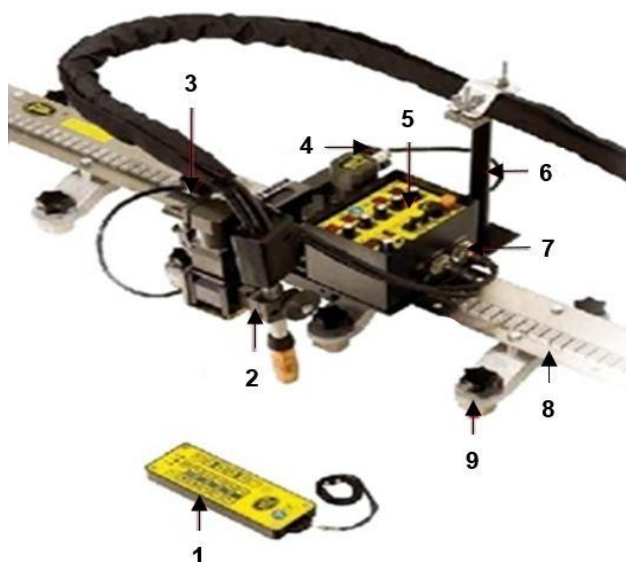
Acest tractor de sudare (Fig. 2.15) este constituit din [192]: 1- telecomandă; 2- sistem de fixare a pistolului de sudare; 3- reglarea poziției pistolului de sudare pe verticală; 4- reglarea poziției pistolului de sudare pe orizontală; 5- panou de control; 6- suport cablu; 7- alimentare tractor de sudare; 8- șină flexibilă din oțel inoxidabil; 9- sistem de fixare cu magneti.

### 2.3.2. Echipamente suplimentare

Activitățile de cercetare efectuate pe parcursul studiului doctoral, au fost derulate utilizând infrastructura modernă a două universități (*Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați* și *Universitatea "Politehnica" din București*), un institut de cercetări (*Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină GeoEcoMar București*) și o societate comercială (*SC Ductil SA Buzău*). În cadrul programelor experimentale, în plus față de echipamentele pentru sudare, s-au utilizat și 13 echipamente suplimentare (verificate metrologic).



**Fig. 2.8.** Echipament de sudare universală Phoenix 405 Progress puls MM TDM (imagine preluată din [166, 190])



**Fig. 2.15.** Tractorul de sudare K-BUG 5102 (imagine preluată din [166, 191])

## CAPITOLUL 3

### CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRELIMINARE PRIVIND ANALIZELE CORDOANELOR DEPUSE

#### 3.1. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare

În acest capitol 3, în cadrul obiectivului O2 al tezei de doctorat, *Cercetări experimentale preliminare privind analizele cordoanelor depuse*, s-au parcurs 4 etape, prezentate detaliat în figura 3.1.



**Fig. 3.1.** Etapele parcurse în cadrul obiectivului O2 al tezei de doctorat (imagine preluată din [166])

#### 3.2. Determinarea caracteristicilor de topire și de depunere ale sârmelor

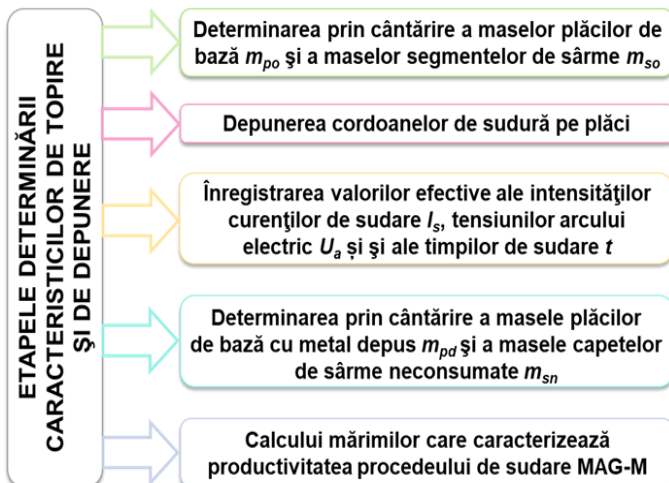
##### 3.2.1. Materiale și echipamente pentru sudare

În cadrul obiectivului O2 al tezei de doctorat, s-au utilizat următoarele materiale de bază, de adaos și auxiliare [166]:

➤ *material de bază:* patru table din oțel de construcții sudabile S355N cu dimensiunile 200 x 150 x 7 mm, având compoziția chimică și caracteristicile mecanice conform SR EN 10025-1/2005 și SR EN 10025-2/2005;

➤ *materiale de adaos:* sârmă plină ER70S-6 conform AWS A5.18/A5.18M, sârmă tubulară cu pulberi metalice E70C-6MH4 conform AWS A5.18 și sârmă tubulară cu flux rutilic E81T1-Ni1MJH4 conform AWS A5.29/ A5.29M, cu diametrele de 1,2 mm, având compozițiile chimice și caracteristicile mecanice conform tabelului 2.5;

➤ *material auxiliar:* amestec de gaze de protecție activ M21 (Corgon 18, 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>).



**Fig. 3.2.** Etapele determinării caracteristicilor de topire și de depunere (imagine preluată și adaptată din [166] și publicată în [194])

În cadrul programului experimental, a fost utilizat standul pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția PA, prezentat detaliat în capitolul 2, figura 2.4.

##### 3.2.2. Program experimental

Pentru determinarea caracteristicilor de topire și de depunere, în cazul sudării mecanizate MAG-M, cu sârme pline și tubulare, s-au parcurs cinci etape prezentate în figura 3.2.

În timpul depunerilor cordoanelor de sudură pe plăci, o parte dintre parametrii tehnologici au fost menținuți constanți (DC<sup>+</sup>) [166, 194]: timpul de staționare pe margini  $t_{st} = 0,2$  s; debitul de gaz de protecție  $Q_G = 18$  l/min; timpul pregaz  $t_{preg} = 5$  s; timpul postgaz  $t_{posg} = 5$  s și distanța duză-placă  $h_{d-p} = 15$  mm. Restul parametrilor de sudare au fost stabiliți experimental, pentru sudarea efectivă a probelor sudate cap la cap, în poziția orizontal PA, cu sârmă plină și cu cele două sârme tubulare.

### 3.2.3. Prelucrarea grafică și interpretarea rezultatelor experimentale

În figurile 3.9...3.12 sunt centralizate grafic, caracteristicile de topire și de depunere ale sârmelor pline și tubulare la sudarea mecanizată MAG-M.

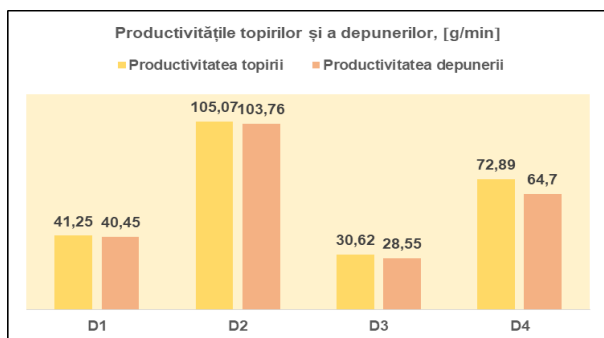


Fig. 3.9. Productivitățile topirilor și a depunerilor (imagine preluată din [166])

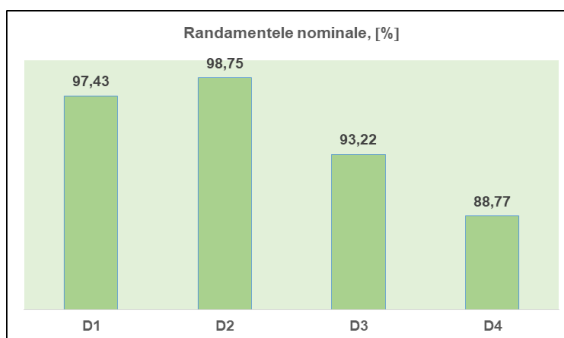


Fig. 3.10. Randamentele nominale (imagine preluată din [166])

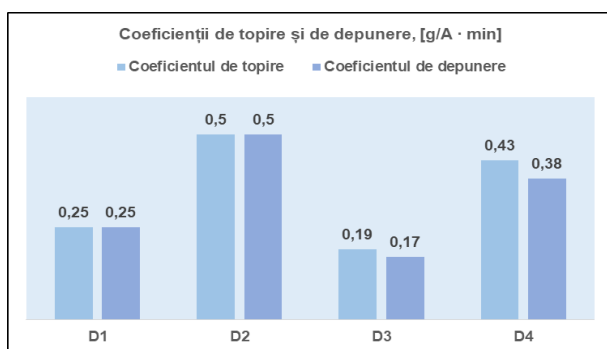


Fig. 3.11. Coeficienții de topire și de depunere (imagine preluată din [166])

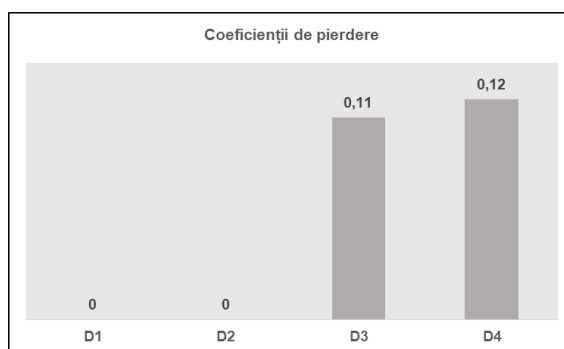


Fig. 3.12. Coeficienții de pierdere (imagine preluată din [166])

## 3.3. Analizele macroscopice și microscopice

**1. Examinarea macroscopică** s-a realizat pentru fiecare din cele patru epruvete D1...D4, atacate cu reactivul Nital 10%, spălate cu apă și uscate cu aer cald, utilizând *microscopul metalografic Olympus GX51*. Examinările sunt prezentate în figura 3.15 (a- D1; b- D2; c- D3; d- D4).

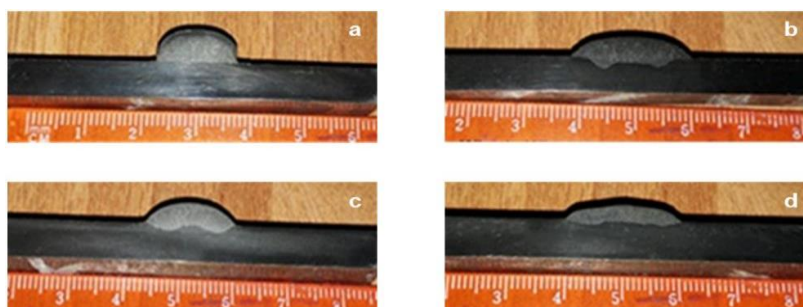
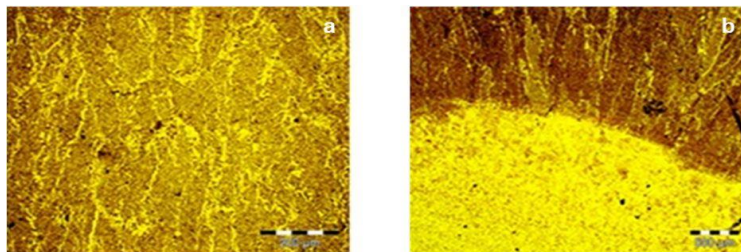
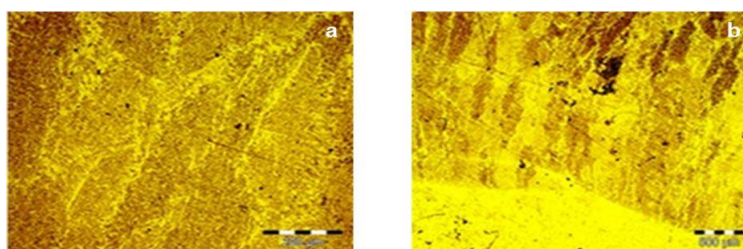


Fig. 3.15. Macrostructurile epruvetelor, atac Nital 10% (imagine preluată din [166] și publicată în [194, 201])

**2. Examinarea microscopică** s-a realizat după un atac cu reactivul Nital 2%, spălare cu apă și uscate cu aer cald, a aceluiași suprafețe frontale ale epruvetelor, utilizând tot *microscopul metalografic Olympus GX51* dotat cu *software specializat de analiză a imaginii - AnalySIS, SN 8E20014*, pe axa cordonului depus (MD) și în zona influențată termomecanic (ZIT). În figurile 3.19...3.20, sunt prezentate microstructurile pe axele cordonelor depuse (MD) și în ZIT ale epruvetelor prelevate din depunerile pe plăci cu cele două sârme tubulare utilizate în cadrul cercetărilor viitoare prezentate în teză D3 și D4, (atac Nital 2%; a- MD mărire 200x; b- ZIT mărire 50x).



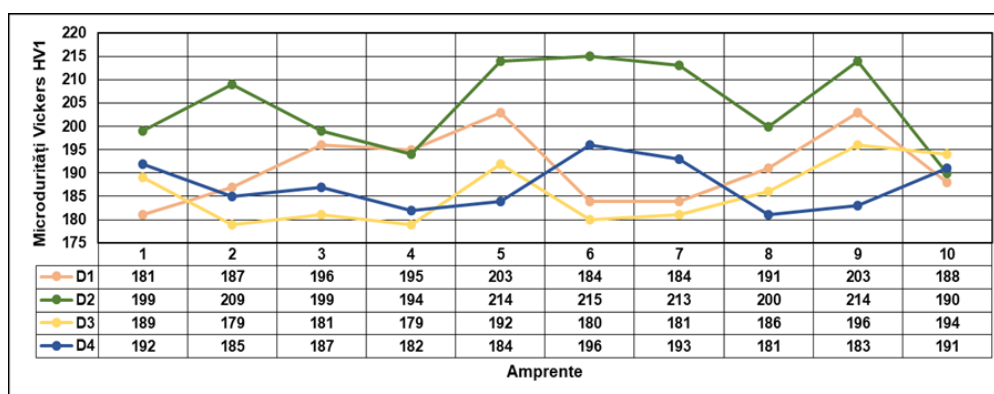
**Fig. 3.19.** Microstructuri cordon depus D3 (imagine preluată din [166] și publicată în [194, 201])



**Fig. 3.20.** Microstructuri cordon depus D4 (imagine preluată din [166] și publicată în [194, 201])

### 3.4. Analizele microdurităților Vickers HV1 sub cordoanele depuse

Determinarea microdurităților Vickers HV1 sub cordoanele depuse s-a realizat după un atac cu reactivul Nital 2% a suprafețelor frontale ale epruvetelor. Determinările s-au realizat sub cordoanele depuse folosind *durimetrul Shimadzu HMV 2TE*. Suplimentar au fost determinate câte trei microdurități Vickers HV1, în cordonul depus (MD) cât și în materialul de bază (MB). Rezultatele încercărilor de microduritate Vickers HV1 sub cordoanele depuse, realizate pe epruvetele prelevate din depunerile pe plăci D1...D4 sunt prezentate în figura 3.23.



**Fig. 3.23.** Variațiile microdurităților Vickers HV1 sub cordoanele depuse pentru epruvetele D1...D4 (imagine preluată și prelucrată din [166] și publicată în [194, 201])

## CAPITOLUL 4

### CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAREA LA SUDAREA MECANIZATĂ MAG-M A OȚELULUI NAVAL EH 36

#### 4.1. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare

În acest capitol 4, în cadrul obiectivului O3 al tezei de doctorat, *Cercetări experimentale privind comportarea la sudarea mecanizată MAG-M a oțelului naval EH 36*, s-au parcurs 10 etape, prezentate detaliat în figura 4.1.

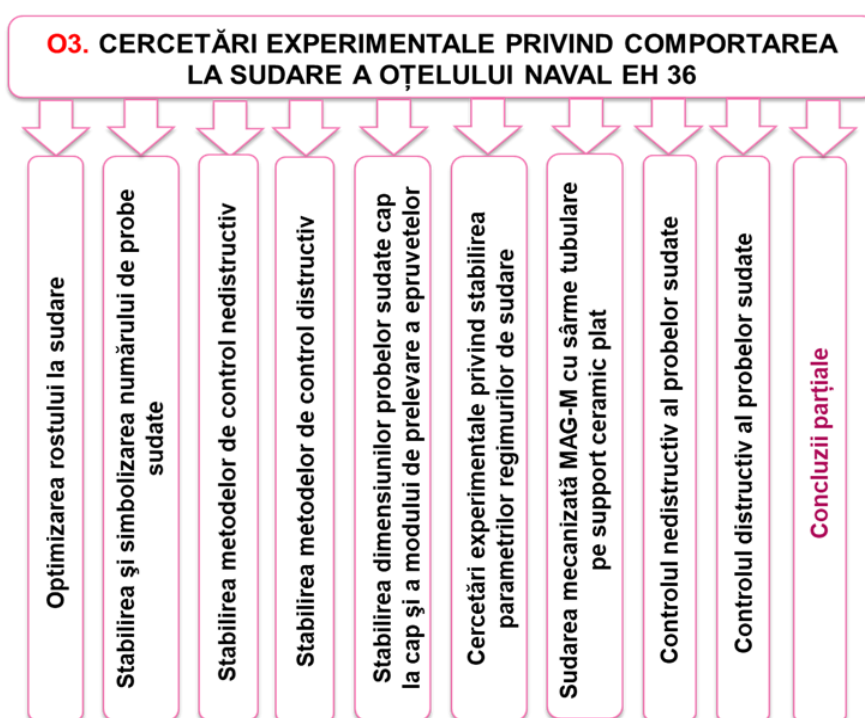


Fig. 4.1. Etapele parcurse în cadrul obiectivului O3 al tezei de doctorat (imagine preluată și prelucrată din [166])

#### 4.4. Stabilirea metodelor de control nedistructiv

Conform regulilor registrului naval Lloyd's Register (LR), îmbinările sudate cap la cap, se vor supune unui control nedistructiv, vizual (100%) și radiografic sau ultrasonic (100%) [202].

Acest control, se va aplica după ce îmbinarea sudată s-a răcit la temperatura ambiantă (pentru oțeluri navale cu rezistența la tracțiune mai mică decât 400 MPa și carbonul echivalent sub 0,41%), sau după 48 de ore de la răcirea îmbinării sudate la temperatura ambiantă (pentru celelalte oțeluri navale). În cazul aplicării unui tratament termic postsudare, controlul nedistructiv se va aplica după ce îmbinarea sudată s-a răcit la temperatura ambiantă [202].

##### 4.4.1. Controlul vizual

Pentru controlul vizual, în conformitate cu Standardul Republican SR EN ISO 17637-2011

[203], iluminarea suprafeței probei trebuie să fie de minim 350 lx recomandându-se utilizarea unei intensități de 500 lx. Pentru efectuarea examinării directe, accesul trebuie să fie suficient pentru poziționarea ochiului la cel puțin 600 mm de suprafața de examinat și la un unghi nu mai mic de aproximativ  $30^\circ$ .

#### 4.4.2. Controlul radiografic

Analiza posibilelor defecte interioare ale îmbinărilor sudate, se realizează prin control radiografic pe întreaga lungime (100%), în conformitate cu Standardul Republican SR EN ISO 17636/1-2013 [204]. Suprafața examinată s-a curățat înainte de radiografiere, îndepărtându-se stropii de sudură, zgura și straturile de protecție (dacă este cazul).

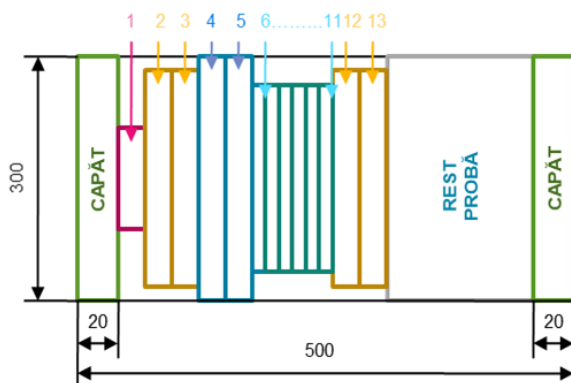
În condițiile în care sunt identificate defecte de sudare, exterioare sau interioare (în urma controlului vizual sau radiografic), probele sudate trebuie refăcute.

### 4.5. Stabilirea metodelor de control distructiv

Dacă controlul nedistructiv nu pune în evidență prezența defectelor de suprafață, se trece la următoarea etapă, care constă în prelevarea epruvetelor pentru încercările mecanice distructive, analizele macroscopice, microscopice și de microduritate Vickers HV1. Pentru îmbinărilor sudate cap la cap, regulile registrului naval Lloyd's Register (LR) recomandă următoarele încercări mecanice ale îmbinărilor sudate cap la cap la tracțiune transversal, îndoire transversală frontală, încovoiere prin șoc pe epruvete Charpy cu creștătură în V, examinări macroscopice și microscopice și încercarea de microduritate Vickers HV1 [202].

### 4.6. Stabilirea dimensiunilor probelor sudate cap la cap și a modului de prelevare a epruvetelor

Toate cele patru probe sudate mecanizat MAG-M cap la cap, pe suport ceramic plat cu canal concav (PA, PF, PE și PC), au avut dimensiunile de 500 x 300 mm (Fig. 4.13). Din fiecare probă sudată cap la cap pe suport ceramic plat, au fost prelevate următoarele epruvete pentru încercările mecanice de laborator și examinările macroscopice și microscopice [202]:



**Fig. 4.13.** Dimensiunile probelor sudate cap la cap și modului de prelevare a epruvetelor, conform regulilor registrului naval Lloyd's Register (LR) (imagine preluată din [166] și publicată în [209...212])

și 11 și 3 cu creștătura în zona influențată termomecanic (ZIT), la o distanță de 2 mm față de linia de fuziune (LF), epruvetele nr. 12, 13 și 14.

## 4.7. Cercetări experimentale privind stabilirea parametrilor regimurilor de sudare

### 4.7.1. Materiale și echipamente pentru sudare

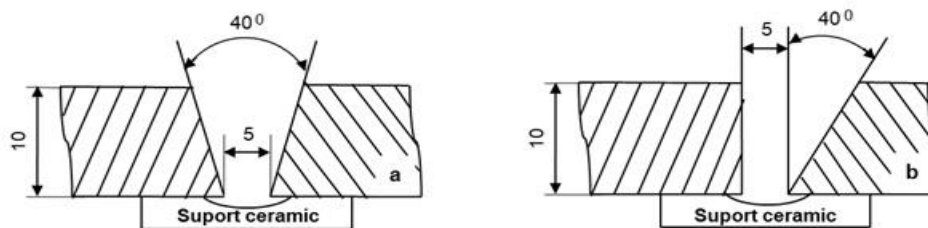
În cadrul acestui program experimental, s-au utilizat următoarele materiale de bază, de adaos și auxiliare [166]:

- *table din oțel naval de înaltă rezistență marca EH 36, cu dimensiunile 300 x 150 x 10 mm, în conformitate cu regulile registrului naval Lloyd's Register (LR) [166, 202, ANEXA 1];*
- *sârme tubulare, cu pulberi metalice E70C-6MH4 conform AWS A5.18 și cu flux rutilic E81T1-Ni1MJH4 conform AWS A5.29, cu diametrele de 1,2 mm și cu compozițiile chimice și caracteristicile mecanice conform tabelelor 2.3...2.4 din capitolul 2, [33, 34, 166, 202, ANEXA 1];*
- *amestec de gaze de protecție M21, Corgon 18 (82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>), conform SR EN ISO 14175-2008 [35] și reductor de presiune ELGA Optimator AR/MIX 30L [192];*
- *suporturi ceramice plate pe bandă de aluminiu auto-adezivă, cu canal concav, Keraline TF2-9 (lățime canal 9 mm și adâncime canal 1,3 mm).*

În cadrul programului experimental, au fost utilizate patru standuri pentru sudarea mecanizată MAG-M în pozițiile PA, PF, PE și PC, prezentate detaliat în capitolul 2, figurile 2.9...2.11.

### 4.7.2. Pregătirea componentelor în vederea sudării

În cadrul cercetărilor experimentale privind sudarea mecanizată MAG-M cu sârme tubulare, pe suport ceramic plat, tablele pentru probe din oțel naval marca EH 36 cu grosimea de 10 mm, au fost prelucrate cu plasmă de aer, conform figurii 4.14 (a- PA, PF, PE; b- PC).



**Fig. 4.14.** Pregătirea componentelor în vederea sudării mecanizate MAG-M (imagine preluată din [166] și publicată în [209... 211])

Cele două table ale fiecărei viitoare probe sudate, au fost poziționate la distanța de 5 mm și rigidizate la capete prin prindere în puncte de sudură.

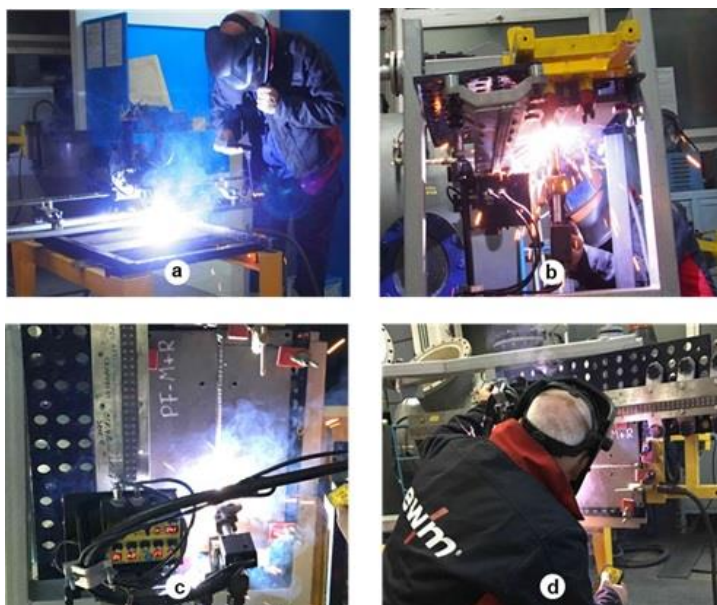
## 4.8. Sudarea mecanizată MAG-M cu sârme tubulare pe suport ceramic plat

*Echipamentul de sudare universal Phoenix 405 Progress puls MM TDM, permite sudarea prin trei procedee (MIG-MAG, WIG și MMA). Sudarea MIG-MAG se poate realiza prin cinci moduri de transfer al picăturilor prin coloana arcului electric de sudare: ForceArc; ForceArc Puls; RootArc; RootArc Puls; Impuls și Super Puls. Producătorul de echipamente pentru sudare EWM din Germania, recomandă ca pentru sudarea MAG a stratului de rădăcină, să se folosească modul de transfer RootArc, care asigură o calitate bună a rădăcinii, chiar și la sudarea cap la cap a componentelor sub 3 mm fără prelucrarea marginilor. Același producător, recomandă ca pentru sudarea MAG a straturilor de umplere și a celor finale, să se folosească modul de transfer ForceArc, care asigură o mare productivitate la sudare, deformații reduse, cusături concave cu geometrii ideale fără arsuri marginale și minimizează schimbările structurale ale materialului de bază. În timpul stabilirii parametrilor regimurilor de sudare mecanizată MAG-M, o parte dintre parametrii tehnologici au fost menținuți constanți [166, 209... 211]: natura și polaritatea curentului de sudare (DC<sup>+</sup>); timpul de staționare pe margini,  $t_{sm} = 0,2$  ms; debitul de amestec de gaze de protecție  $Q_G = 18$  l/min; timpul pregaz  $t_{preg} = 5$  s; timpul postgaz  $t_{posg} = 5$  s și distanța duză-probă  $h_{d-p} = 15$  mm.*



**Tabel 4.7.** Parametrii regimurilor de sudare mecanizată MAG-M cu sârme tubulare modificate (preluat din [166] și publicat în [209...211])

Felul stratului	Tipul sârmei tubulare	Modul de transfer	Parametrii regimurilor de sudare			
			$v_{e1}$ [m/min]	$I_{s1}$ [A]	$U_{a1}$ [V]	$v_{t1}$ [cm/min]
			$v_{p1}$ [cm/min]	$L_{p1}$ [mm]	$v_{s1}$ [cm/min]	$E_{i1}$ [KJ/mm]
<b>PA</b>						
rădăcină	pulberi metalice E70C-6MH4	RootArc	4,5	183	26,5	25
			80	6	10	2,32
final	flux rutilic E81T1-Ni1MJH4	ForceArc	11	302	31	30
			80	8	13,7	3,28
<b>PF</b>						
rădăcină	pulberi metalice E70C-6MH4	RootArc	2,7	103	13,8	17
			60	6	8	0,86
umplere	flux rutilic E81T1-Ni1MJH4	ForceArc	5,4	158	18,9	27
			60	8	14,3	0,84
final			6	167	18,9	30
			60	10	15,5	0,98
<b>PE</b>						
rădăcină	pulberi metalice E70C-6MH4	RootArc	2,7	103	13,8	17
			60	6	8,1	0,84
umplere I	flux rutilic E81T1-Ni1MJH4	ForceArc	5,4	158	18,9	27
			60	8	14,3	0,84
umplere II			6	167	18,9	30
			60	10	15,5	0,98
final			6	167	18,9	27
			60	12	16,7	0,91
<b>PC</b>						
rădăcină	pulberi metalice E70C-6MH4	RootArc	5,9	170	18,9	60
			-	-	60	0,26
umplere	flux rutilic E81T1-Ni1MJH4	ForceArc	8	220	25,3	60
			-	-	60	0,45
final			7	192	22,5	60
			-	-	60	0,35
			6	167	18,9	60
			-	-	60	0,25
			5,5	160	18,9	92
			-	-	92	0,16

**Fig. 4.17.** Realizarea efectivă a celor patru probe sudate cap la cap mecanizat MAG-M cu sârme tubulare (imagine preluată din [166] și publicată în [209...211])

În tabelul 4.7 sunt centralizați parametrii regimurilor de sudare mecanizată MAG-M cu sârme tubulare finali (modificați de la un strat la altul și de la o poziție la alta).

Pornind de la parametrii regimurilor de sudare mecanizată MAG-M cu sârme tubulare stabiliți și prezentați în tabelul 4.7, s-a trecut la realizarea efectivă a celor patru probe sudate cap la cap (Fig. 4.17: a- PA; b- PE; c- PF; d- PC).

## 4.9. Controlul nedistructiv al probelor sudate

### 4.9.1. Controlul vizual

Toate cele patru probe sudate cap la cap, în urma controlului vizual, au fost corespunzătoare, fără defecte de suprafață.

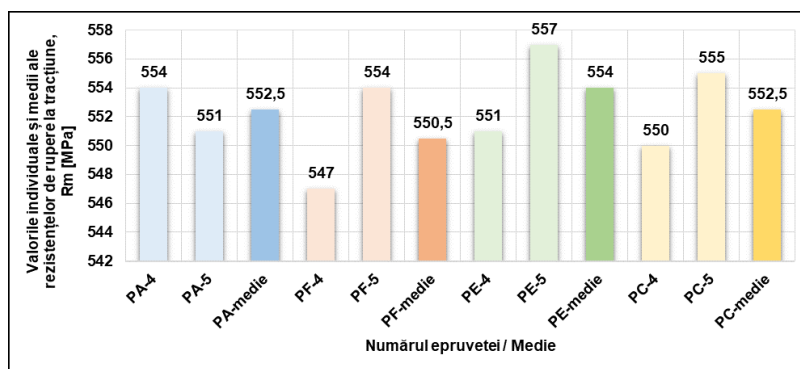
### 4.9.2. Controlul cu radiații penetrante

După efectuarea controlului radiografic cu radiații X, probele sudate au fost de bună calitate, fără defecte interioare.

## 4.10. Controlul distructiv al probelor sudate

### 4.10.1. Încercarea la tracțiune transversală

Aceste încercări mecanice de laborator, s-au realizat utilizând *mașina de tracțiune 400 KN Werkstoff Prufmaschinen*. În figura 4.23 sunt centralizate rezultatele încercărilor mecanice de laborator la tracțiune transversală.



**Fig. 4.23.** Rezultatele încercărilor mecanice de laborator la tracțiune transversală (imagine preluată din [166] și publicată în [209])

Toate cele opt epruvete plate cu porțiunea calibrată pentru încercarea la tracțiune transversală, s-au rupt în metalul de bază (rupere ductilă, fără defecte), la valori apropiate (547...554 MPa) de rezistența de rupere a materialului de bază achiziționat (553 MPa).

### 4.10.2. Încercarea la îndoire transversală frontală

Aceste încercări mecanice de laborator, s-au realizat utilizând *mașina de îndoire Werkstoff Prufmaschinen*. În tabelul 4.9 sunt centralizate rezultatele încercărilor mecanice de laborator.

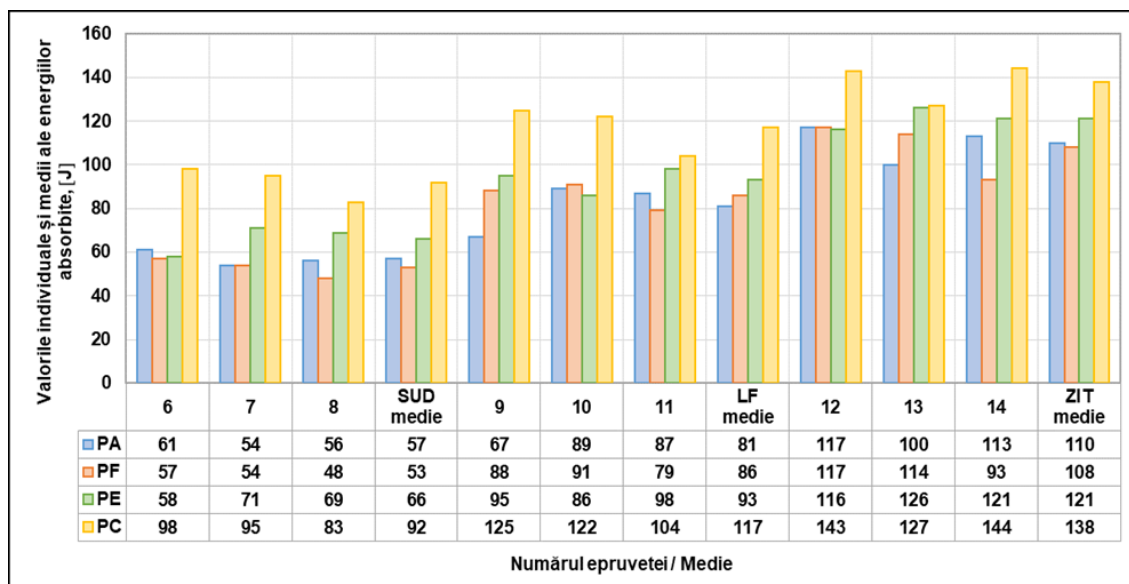
**Tabel 4.9.** Rezultatele încercărilor la îndoire transversală frontală (preluat din [166])

Nr. probă	Îndoire transversală frontală cu rădăcina comprimată (FBB)		Îndoire transversală frontală cu rădăcina întinsă (RBB)	
	Nr. epruvetă			
PA	PA-2	PA-3	PA-15	PA-16
	bună (fără defect)	bună (fără defect)	bună (fără defect)	bună (fără defect)
PF	PF-2	PF-3	PF-15	PF-16
	bună (fără defect)	bună (fără defect)	bună (fără defect)	bună (fără defect)
PE	PE-2	PE-3	PE-15	PE-16
	bună (fără defect)	bună (fără defect)	bună (fără defect)	bună (fără defect)
PC	PC-2	PC-3	PC-15	PC-16
	bună (fără defect)	bună (fără defect)	bună (fără defect)	bună (fără defect)

Rezultatele bune (fără defecte) ale acestor încercări mecanice de laborator, au confirmat lipsa defectelor în îmbinările sudate (fisuri cu lungimi peste 3 mm pe suprafața întinsă).

#### 4.10.3. Încercarea la încovoiere prin șoc KV

Încercările mecanice de laborator la încovoiere prin șoc KV, s-au realizat utilizând *ciocanul pendul Galdabini Impact 300*. În figura 4.29 sunt prezentate grafic, valorile individuale și medii ale încercărilor mecanice la încovoiere prin șoc pe epruvete Charpy V, în centrul sudurii (SUD), pe linia de fuziune (LF) și în zona influențată termomecanic (ZIT) la 2 mm de linia de fuziune (LF), la temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pentru cele patru probe sudate cap la cap (PA, PF, PE și PC).



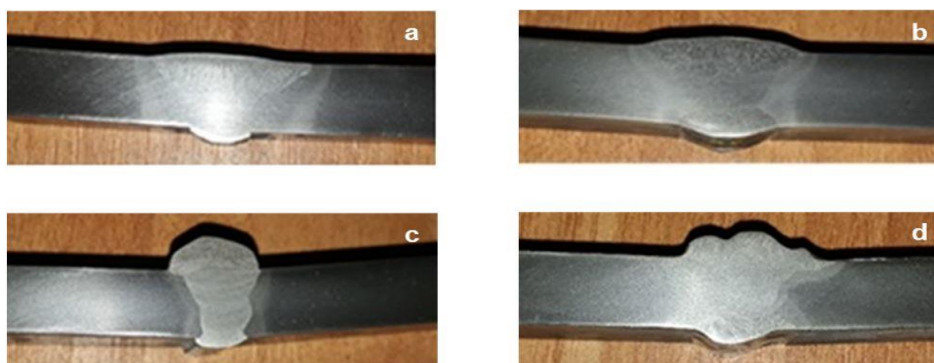
**Fig. 4.29.** Valorile individuale și medii ale încercărilor mecanice la încovoiere prin șoc pe epruvete Charpy V la temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (imagine preluată din [166] și publicată în [209, 210])

Conform regulilor registrului naval Lloyd's Register (LR), valorile încovoiierilor prin șoc pe epruvete Charpy V la temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , trebuie să fie de minim 34 J. În cazul nostru, toate valorile s-au situat peste valoarea minimă. Pentru toate probele sudate cap la cap (PA, PF, PE și PC), valorile individuale și medii au crescut în ordinea SUD-LF-ZIT la 2 mm de linia de fuziune.

#### 4.10.4. Examinarea macroscopică și microscopică

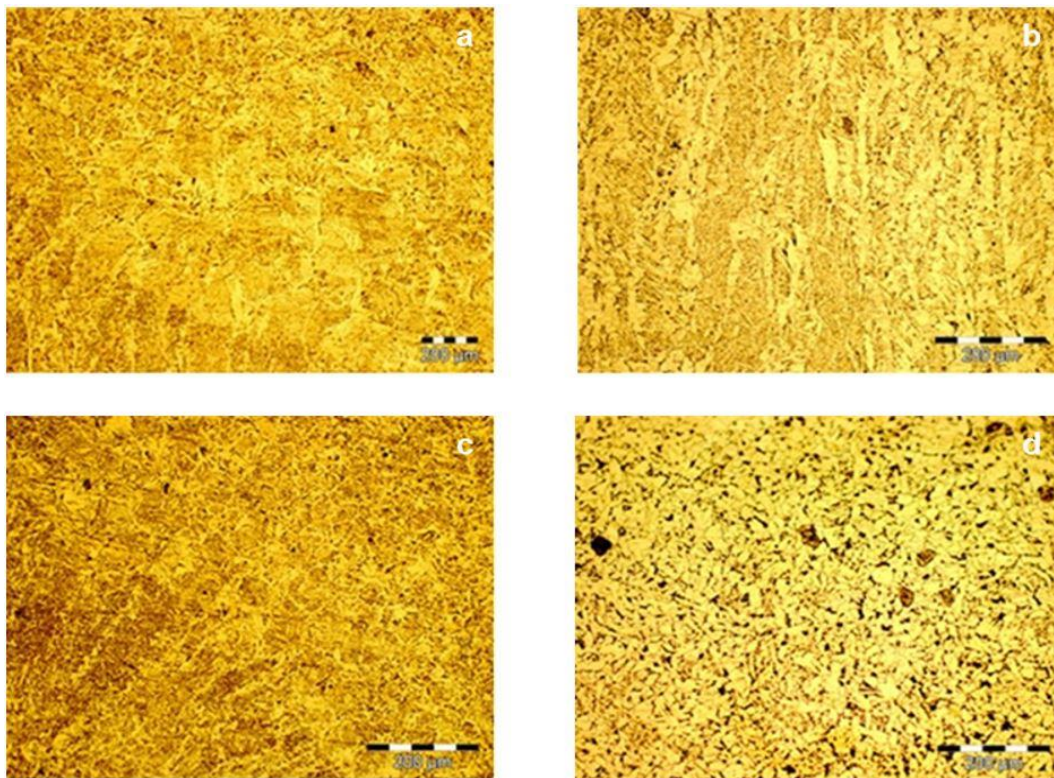
Analizele macroscopice și microscopice s-au realizat după debitarea mecanică, suprafețele frontale ale epruvetelor au fost rectificat și lustruite tot cu *mașina automată de lustruit probe metalografice LS 250V A*.

**1. Examinarea macroscopică** s-a realizat pentru fiecare din cele patru suprafețe frontale ale epruvetelor 1 prelevate din probele sudate cap la cap PA, PF, PE și PC, atacate cu reactivul Nital 10%, spălate cu apă și uscate cu aer cald, utilizând tot *microscopul metalografic Olympus GX51*. Analizele macroscopice ale epruvetelor au evidențiat clar zonele straturilor/cordoanelor depuse în rostul dintre componentele de sudat (SUD-LF-ZIT) și lipsa defectelor interioare (Fig. 4.30, a- PA-1; b- PF-1; c- PE-1; d- PC-1).



**Fig. 4.30.** Macrostructurile epruvetelor atac Nital 10% (imagine preluată din [166] și publicată în [209, 210])

**2. Examinarea microscopică** s-a realizat după un atac cu reactivul Nital 2 %, spălare cu apă și uscate cu aer cald, a acelorași suprafețe frontale ale epruvetelor, utilizând tot *microscopul metalografic Olympus GX51* dotat cu *software specializat de analiză a imaginii- AnalySIS, SN 8E20014*. În figura 4.31 sunt prezentate microstructurile ZIT și SUD (strat final și strat de rădăcină), pentru proba sudată cap la cap în poziția orizontal PA (a- ZIT strat final, mărire 100x; b- SUD strat final, mărire 200x; c- ZIT strat de rădăcină, mărire 200x; d- SUD strat de rădăcină, mărire 200x).

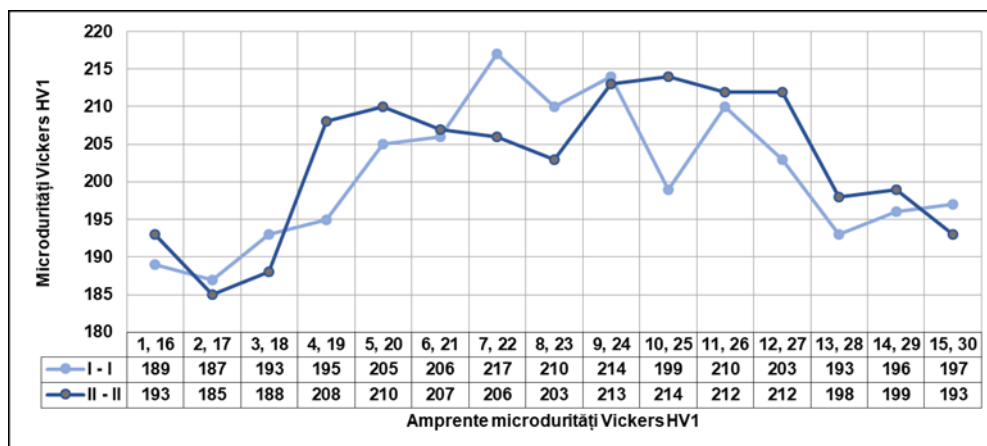


**Fig. 4.31.** Microstructuri PA-1 (imagine preluată din [166])

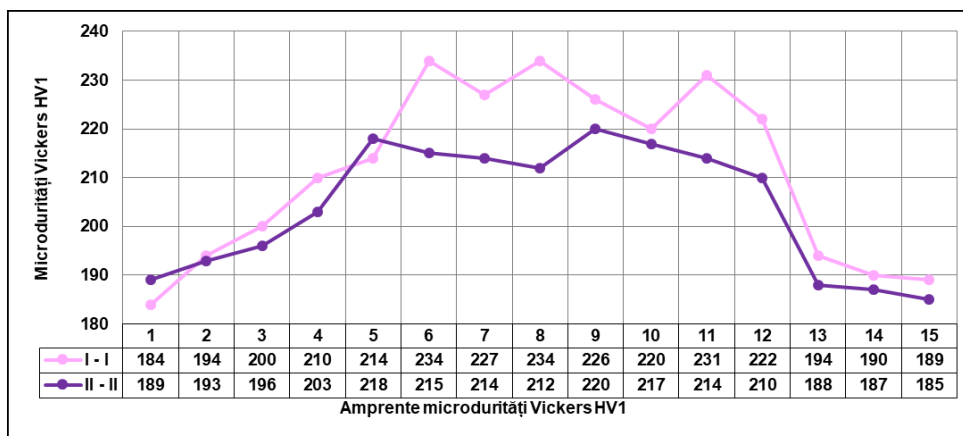
Din analizele microscopice s-au constatat aceleași microstructuri în cele patru zone analizate indiferent de poziția de sudare

#### 4.10.5. Încercarea de microduritate Vickers HV1

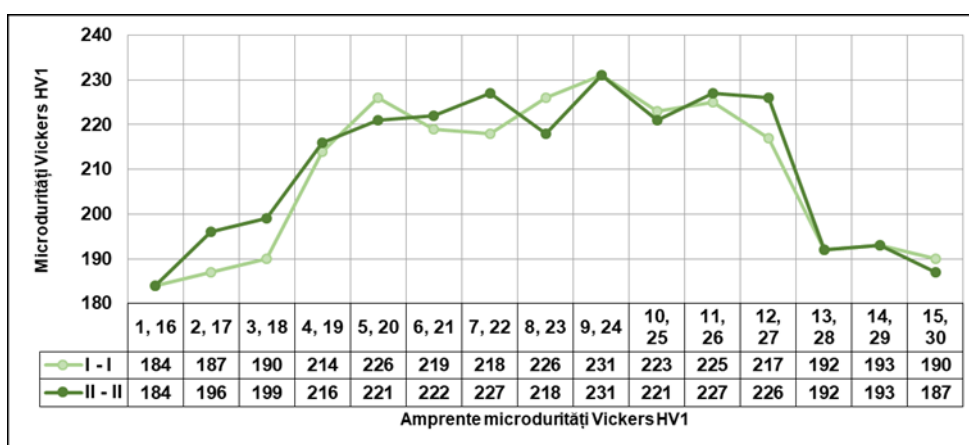
Determinările s-au realizat folosind tot *durimetrul Shimadzu HMV 2TE*, cu forța aplicată de 1 N și timpul de măsurare de 10 s. În figurile 4.35...4.38 sunt prezentate variațiile microdurităților Vickers HV1 pentru cele patru epruvete în zonele îmbinărilor sudate pe direcțiile de investigare I-I și II-II.



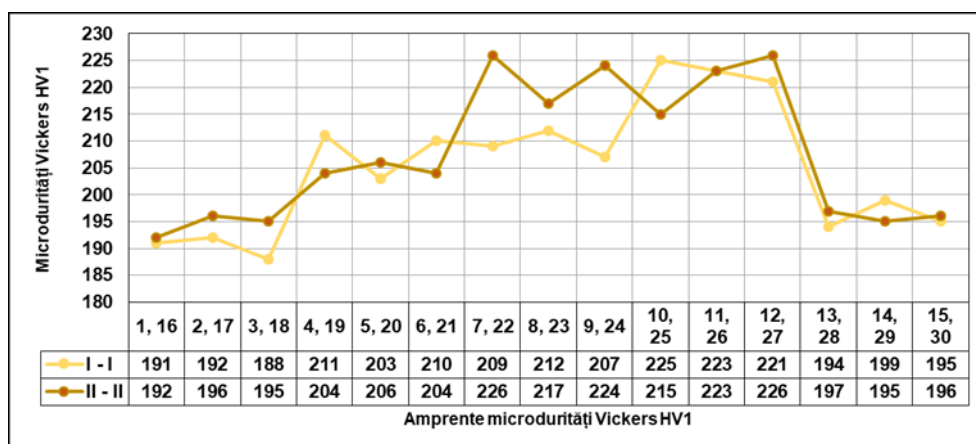
**Fig. 4.35.** Variațiile microdurităților Vickers HV1 pentru epruveta PA-1 (imagine preluată și prelucrată din [166])



**Fig. 4.36.** Variațiile microdurităților Vickers HV1 pentru epruveta PF-1 (imagine preluată și prelucrată din [166])



**Fig. 4.37.** Variațiile microdurităților Vickers HV1 pentru epruveta PE-1 (imagine preluată și prelucrată din [166])



**Fig. 4.38.** Variațiile microdurităților Vickers HV1 pentru epruveta PC-1 (imagine preluată și prelucrată din [166])

Din figuri observăm că valorile sunt maxime pe direcția de investigație I-I amplasată în stratul final și că valorile sunt minime pe direcția de investigație II-II amplasată în stratul de rădăcină, tratat termic de straturile de umplere și finale. Indiferent de poziția de sudare, valorile microdurităților Vickers HV1 au fost maxime în SUD. Conform Regulilor Registrului Naval LR, valorile microdurităților Vickers HV1 în ZIT și în SUD, trebuie să fie sub valoarea de 350 HV1. Valorile microdurităților Vickers HV1 s-au situat cu mult sub valoarea maximă impusă, cu valori maxime în SUD.

## CAPITOLUL 5

### CERCETĂRI PRIVIND ANALIZELE FEM ȘI EXPERIMENTALE ALE TENSIUNILOR ȘI DEFORMAȚIILOR LA SUDAREA CAP LA CAP MAG-M

#### 5.1. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare

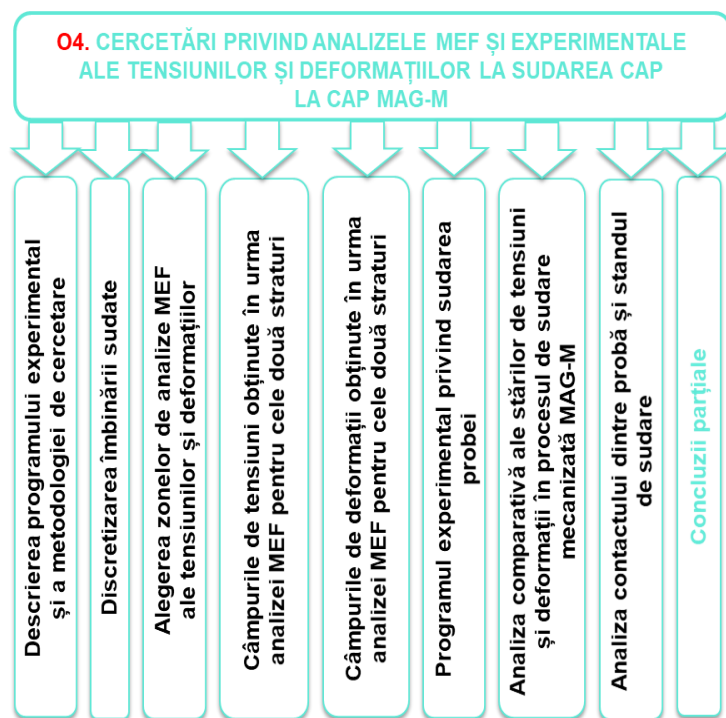


Fig. 5.1. Etapele parcurse în cadrul obiectivului O4 al tezei de doctorat

În acest capitol, în cadrul obiectivului O4 al tezei de doctorat, *Cercetări privind analizele FEM și experimentale ale tensiunilor și deformațiilor la sudarea cap la cap MAG-M* s-au parcurs 9 etape, prezentate detaliat în figura 5.1.

#### 5.2. Discretizarea îmbinării sudate

Discretizarea probei sudate a condus la un număr de:

- 33.750 noduri și 26.224 elemente pentru fiecare din cele două plăci (table) supuse procesului de sudare;
- 4.720 noduri și 2.820 elemente pentru stratul 1 de rădăcină;
- 11.564 noduri și 8.225 elemente pentru stratul 2 final.

#### 5.3. Alegerea zonelor de analize MEF ale tensiunilor și deformațiilor

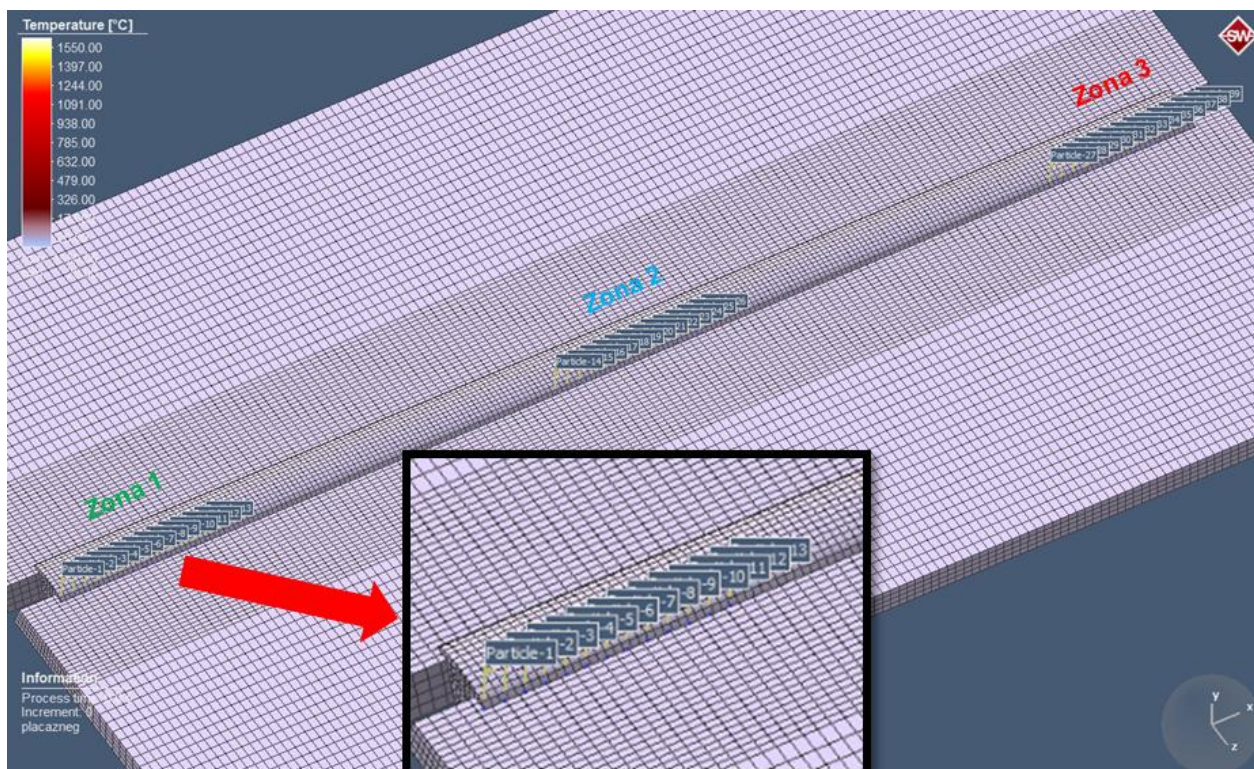
##### 5.3.1. Alegerea zonelor de analize MEF pe direcția longitudinală a îmbinării sudate

În sens longitudinal (de-a lungul îmbinării sudate) s-au ales trei zone: începutul îmbinării sudate, mijlocul îmbinării sudate și sfârșit îmbinării sudate, acestea sunt în lungime de 60 mm, distanța între cele 13 puncte (particule) fiind de 5 mm (Fig. 5.10). Cotele punctelor (particulelor) unde s-au realizat analizele MEF în lungul îmbinării sudate sunt prezentate centralizat în tabelul 5.1.

După cum se poate observa, punctele (particulele) sunt alese în zona 1 de început (zona galbenă, particule 1...13), zona 2 centru (zona albastră, particule 14...26) și zona 3 de sfârșit a procesului de sudare (zona portocaliu, particule 27...39).

##### 5.3.2. Alegerea zonelor de analize MEF pe direcția transversală a îmbinării sudate

În sens transversal s-au ales tot trei zone, dar cu câte șase puncte (particule) situate la distanța tot de 5 mm unul față de celălalt, zona 1 începutul procesului de sudare (zona galbenă, particule 7, 40...44), zona 2 centrală (zona albastră, particule 20, 45...49) și zona 3 de sfârșit a procesului de sudare (zona portocaliu, particule 33, 50...54), la suprafața probei (Fig. 5.11).



**Fig. 5.10.** Amplasarea punctelor (particulelor) dispuse în lungul îmbinării sudate

**Tabel 5.1.** Cotele punctelor (particulelor) dispuse în lungul îmbinării sudate

Coord., [m]	x	y	z	Coord., [m]	x	y	z	Coord., [m]	x	y	z
Zona/part	Zona 1			Zona/part	Zona 2			Zona/part	Zona 3		
Particle-1	0.015	0.010	0.010	Particle-14	0.220	0.010	0.010	Particle-27	0.425	0.010	0.010
Particle-2	0.020	0.010	0.010	Particle-15	0.225	0.010	0.010	Particle-28	0.430	0.010	0.010
Particle-3	0.025	0.010	0.010	Particle-16	0.230	0.010	0.010	Particle-29	0.435	0.010	0.010
Particle-4	0.030	0.010	0.010	Particle-17	0.235	0.010	0.010	Particle-30	0.440	0.010	0.010
Particle-5	0.035	0.010	0.010	Particle-18	0.240	0.010	0.010	Particle-31	0.445	0.010	0.010
Particle-6	0.040	0.010	0.010	Particle-19	0.245	0.010	0.010	Particle-32	0.450	0.010	0.010
Particle-7	0.045	0.010	0.010	Particle-20	0.250	0.010	0.010	Particle-33	0.455	0.010	0.010
Particle-8	0.050	0.010	0.010	Particle-21	0.255	0.010	0.010	Particle-34	0.460	0.010	0.010
Particle-9	0.055	0.010	0.010	Particle-22	0.260	0.010	0.010	Particle-35	0.465	0.010	0.010
Particle-10	0.060	0.010	0.010	Particle-23	0.265	0.010	0.010	Particle-36	0.470	0.010	0.010
Particle-11	0.065	0.010	0.010	Particle-24	0.270	0.010	0.010	Particle-37	0.475	0.010	0.010
Particle-12	0.070	0.010	0.010	Particle-25	0.275	0.010	0.010	Particle-38	0.480	0.010	0.010
Particle-13	0.075	0.010	0.010	Particle-26	0.280	0.010	0.010	Particle-39	0.485	0.010	0.010

Cotele punctelor (particulelor) unde s-au realizat analizele MEF perpendicular pe îmbinarea sudată sunt prezentate centralizat în tabelul 5.2.

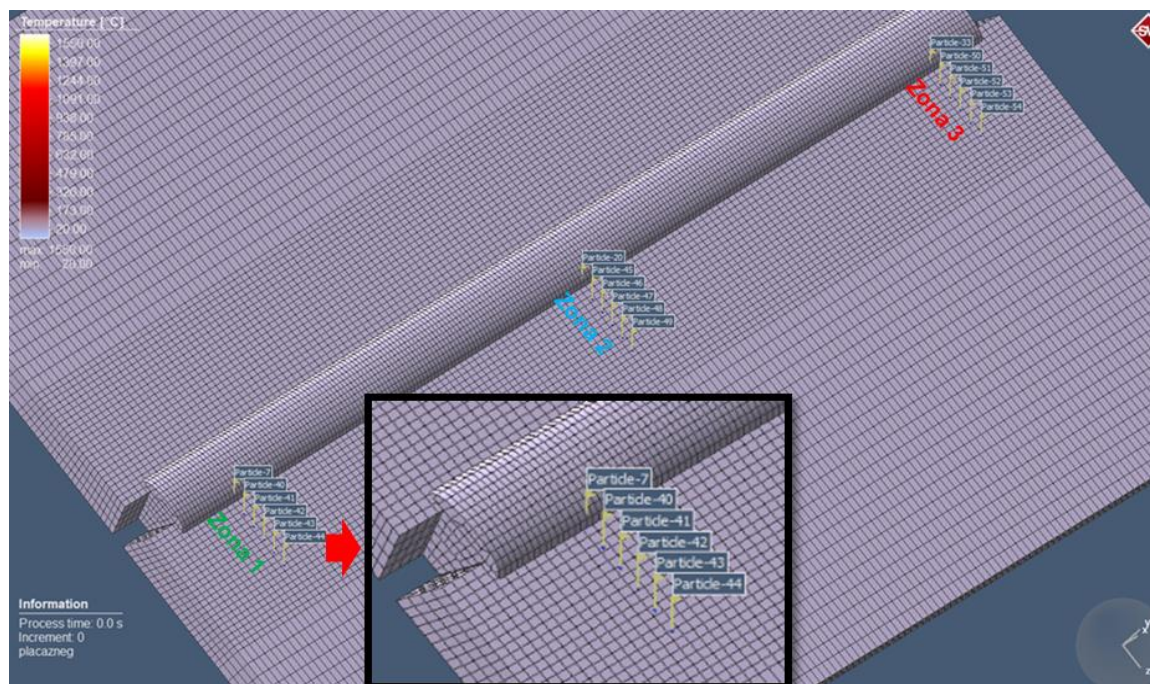


Fig. 5.11. Amplasarea punctelor (particulelor) dispuse perpendicular pe axa îmbinării sudate

Tabel 5.2. Cotele punctelor (particulelor) dispuse perpendicular pe îmbinarea sudată

Coord., [m]	x	y	z	Coord., [m]	x	y	z	Coord., [m]	x	y	z
Zona/part	Zona 1			Zona/part	Zona 2			Zona/part	Zona 3		
Particle -7	0.045	0.010	0.010	Particle -20	0.250	0.010	0.010	Particle -33	0.455	0.010	0.010
Particle -40	0.045	0.010	0.015	Particle -45	0.250	0.010	0.015	Particle -50	0.455	0.010	0.015
Particle -41	0.045	0.010	0.020	Particle -46	0.250	0.010	0.020	Particle -51	0.455	0.010	0.020
Particle -42	0.045	0.010	0.025	Particle -47	0.250	0.010	0.025	Particle -52	0.455	0.010	0.025
Particle -43	0.045	0.010	0.030	Particle -48	0.250	0.010	0.030	Particle -53	0.455	0.010	0.030
Particle -44	0.045	0.010	0.035	Particle -49	0.250	0.010	0.035	Particle -54	0.455	0.010	0.035

## 5.6. Programul experimental privind sudarea probei

### 5.6.1. Materiale și echipamente pentru sudare

În cadrul programului experimental privind analizele câmpurilor termice și a tensiunilor la sudarea mecanizată MAG-M în poziția orizontal (PA), s-au utilizat următoarele materiale de bază, de adaos și auxiliare:

➤ două table din oțel naval EH 36 cu dimensiunile 500 x 150 x 10 mm, în conformitate cu Regulile Lloyd's Register (LR); compoziția chimică și caracteristicile mecanice ale tablelor din oțel naval EH 36 sunt prezentate în tabelele 2.1 și 2.2, (Raport Științific nr. 2) [166].

➤ două sârme tubulare: cu pulberi metalice E70C-6MH4 conform AWS A5.18 și cu flux rutilic E81T1-Ni1MJH4 conform AWS A5.29. Sârmele tubulare au avut diametrele de 1,2 mm și compozițiile chimice și caracteristicile mecanice conform tabelor 2.3 și 2.4, (Raport Științific nr. 2) [166].

➤ amestec de gaze de protecție activ M21 (Corgon 18 - 82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>);

➤ suport ceramic plat pe bandă de aluminiu auto-adezivă cu canal concav.



### 5.6.2. Proiectarea, realizarea și experimentarea standului pentru analizele câmpurilor termice și a tensiunilor

Pentru analizele câmpurilor termice și a tensiunilor la sudarea mecanizată MAG-M cu sârme tubulare în poziția orizontal (PA), a fost proiectat, realizat și experimentat standul prezentat schematic în figura 5.15, din cadrul *Centrului de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (SUDAV)*, *Departamentul Ingineria Fabricației, Facultatea de Inginerie, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați*.

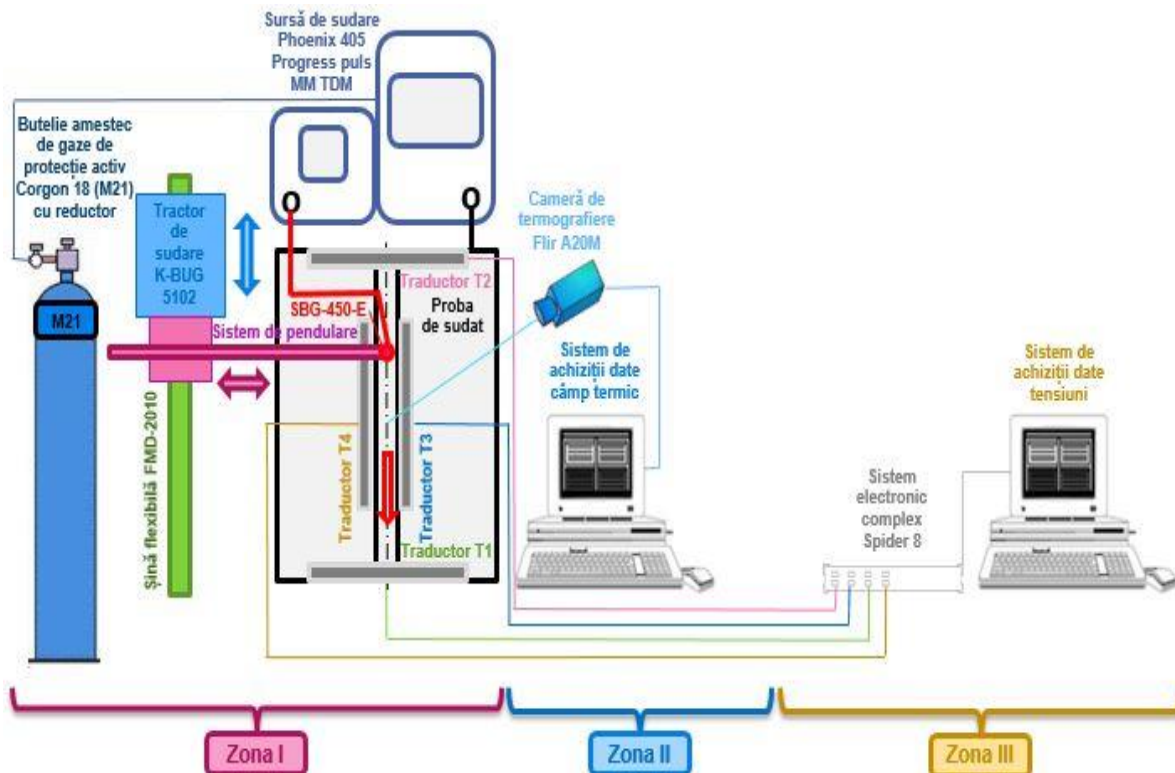


Fig. 5.15. Schema standului pentru analizele câmpurilor termice și a tensiunilor

### 5.6.3. Realizarea și etalonarea traductoarelor pentru măsurarea tensiunilor

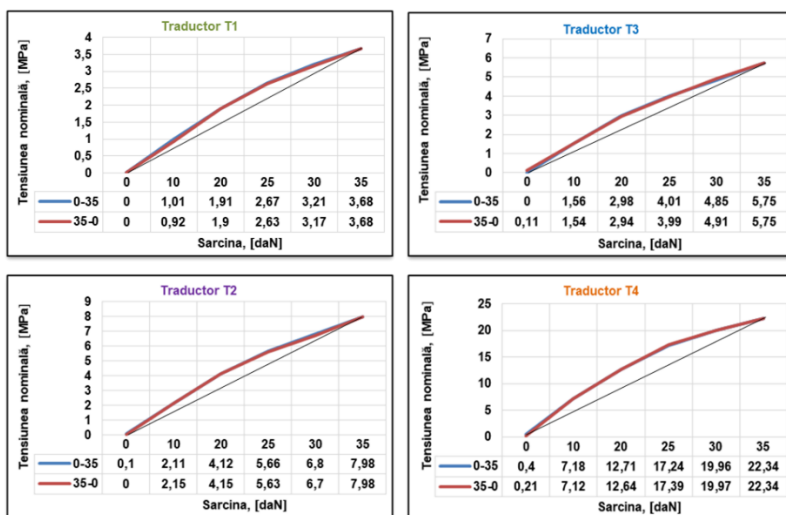
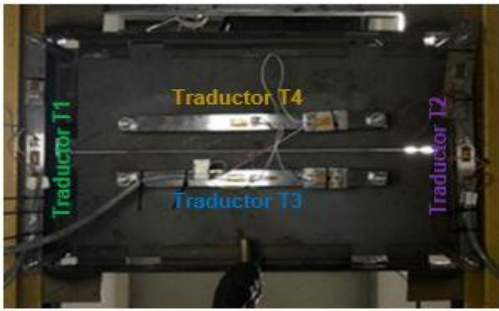


Fig. 5.20. Graficele de etalonare obținute pentru cele patru traductoare T1...T4

tensometrică Hottinger ( $r = 120 \Omega$ ,  $l_0 = 10 \text{ mm}$ ).

Realizarea și etalonarea traductoarelor pentru măsurarea tensiunilor s-a realizat în cadrul *Laboratorului de Dezvoltare Procese și Tehnologii de Sudare prin Topire (LDPTST) din Centrul de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (SUDAV)*, *Departamentul Ingineria Fabricației, Facultatea de Inginerie, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați*. Pentru determinarea tensiunilor la sudarea mecanizată MAG-M, au fost realizate 4 traductoare de tensiuni și patru compensatoare (rezultatele etalonărilor fiind prezentate în Fig. 5.20) pe care s-au aplicat pe centru prin lipire cu adeziv Z70, câte o marcă



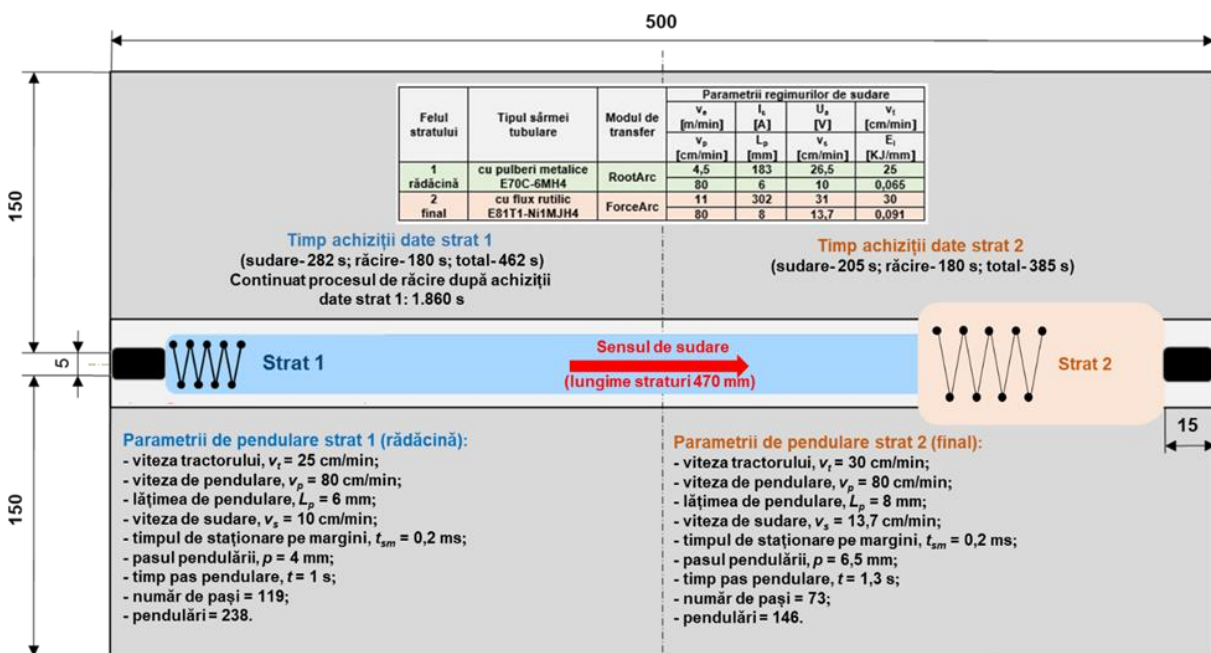
**Fig. 5.22.** Modul de amplasare a traductoarelor (preluare și prelucrare din [219])

După introducerea probei în rama suport probă, s-au fixat cele patru traductoare, T1, T2 în plan transversal și T3, T4 în plan longitudinal, sub proba pregătită pentru sudare, cu ajutorul a câte două prezoane filetate, la distanța de 80 mm și s-au conectat la sistemul electronic complex Spider 8 (Fig. 5.22).

**5.6.4. Realizarea probei sudate cap la cap**

Sudarea probei s-a realizat în cadrul Laboratorului de Dezvoltare Procese și Tehnologii de Sudare prin Topire (LDPTST) din Centrul de Cercetări Avansate în Domeniul Sudării (SUDAV), Departamentul Ingineria Fabricației, Facultatea de Inginerie, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați.

Modurile de pendulare și de depunere a celor două straturi, ambele în lungime de 470 mm, în rostul dintre componentele de sudat, sunt ilustrate în figura 5.23.



**Fig. 5.23.** Modurile de pendulare și de depunere a celor două straturi

Pentru achiziționarea datelor privind evoluțiile tensiunilor, s-a folosit sistemul electronic complex Spider 8 (Fig. 5.29).



**Fig. 5.29.** Sistem electronic complex Spider 8 (preluare din [223])



**Fig. 5.30.** Echipamentul pentru achizițiile de date ale tensiunilor (preluare din [223])

În figura 5.30 este prezentat echipamentul pentru achizițiile de date ale tensiunilor. Achizițiile de date rezultate din măsurătorile tensometrice s-au desfășurat pe durate a 42 s, aceasta fiind capacitatea maximă de stocare a informației pentru un echipament de calcul uzual. Achiziția s-a realizat de la începutul până la sfârșitul procesului de sudare, cu pauzele corespunzătoare pentru salvarea datelor și reînceperea măsurătorilor. Urmare măsurătorilor efectuate, datele achiziționate de la cele patru traductoare rezistive (T1...T4) și prelucrate, sunt prezentate sub formă de grafice pentru diverși timpi și direcții de analiză (longitudinal - axa x, transversal - axa z și pe grosimea probei - axa y).

## 5.7. Analiza comparativă ale stărilor de tensiuni și deformații în procesul de sudare mecanizată MAG-M

Analizele stărilor de tensiuni și deformații care apar în procesul de sudare mecanizată MAG-M se vor efectua pe cele trei zone de analiză (zona 1 de început a procesului de sudare, zona 2 centrală și zona 3 de sfârșit a procesului de sudare), în funcție de timp, realizându-se o corelație între timpii din MEF și cei din experiment. Datorită faptului că durata fiecărei achiziții a fost limitată la eşantioane de 42 s, comparațiile se vor efectua pentru acest interval de timp. Trebuie menționat faptul că, se vor putea efectua comparații între rezultatele MEF și experimentale, atunci când traductoarele tensometrice sunt montate pe o anumită direcție, după cum urmează: zona 1 pe direcția axei z; zona 2 pe direcția axei x și zona 3 pe direcția axei z. Deci, la analizele pe zonele respective, se vor putea realiza comparații între MEF și experimental numai pe direcția pe care sunt montate traductoare.

### 5.7.1. Analizele MEF și experimental ale stărilor de tensiuni normale pe cele trei zone de analiză

#### 5.7.1.1. Analizele MEF și experimentale ale stărilor de tensiuni normale în zona 1 de început a procesului de sudare

#### 2. Analizele MEF ale stărilor de tensiuni normale după axa z (perpendicular pe îmbinarea sudată)

Variațiile tensiunilor normale după axa z obținute prin MEF, pentru sudarea și răcirea stratului 1 de rădăcină și 2 final pe intervalul de timp de la începerea sudării stratului 1 de rădăcină și până la sfârșitul perioadei de achiziție a datelor sunt prezentate în figura 5.33 (punctele/particulele 7, 40...44): a- perioada de achiziție a datelor în intervalul de timp 0...812 s; b- sudarea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 0...282 s; c- răcirea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 282...462 s; d- sudarea și răcirea stratului 2 final în intervalul de timp 462...812 s.

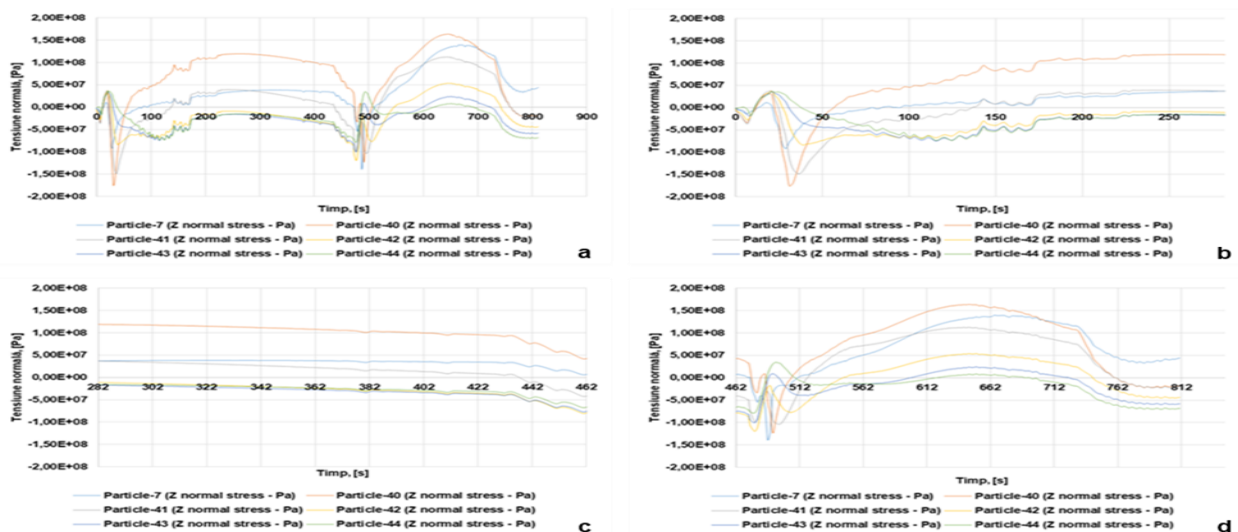
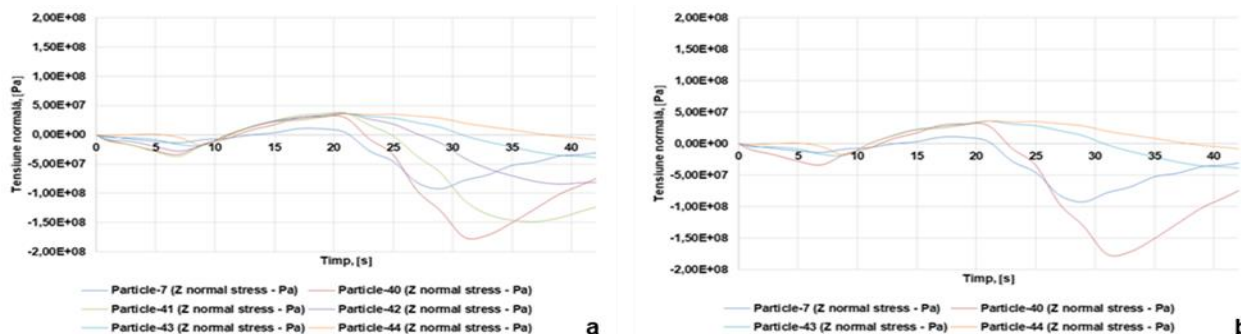


Fig. 5.33. Variațiile tensiunilor normale după axa z în timpul proceselor de sudare/răcire a ambelor straturi (zona 1)

Variațiile tensiunilor normale după axa z la începutul procesului de sudare a stratului 1 de rădăcină, pentru primele 42 de s, sunt prezentate în figura 5.34: a- punctele/particulele 7, 40...44; b- detaliu punctele/particulele 7, 40, 43 și 44.



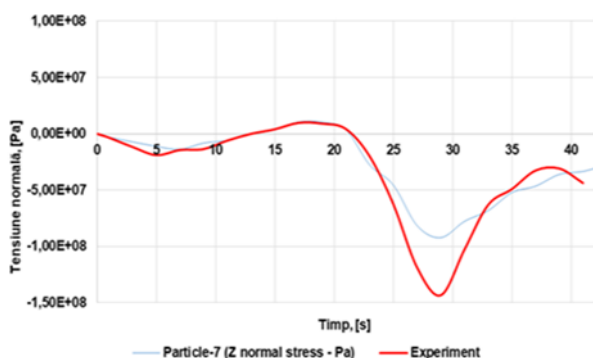
**Fig. 5.34.** Variațiile tensiunilor normale după axa z în intervalul de timp 0...42 s (zona 1)

Din analiza datelor furnizate de programul MEF rezultă pentru tensiunile normale pe direcția axei z valorile extreme prezentate în tabelul 5.7.

**Tabel 5.7.** Tensiuni normale extreme pe direcția axei z (zona 1)

Stratul	Etapă	Punctul/ Particula	Tensiunea normală maximă, [Pa]	Punctul/ Particula	Tensiunea normală minimă, [Pa]
1	Sudare (282 s)	40	1.20E+08	40	-1.75E+08
	Răcire (180 s)	40	1.19E+08	42	-8.06E+07
2	Sudare (205 s)	40	1.64E+08	7	-1.39E+08
	Răcire (180 s)				

Din analiza datelor din tabelul 5.7 se poate observa că tensiunile normale maxime pe direcția axei z se înregistrează tot în imediata vecinătate a cordonului de sudură, unde, tot din cauza dilatărilor cauzate de temperaturile mari, straturile învecinate se opun determinând o creștere a tensiunilor normale.



**Fig. 5.35.** Variațiile tensiunilor normale după axa z în intervalul de timp 0...42 s MEF și experimental (zona 1)

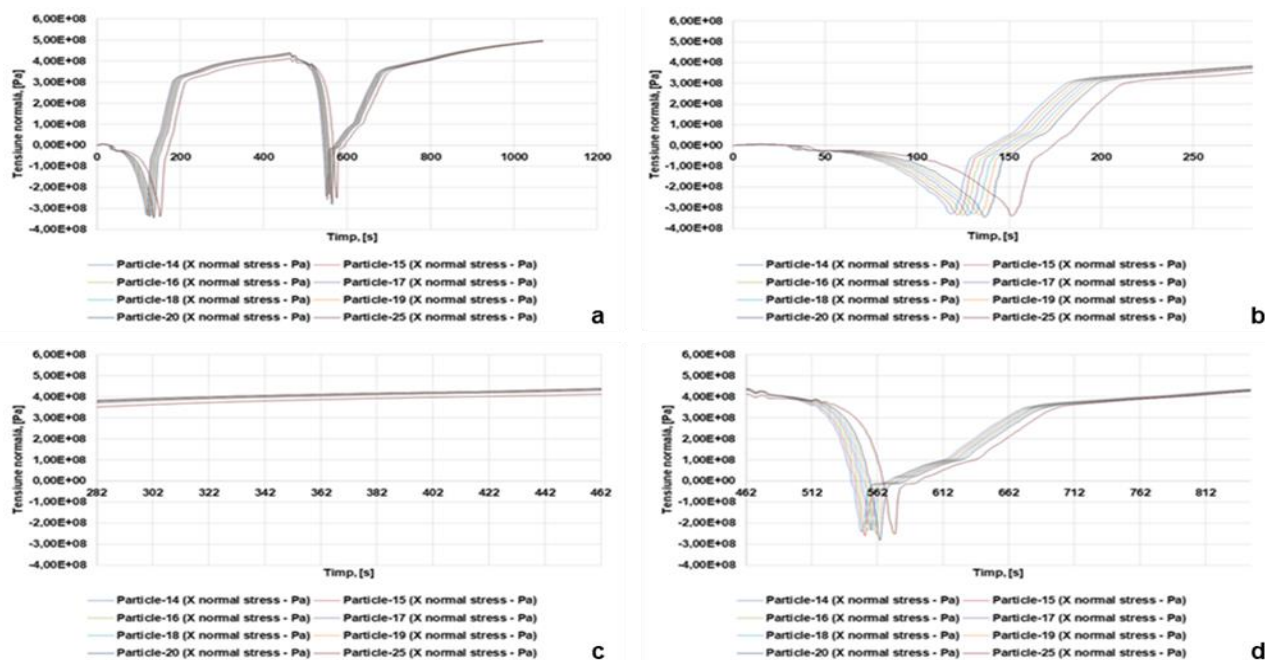
Variațiile tensiunilor normale după axa z în intervalul de timp 0...42 s determinate MEF (pentru punctul/particula 7) suprapus peste experimental (existența traductorului T1) sunt prezentate în figura 5.35. Analizând comparativ acest grafic (care redă variația tensiunilor normale pe direcția axei z prin MEF pentru punctul/particula 7) cu graficul de variație a tensiunilor normale determinată experimental și folosind coeficientul de transformare a semnalului achiziționat în tensiuni cunoscut din tensometria electrică rezistivă, se poate observa o anumită similitudine *calitativă* între rezultatele obținute.

### 5.7.1.2. Analizele MEF și experimentale ale stărilor de tensiuni normale în zona 2 centrală

#### 1. Analizele MEF ale stărilor de tensiuni normale după axa x (în axa îmbinării sudate în sensul de sudare)

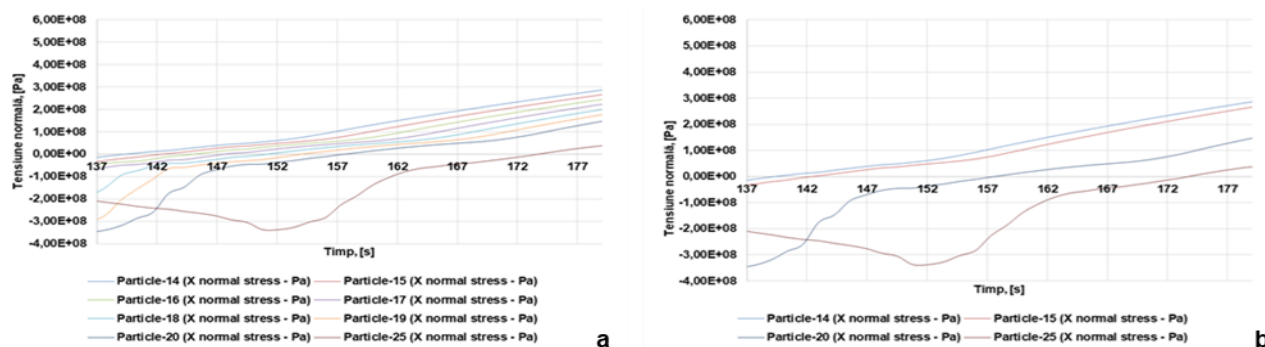
Variațiile tensiunilor normale după axa x obținute prin MEF, pentru sudarea și răcirea straturilor 1 de rădăcină și 2 final, sunt prezentate în figura 5.38 (punctele/particulele 14...20, 25): a-

perioada de achiziție a datelor în intervalul de timp 0...846 s; b- sudarea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 0...282 s; c- răcirea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 282...462 s; d- sudarea și răcirea stratului 2 final în intervalul de timp 462...846 s.



**Fig. 5.38.** Variațiile tensiunilor normale după axa x în timpul proceselor de sudare/răcire a ambelor straturi (zona 2)

Variațiile tensiunilor normale după axa x în zona centrală a procesului de sudare a stratului 1 de rădăcină, în intervalul de timp 137...179 s, sunt prezentate în figura 5.39: a- punctele/particulele 14...20, 25; b- detaliu punctele/particulele 14, 15, 20 și 25.



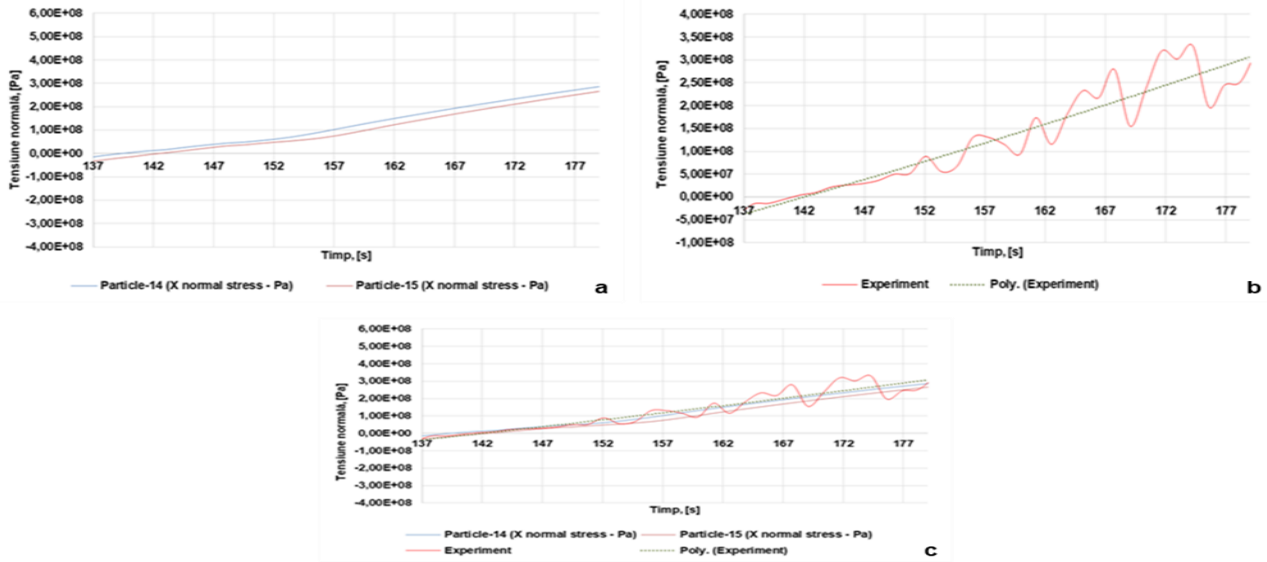
**Fig. 5.39.** Variațiile tensiunilor normale după axa x în intervalul de timp 137...179 s (zona 2)

Din analiza datelor furnizate de programul MEF rezultă pentru tensiunile normale pe direcția axei x valorile extreme prezentate în tabelul 5.10.

**Tabel. 5.10.** Tensiuni normale extreme pe direcția axei x (zona 2)

Stratul	Etapa	Punctul/ Particula	Tensiunea normală maximă, [Pa]	Punctul/ Particula	Tensiunea normală minimă, [Pa]
1	Sudare (282 s)	14	3.85E+08	20	-3.46E+08
	Răcire (180 s)	14	4.41E+08	25	3.52E+08
2	Sudare (205 s)	14	4.40E+08	20	-2.79E+08
	Răcire (180 s)				

Din analiza datelor din tabelul 5.10 se poate observa că tensiunile normale maxime pe direcția axei x se înregistrează tot în imediata vecinătate a cordonului de sudură, unde, tot din cauza dilatărilor cauzate de temperaturile mari, straturile învecinate se opun determinând o creștere a tensiunilor normale. Variațiile tensiunilor normale după axa x obținute prin MEF, pentru sudarea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 137...179 s, la trecere arcului electric de sudare prin zona centrală 2, sunt prezentate în figura 5.40: a- MEF punctele/particulele 14 și 15; b- experimental și medie; c- MEF punctele/particulele 14 și 15, experimental și medie.



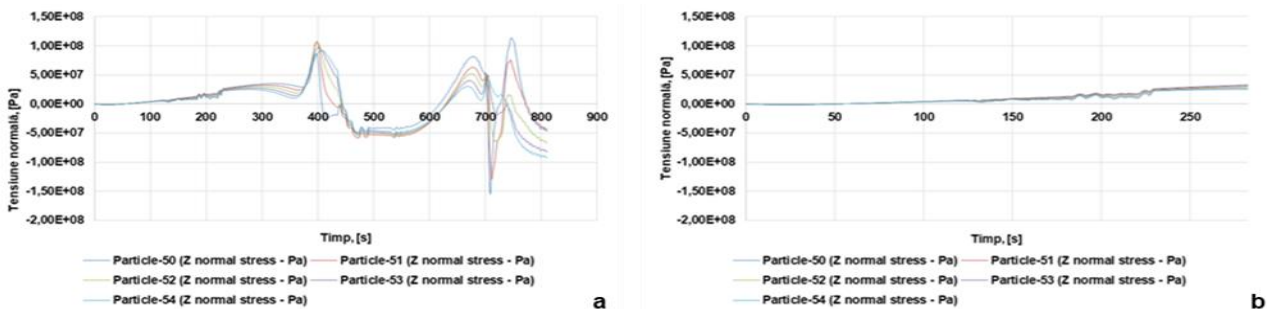
**Fig. 5.40.** Variațiile tensiunilor normale după axa x în intervalul de timp 137...179 s (zona 2)

Analizând comparativ graficele din figura 5.40 (care redă variația tensiunilor normale pe direcția axei x prin MEF pentru punctele/particulele 14 și 15) cu graficul de variație a tensiunilor normale determinată experimental și folosind coeficientul de transformare de la traductoarele T3 și T4 la probă, se poate observa o anumită similitudine *calitativă* între rezultatele obținute.

**5.7.1.3. Analizele MEF și experimentale ale stărilor de tensiuni normale în zona 3 de sfârșit a procesului de sudare**

**2. Analizele MEF ale stărilor de tensiuni normale după axa z (perpendicular pe îmbinarea sudată)**

Variațiile tensiunilor normale după axa z obținute prin MEF, pentru sudarea și răcirea straturilor 1 de rădăcină și 2 final pe intervalul de timp de la începerea sudării stratului 1 de rădăcină și până la sfârșitul perioadei de achiziție a datelor sunt prezentate în figura 5.47 (punctele/particulele 50...54): a- perioada de achiziție a datelor în intervalul de timp 0...846 s; b- sudarea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 0...282 s; c- răcirea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 282...462 s; d- sudarea și răcirea stratului 2 final în intervalul de timp 462...846 s.



**Fig. 5.47.** Variațiile tensiunilor normale după axa z în timpul proceselor de sudare/răcire a ambelor straturi (zona 3)

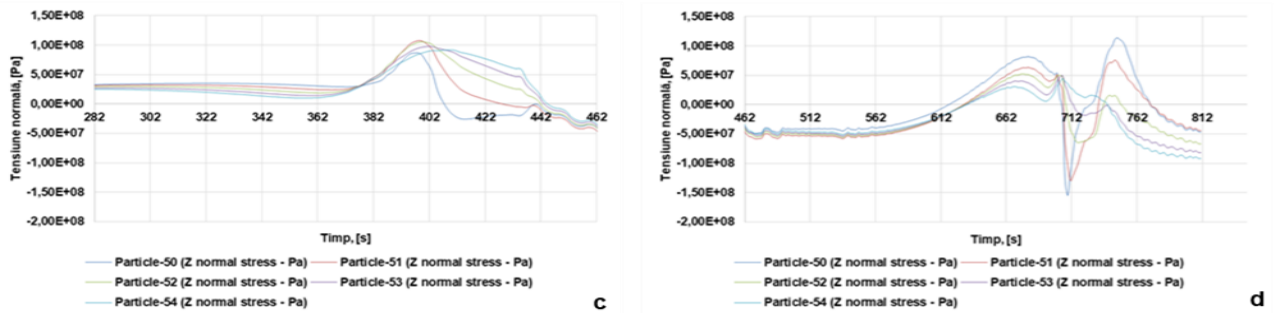


Fig. 5.47. Continuare

Variațiile tensiunilor normale după axa z la începutul procesului de sudare a stratului 1 de rădăcină, pentru ultimele 42 s (240...282), sunt prezentate în figura 5.48: a- punctele/particulele 50...54; b- detaliu punctele/particulele 50 și 54.

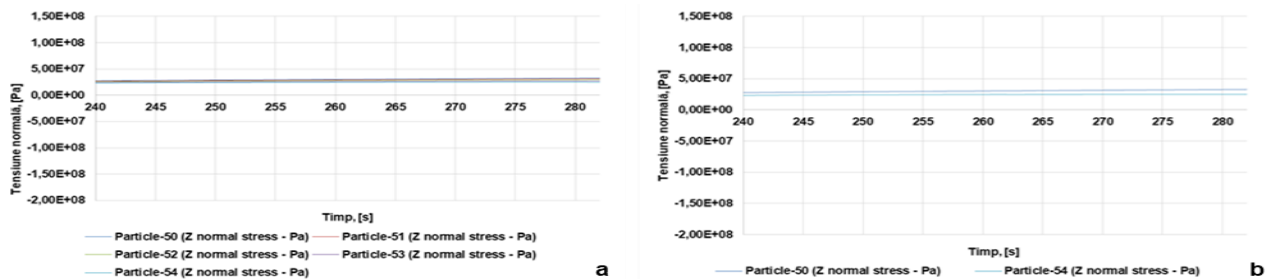


Fig. 5.48. Variațiile tensiunilor normale după axa z în intervalul de timp 240...282 s (zona 3)

Din analiza datelor furnizate de programul MEF rezultă pentru tensiunile normale pe direcția axei z valorile extreme prezentate în tabelul 5.15.

Tabel 5.15. Tensiuni normale extreme pe direcția axei z (zona 3)

Stratul	Etapa	Punctul/ Particula	Tensiunea normală maximă, [Pa]	Punctul/ Particula	Tensiunea normală minimă, [Pa]
1	Sudare (282 s)	50	3.30E+07	50	-1.25E+06
	Răcire (180 s)	50	1.08E+08	51	-4.95E+07
2	Sudare (205 s)	50	1.14E+08	50	-1.55E+08
	Răcire (180 s)				

Din analiza datelor din tabelul 5.15 se poate observa că tensiunile normale maxime pe direcția axei z se înregistrează tot în imediata vecinătate a cordonului de sudură, unde, tot din cauza dilatărilor cauzate de temperaturile mari, straturile învecinate se opun determinând o creștere a tensiunilor normale.

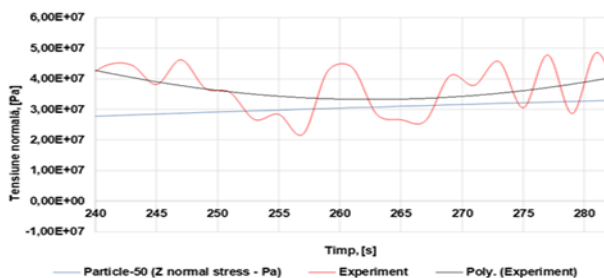


Fig. 5.49. Variațiile tensiunilor normale după axa z în intervalul de timp 240...282 s MEF și experimental (zona 3)

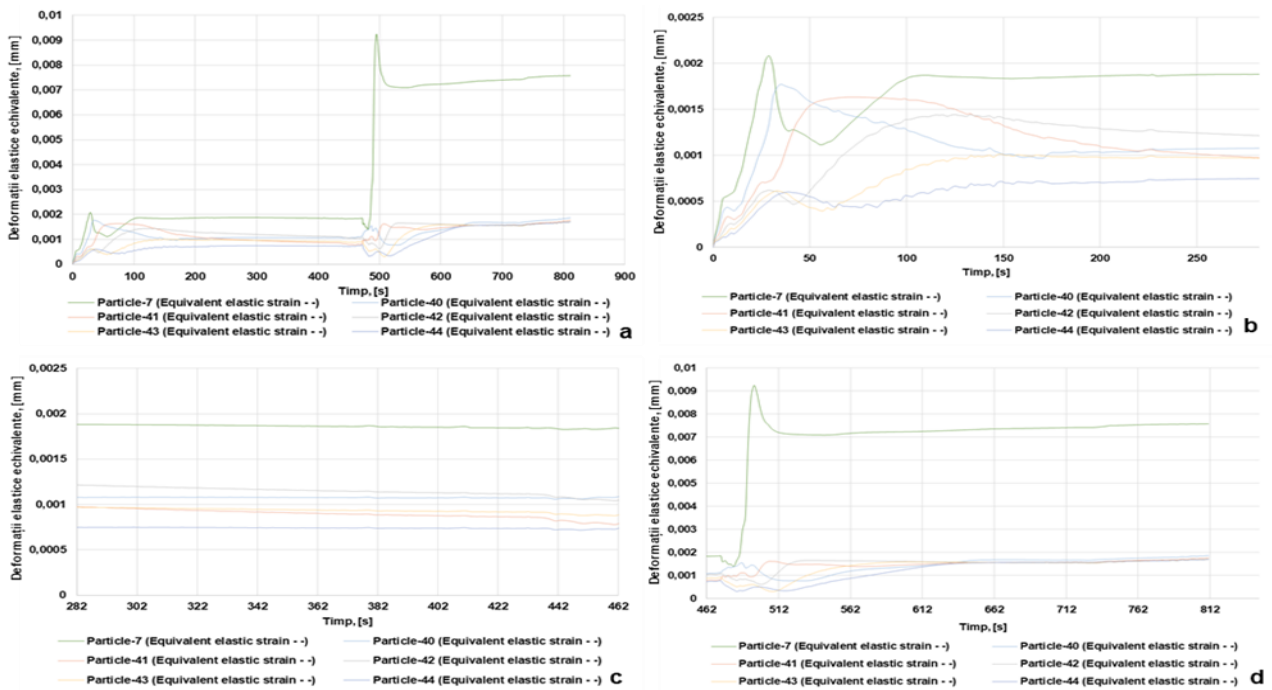
Variațiile tensiunilor normale după axa z în intervalul de timp 0...42 s determinate MEF (pentru punctul/particula 50) suprapus peste experimental (existența traductorului T2) sunt prezentate în figura 5.49. Analizând comparativ graficul din figura 5.49 (care redă variația tensiunilor normale pe direcția axei z prin MEF pentru punctul/particula 50) cu graficul de variație a tensiunilor normale determinată experimental și folosind coeficientul de transformare de la traductorul T2 la probă, se poate observa o anumită similitudine *calitativă* între rezultatele obținute.

**5.7.2. Analizele stărilor de deformații plastice efective și de deformații elastice echivalente pe cele trei zone de analiză**

**5.7.2.1. Analizele stărilor de deformații plastice efective și de deformații elastice echivalente în zona 1 (de început) a cordonului de sudură**

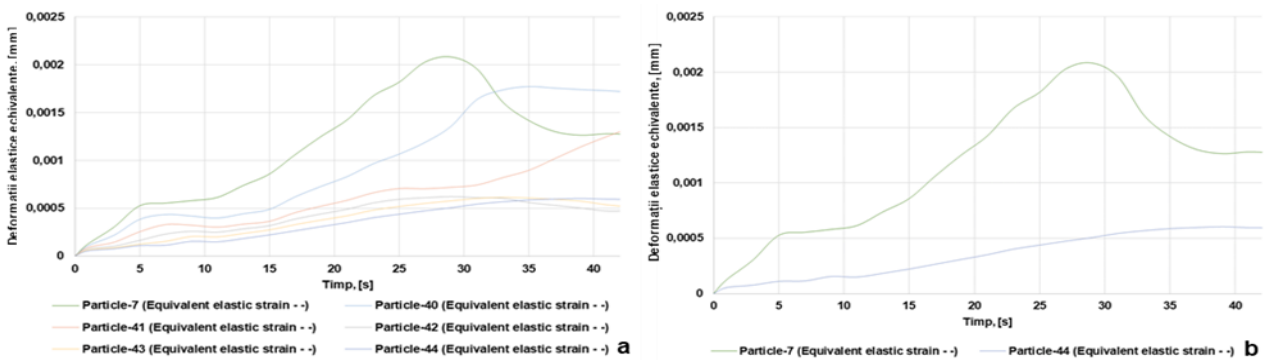
**3. Analizele stărilor de deformații elastice echivalente în zona 1 de început a procesului de sudare după axa z (perpendicular pe îmbinarea sudată)**

Variațiile deformațiilor elastice echivalente după axa z obținute prin MEF, pentru sudarea și răcirea straturilor 1 de rădăcină și 2 final, pe intervalul de timp de la începerea sudării stratului 1 de rădăcină și până la sfârșitul perioadei de achiziție a datelor (14,1 min/846 s) sunt prezentate în figura 5.56 (punctele/particulele 7, 40...44): a- perioada de achiziție a datelor în intervalul de timp 0...846 s; b- sudarea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 0...282 s; c- răcirea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 282...462 s; d- sudarea și răcirea stratului 2 final în intervalul de timp 462...846 s.



**Fig. 5.56.** Variațiile deformațiilor elastice echivalente după axa z în timpul proceselor de sudare/răcire a ambelor straturi (zona 1)

Variațiile deformațiilor elastice echivalente după axa z la începutul procesului de sudare a stratului 1 de rădăcină, pentru primele 42 de s, sunt prezentate în figura 5.57: a- punctele/particulele 7, 40...44; b- detaliu punctele/particulele 7 și 44.



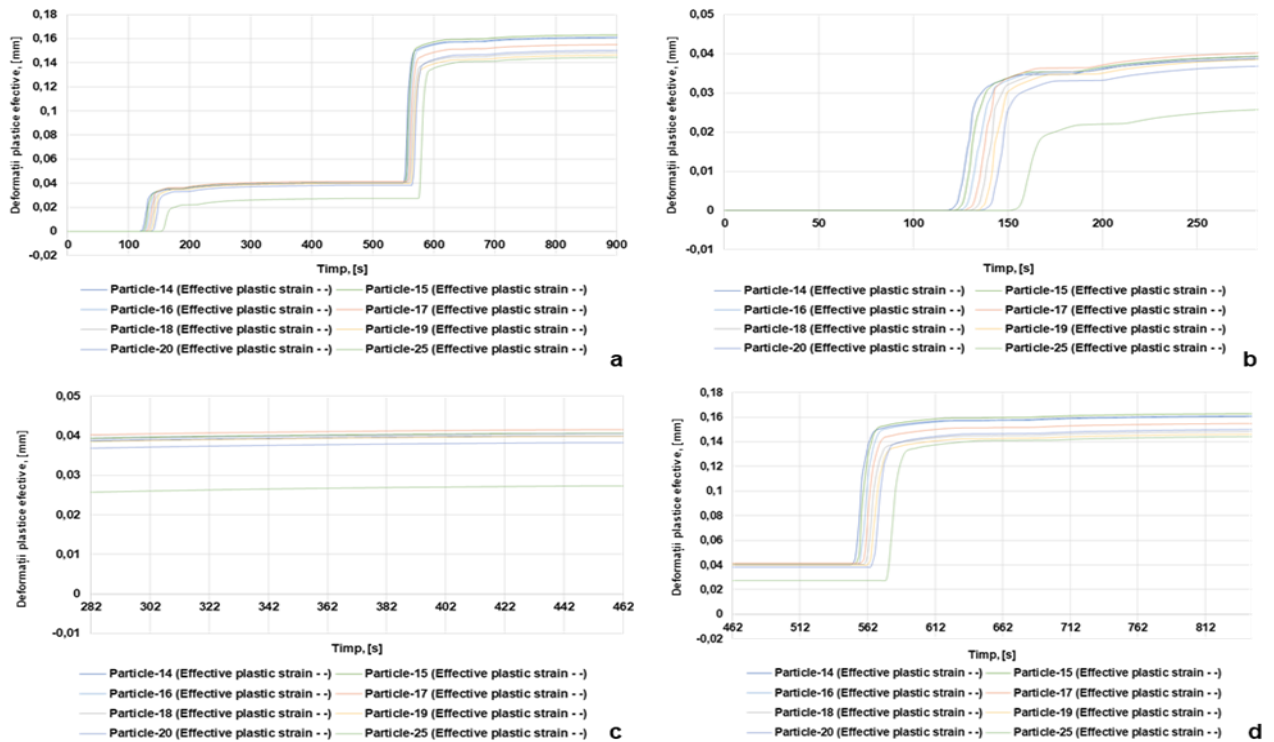
**Fig. 5.57.** Variațiile deformațiilor elastice echivalente după axa z în intervalul de timp 0...42 s (zona 1)



### 5.7.2.2. Analizele stărilor de deformații plastice efective și de deformații elastice echivalente în zona 2 (centrală) a cordonului de sudură

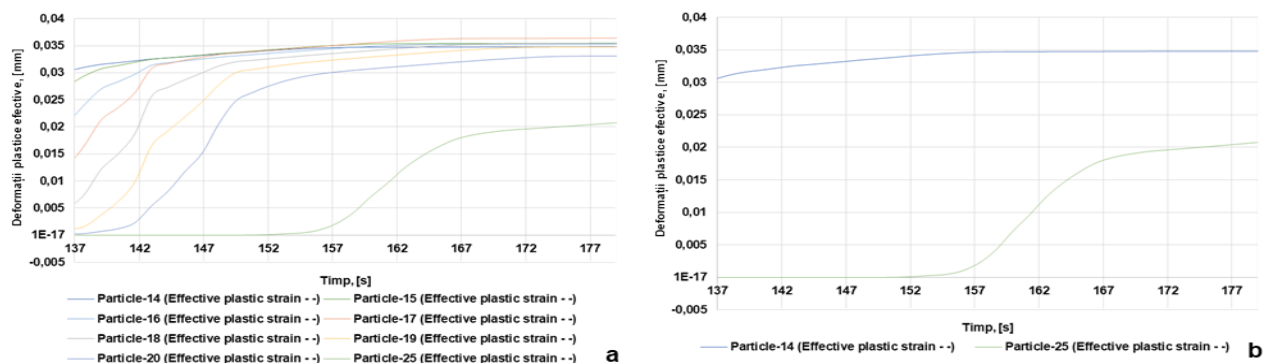
#### 1. Analizele stărilor de deformații plastice efective în zona 2 după axa x (în axa îmbinării sudate în sensul de sudare)

Variațiile deformațiilor plastice efective după axa x obținute prin MEF, pentru sudarea și răcirea straturilor 1 de rădăcină și 2 final, pe intervalul de timp de la începerea sudării stratului 1 de rădăcină și până la sfârșitul perioadei de achiziție a datelor (14,1 min/846 s) sunt prezentate în figura 5.58 (detalii punctele/particulele 14...20 și 25): a- perioada de achiziție a datelor în intervalul de timp 0...846 s; b- sudarea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 0...282 s; c- răcirea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 282...462 s; d- sudarea și răcirea stratului 2 final în intervalul de timp 462...846 s.



**Fig. 5.58.** Variațiile deformațiilor plastice efective după axa x în timpul proceselor de sudare/răcire a ambelor straturi (zona 2)

Variațiile deformațiilor plastice efective după axa x la începutul procesului de sudare a stratului 1 de rădăcină, pentru primele 42 de s, sunt prezentate în figura 5.59: a- detaliu punctele/particulele 14...20 și 25; b- detaliu punctele/particulele 14 și 25.

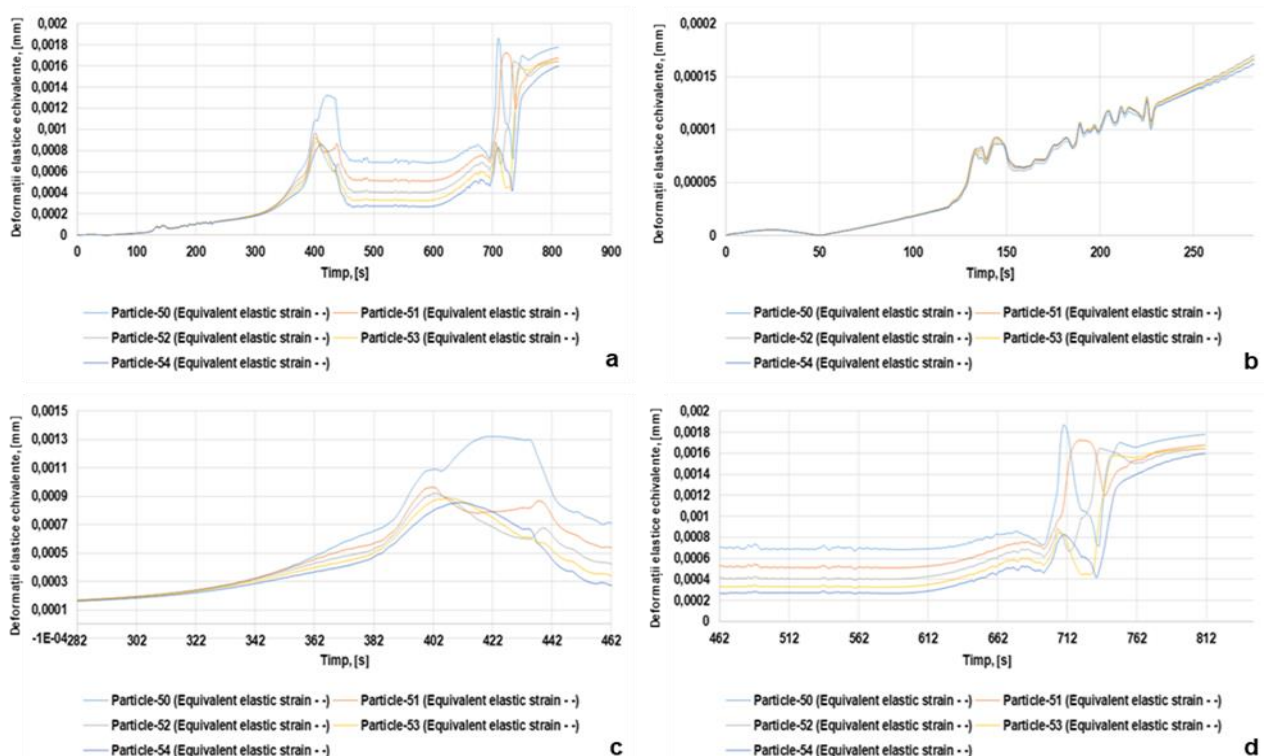


**Fig. 5.59.** Variațiile deformațiilor plastice efective după axa x în intervalul de timp 137...179 s (zona 2)

### 5.7.2.3. Analizele stărilor de deformații plastice efective și de deformații elastice echivalente în zona 3 de sfârșit a procesului de sudare

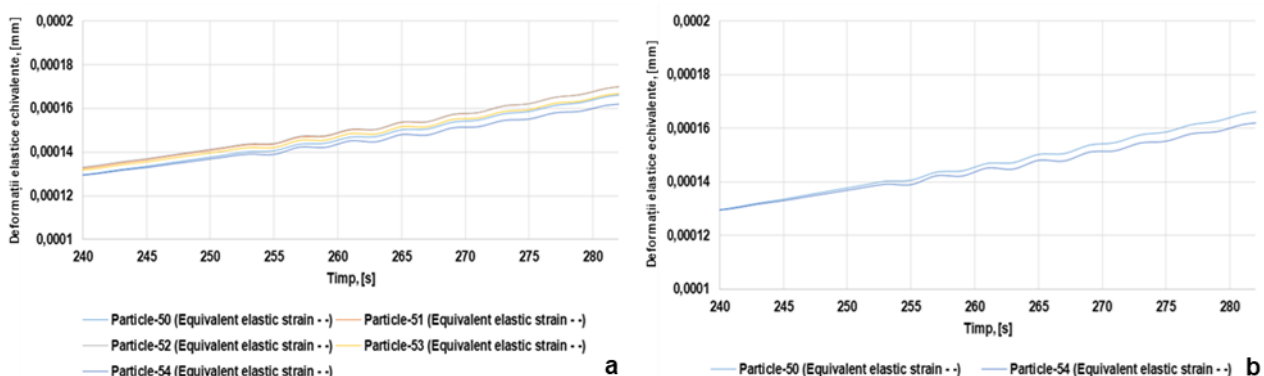
#### 3. Analizele stărilor de deformații elastice echivalente în zona 3 de sfârșit a procesului de sudare după axa z (perpendicular pe îmbinarea sudată)

Variațiile deformațiilor elastice echivalente după axa z obținute prin MEF, pentru sudarea și răcirea straturilor 1 de rădăcină și 2 final, pe intervalul de timp de la începerea sudării stratului 1 de rădăcină și până la sfârșitul perioadei de achiziție a datelor (14,1 min/846 s) sunt prezentate în figura 5.68 (punctele/particulele 50...54): a- perioada de achiziție a datelor în intervalul de timp 0...846 s; b- sudarea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 0...282 s; c- răcirea stratului 1 de rădăcină în intervalul de timp 282...462 s; d- sudarea și răcirea stratului 2 final în intervalul de timp 462...846 s.



**Fig. 5.68.** Variațiile deformațiilor elastice echivalente după axa z în timpul proceselor de sudare/răcire a ambelor straturi (zona 3)

Variațiile deformațiilor elastice echivalente după axa z la începutul procesului de sudare a stratului 1 de rădăcină, pentru primele 42 de s, sunt prezentate în figura 5.69: a- punctele/particulele 50...54; b- detaliu punctele/particulele 50 și 54.



**Fig. 5.69.** Variațiile deformațiilor elastice echivalente după axa z în intervalul de timp 240...282 s (zona 3)

## CAPITOLUL 6

### CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND ANALIZELE COMPORTĂRIILOR LA COROZIUNE MARINĂ

#### 6.1. Descrierea programului experimental și a metodologiei de cercetare

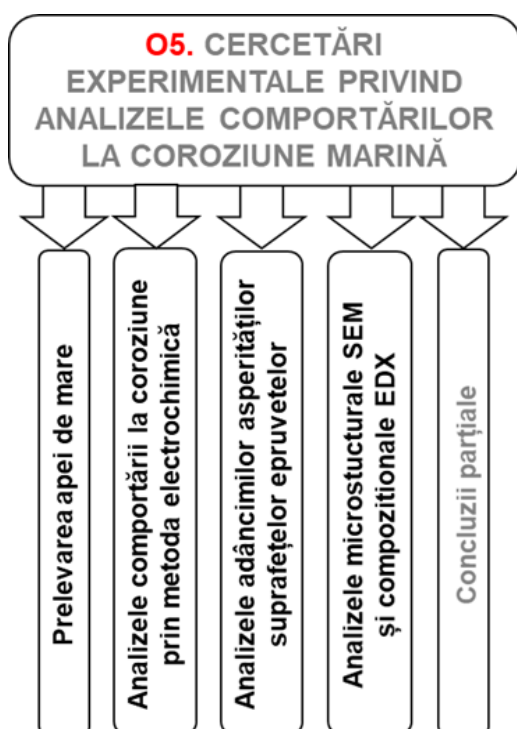


Fig. 6.1. Etapele parcurse în cadrul obiectivului O5 al tezei de doctorat

În acest capitol 6, în cadrul obiectivului O5 al tezei de doctorat, *Cercetări experimentale privind analizele comportărilor la coroziune marină*, s-au parcurs 5 etape, prezentate detaliat în figura 6.1.

#### 6.2. Prelevarea apei de mare

Pentru analiza comportării materialului de bază și a îmbinărilor sudate ale învelișului corpului navei la coroziune în apă de mare, s-a prelevat o probă de apă de la adâncimea de 5 m.

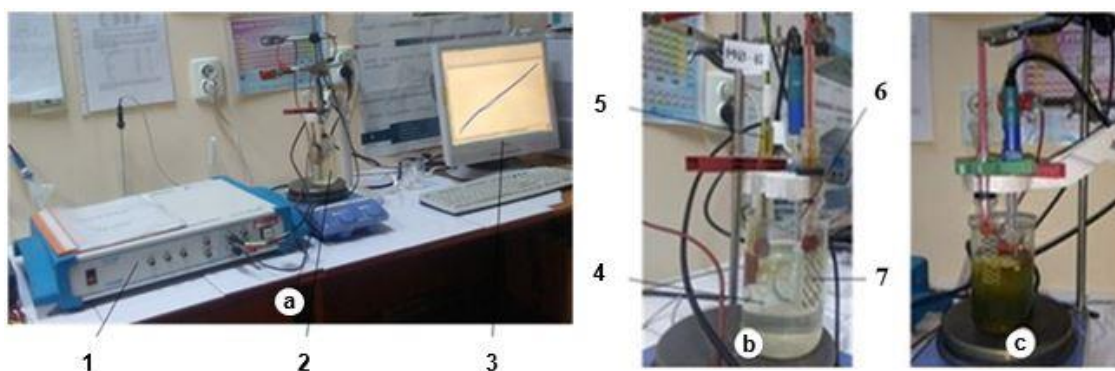
Pentru aceasta, s-a folosit stația de probare MN176-091 de la bordul navei de cercetare maritimă multifuncțională "Mare Nigrum" [1].

Programul experimental privind analizele comportărilor la coroziune a materialului de bază și a îmbinărilor sudate în apă de mare, a fost realizat în cadrul Laboratorului de Electrochimie și Coroziune, Centrul de Competențe Interfețe - Tribocoroziune și Sisteme Electrochimice (CC-ITES), Departamentul de Ingineria Mediului și Securității în Industrie, Facultatea de Inginerie, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați.

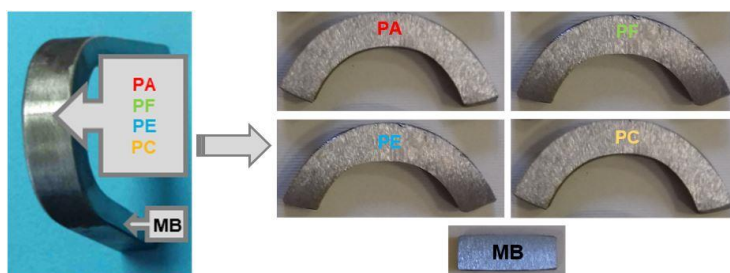
#### 6.3. Analizele comportărilor la coroziune prin metoda electrochimică

##### 6.3.1. Programul experimental

În figura 6.6 este prezentat echipamentul electrochimic de lucru pentru analizele comportărilor la coroziune constituit din [224]: 1- Potențiostat/Galvanostat PGZ 100; 2- celula electrochimică și 3- computerul pentru achiziții de date (software Voltmaster 4). În celula electrochimică (recipient din sticlă borosilicată) conținând 200 ml de apă de mare 4, sunt dispuși cei trei electrozi, *electrodul de lucru (catodul) WE 5*, *electrodul auxiliar (anodul) Pt-Rd AE 7* și *electrodul de referință RE 6* (Fig. 6.6. b, înainte de testare). Pentru testarea la coroziune, au fost prelevate mecanic un număr de cinci epruvete (*electrozi de lucru WE*), folosind *freza FUS 750* echipată cu o freză disc  $\Phi 150 \times 3$  mm, o epruvetă în materialul de bază cu dimensiunile  $25 \times 10 \times 2$  mm (MB) și câte o epruvetă din epruvetele supuse la încercarea la îndoire transversală frontală cu rădăcina comprimată (PA, PF, PE și PC), tot cu grosimea de 2 mm. După debitarea mecanică, la unul din capetele epruvetelor au fost realizate câte o gaură  $\Phi 3$ . Epruvetele au fost ulterior prelucrate prin rectificare folosind *mașina de rectificat AJAX 500H*.



**Fig. 6.6.** Echipament electrochimic de lucru pentru analizele comportărilor la coroziune (prelucrare și publicare în [224, 225])



**Fig. 6.9.** Prelevarea epruvetelor pentru testarea la coroziune (preluare, prelucrare și publicare în [224, 225, 231...233])

Modul de prelevare a epruvetelor pentru testarea la coroziune, este ilustrat în figura 6.9.

În continuare, s-au realizat analizele structurale SEM și compozițională EDX pe suprafețele rectificate ale celor cinci epruvete, pe *microscopul electronic de baleiaj (SEM/ESEM/EDAX) Quanta 200*. În final, s-au determinat rugozitățile suprafețelor care urmau a fi supuse la coroziune în apă de mare, folosind *rugozimetrul inductiv cu palpare SJ210 Mitutoiu și un software de analiză SJ-Communication-Tool*.

Epruvetele utilizate în protocolul experimental, au fost conectate fiecare cu câte un cablu electric lițat din cupru cu diametrul de 2 mm și izolate cu rășină siliconică monocomponentă și termorezistentă (Zwaluw Gasket-Sealant Red Gasket Aqua Block Formula), figura 6.11. S-a urmărit obținerea unor arii măsurabile egale, (sub formă de pătrat în cazul epruvetei MB și sub formă de trapez în cazul epruvetelor PA, PF, PE și PC), ele jucând rolul *electrozilor de lucru WE*. Zonele de testare la coroziune (suprafețe active) au fost degresate cu acid clorhidric (HCl) și hidroxid de sodiu (NaOH), spălate cu apă distilată și uscate cu aer cald. *Electrodul de referință RE Ag/AgCl (-199 mV ref Electrode Normal de Hidrogen ENH)*, este prezentat în figura 6.12.



**Fig. 6.11.** Electrodele de lucru (catodul) WE



**Fig. 6.12.** Electrodele de referință RE



**Fig. 6.13.** Electrodele auxiliare (anodul) AE

*Electrodul auxiliar AE* este din material inert (Pt-Rh) cu o formă cât mai corespunzătoare electrozilor de lucru WE, având suprafața activă bine definită și curată (Fig. 6.13). *Electrolitul* este constituit din apă de mare recoltată de la adâncimea de 5 m (200 ml pentru fiecare analiză, suprafața activă în contact cu aerul fiind de 6,25

cm<sup>2</sup>). Perioada de testare în cadrul experimentelor la coroziune pentru fiecare probă a fost de opt ore, iar temperatura de  $25 \pm 1$  °C.

Programul experimental privind analizele comportărilor la coroziune prin metoda electrochimică în apă de mare naturală a fost următorul [226, 229...231]:

1. *Potențialului în circuit deschis (OCP - Open Circuit Potential)*: 190 minute;
2. *Rezistența de polarizare ( $R_p$ )*, polarizare în jurul potențialului liber de la - 40 mV la + 40 mV, viteza de scanare fiind de 5 mV/sec: 200 minute;
3. *Viteza de coroziune ( $v_{cor}$ )*: 200 minute;
4. *Polarizare potențiodinamică (PP - Potentiodynamic Polarization)*, de la - 1.500 mV la + 1.500 mV față de Ag/AgCl, viteza de scanare fiind tot de 5 mV/sec: 50 minute;
5. *Voltmetria ciclică (CV - Cyclic Voltametry)*, de la - 1.500 mV la + 1.500 mV, viteza de scanare fiind tot de 5 mV/sec: 100 minute.

### 6.3.2. Prelucrarea grafică și interpretarea rezultatelor

Dintre cele cinci aspecte privind analizele comportărilor la coroziune, elocventă este viteza de coroziune ( $v_{cor}$ ). Conform datelor prezentate în figura 6.17, se poate observa că viteza de coroziune  $v_{cor}$  cea mai mare corespunde epruvetei prelevate din materialul de bază MB, comparativ cu cele patru epruvete prelevate din îmbinările sudate PA, PC, PE și PF.

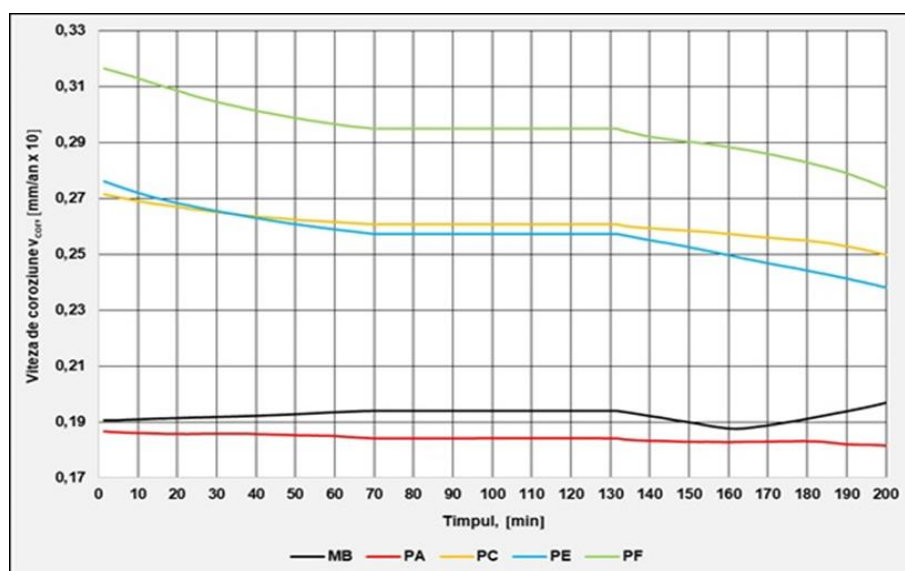


Fig. 6.17. Viteza de coroziune (publicare parțial în [231...233])

Vitezele de coroziune  $v_{cor}$  înregistrate și exprimate în mm/an, au fost pentru epruveta prelevată din materialul de bază MB de 0,17 mm/an, iar pentru epruvetele prelevate din cele patru îmbinări sudate au fost următoarele: 0,18 mm/an (PA); 0,25 mm/an (PC); 0,26 mm/an (PE) și 0,29 mm/an (PF). Din evoluțiile vitezelor de coroziune prezentate în figura 6.18, se poate observa o bună stabilitate a epruvetei prelevate din oțelul naval EH 36 folosit ca material de bază, cu valori mai scăzute. Aceste rezultate sugerează că cele patru epruvete prelevate din îmbinările sudate PA, PC, PE și PF nu au rezistența la coroziune a oțelului naval EH 36 și sunt în concordanță cu evoluția potențialului de circuit deschis în funcție de timp. Se poate observa că, odată cu trecerea timpului, crește ușor rezistența la coroziune a tuturor epruvetelor și implicit scade viteza de coroziune.

## 6.4. Analizele adâncimilor asperităților suprafețelor epruvetelor

### 6.4.1. Programul experimental

Programul experimental privind analizele adâncimilor asperităților suprafețelor epruvetelor prelevate din materialului de bază și din îmbinările sudate, a fost realizat înainte și după analizele comportărilor la coroziune în apă naturală din Marea Neagră. Determinările s-au realizat pe o distanță

de 4 mm cu o viteză de 0,5  $\mu\text{m/s}$ , pe suprafețele celor cinci epruvete, înainte și după efectuarea analizelor de comportare la coroziune (Fig. 6.21: a- pentru epruveta prelevată din materialul de bază MB; b- pentru epruvetele prelevate din epruvetele supuse la încercarea la îndoire transversală frontală cu rădăcina comprimată PA, PF, PE și PC).



Fig. 6.21. Determinarea adâncimilor asperităților suprafețelor (prelucrare și publicare în [224, 225])

#### 6.4.2. Prelucrarea grafică și interpretarea rezultatelor

În figurile 6.22 și 6.25 sunt prezentate evoluțiile adâncimilor asperităților suprafețelor, înainte și după efectuarea analizelor de comportare la coroziune, numai pentru epruvetele MB și PE.

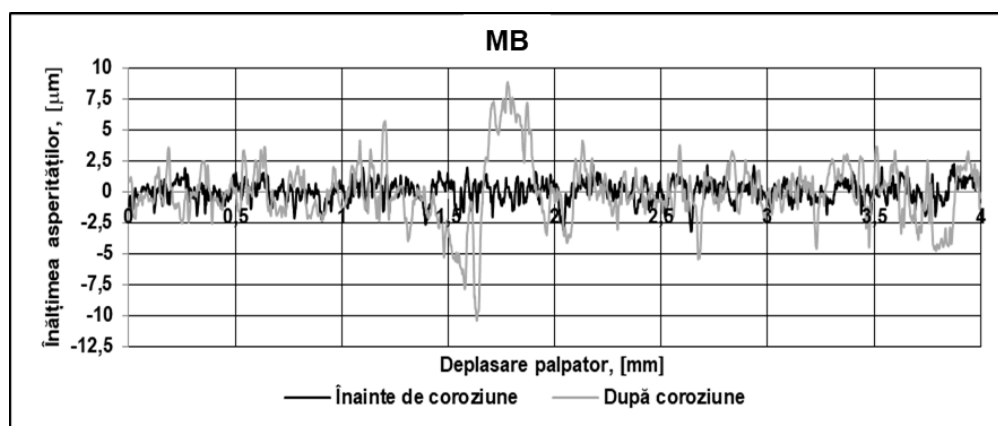


Fig. 6.22. Evoluțiile adâncimii asperităților pentru epruveta MB (prelucrare și publicare în [224, 225])

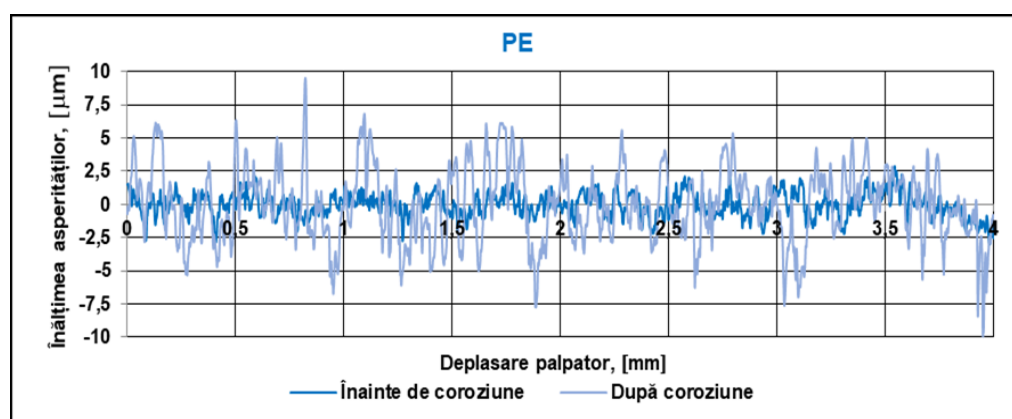


Fig. 6.25. Evoluțiile adâncimilor asperităților pentru epruveta PE (prelucrare și publicare în [224, 225])

Din prelucrările grafice se observă faptul că, adâncimile asperităților suprafețelor după finalizarea analizelor de comportare la coroziune prin metoda electrochimică în apă de mare prelevată din Marea Neagră, sunt mult mai mari decât adâncimile asperităților suprafețelor înainte

de efectuarea analizelor de comportare la coroziune datorită acțiunii corozive neuniforme pe suprafețele epruvetelor cât și pe adâncime.

## 6.5. Analizele microstructurale SEM și compoziționale EDX

### 6.5.1. Programul experimental

Pentru aceste analize, a fost utilizat *microscopul electronic de baleiaj (SEM / ESEM / EDAX) Quanta 200* prezentat în figura 6.27 (a- vedere din stânga; b- vedere din dreapta; c- vedere interioară a camerei de vedere).



**Fig. 6.27.** Microscopul electronic debaleiaj (SEM / ESEM / EDAX) Quanta 200 [235]

Analizele microstructurale SEM și compoziționale EDX au fost realizate pe suprafețele epruvetelor prelevate din materialul de bază și din epruvetele după realizarea încercărilor mecanice la îndoire cu rădăcina comprimată, în zonele aflate în contact direct cu mediul coroziv.

### 6.5.2. Prelucrarea grafică și interpretarea rezultatelor

În figurile 6.28 și 6.31 sunt prezentate cumulat, rezultatele analizelor microstructurale SEM și ale analizelor compoziționale EDX, înainte și după efectuarea analizelor de comportare la coroziune prin metoda electrochimică, numai pentru epruvetele MB și PE, astfel:

- în partea stângă sus, micrografiile SEM (mărire 2.000X);
- în partea dreaptă sus, concentrațiile individuale ale elementelor (CK, OK, AIK, SiK, PK, NbL, MoL, SK, TiK, VK, CrK, MnK, FeK, NiK și CuK) măsurate în procente masice (Wt%) și în procente atomice (At%);
- în partea de jos (cu roșu), sunt evidențiate cantitățile de elemente chimice menționate anterior.

În final sunt prezentate hărțile, unde prin puncte de diferite culori, se evidențiază distribuția cât și cantitatea elementelor chimice CK, OK și FeK, care participă direct în procesul de coroziune marină naturală.

Din analizele micrografiilor SEM realizate pe suprafețele epruvetelor înainte de realizarea analizelor de comportare la coroziune prin metoda electrochimică, s-a constatat faptul că suprafețele epruvetelor sunt uniforme, fără oxizi de fier și defecte pe suprafață, prezentând urme de material provenit din procesul de rectificare (stânga sus).

După finalizarea analizelor de comportare la coroziune prin metoda electrochimică, aspectul microstructural al suprafețelor rezultate este concretizat prin formarea unor produși de coroziune ca urmare a reacțiilor chimice de oxidare și de formare a oxizilor de fier (FeO- wuestita, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- hematita și Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>- magnetita) precum și a hidroxizilor FeHO<sub>2</sub>. Coroziunea chimică este localizată în puncte de tipul *pittingului* sau de tipul *crevasă*, rezultată în urma agresivității mediului de coroziune marin natural (stânga jos).

Din analizele concentrațiilor individuale ale elementelor chimice prezentate tabelar, înainte și după efectuarea analizelor de comportare la coroziune (dreapta sus), reiese faptul că, concentrațiile de CK și OK se măresc iar concentrațiile de FeK se micșorează (FeK fiind în continuare elementul majoritar de pe suprafețe) iar distribuțiile celor trei elemente chimice suferă ușoare neuniformități, datorită procesului de coroziune marină neuniformă (jos).

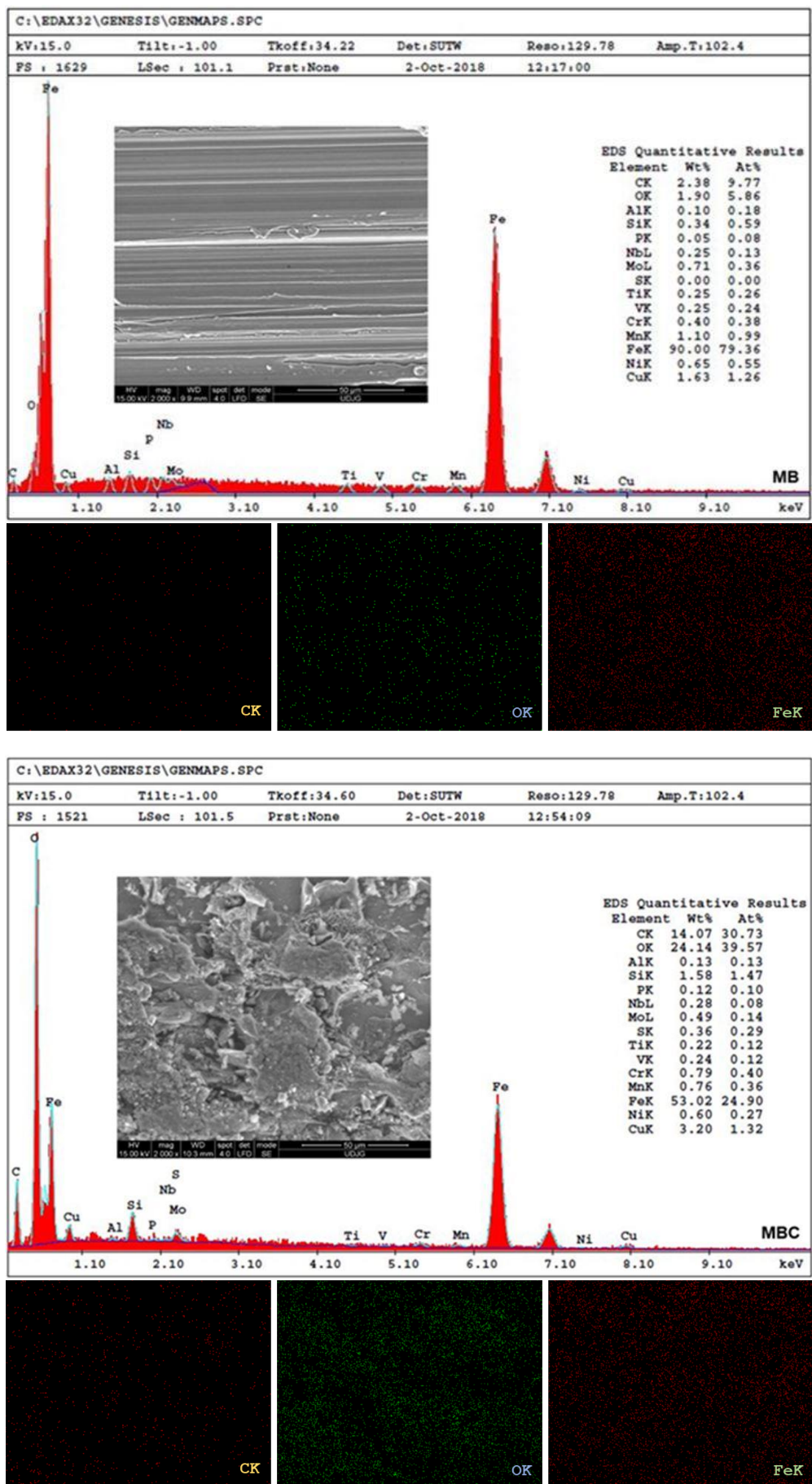


Fig. 6.28. Analizele SEM/EDX pe epruveta MB



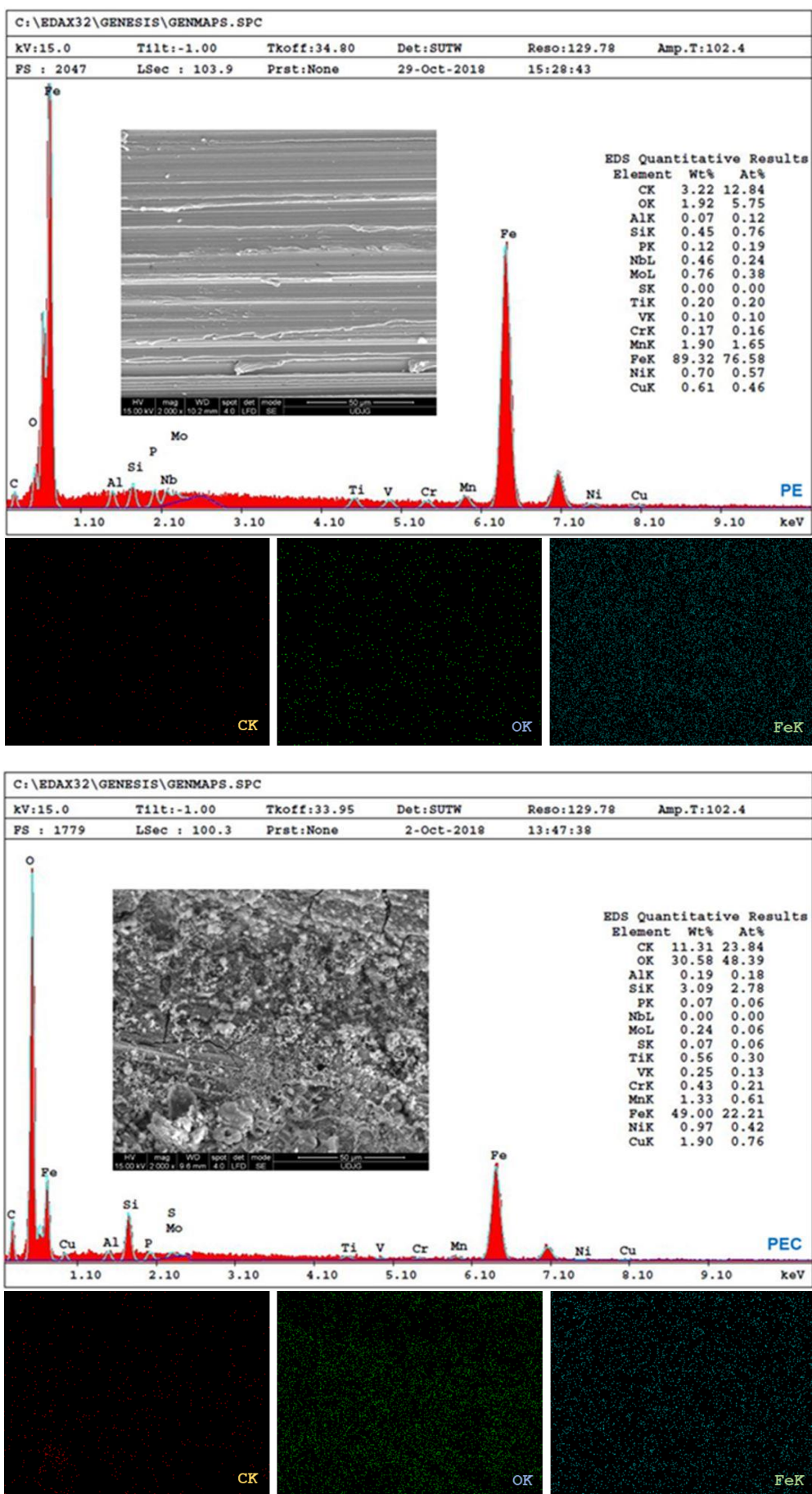


Fig. 6.31. Analizele SEM/EDX pe epruveta PE

## CAPITOLUL 7

### CONCLUZII, CONTRIBUȚII, REALIZĂRI ȘI PERSPECTIVE

#### 7.1. Concluzii generale

**Motivația alegerii temei** abordate în cadrul prezentei teze de doctorat, este creșterea gradului de cunoaștere în domeniul comportării mecano-metalurgice a oțelurilor navale de înaltă rezistență (High Strength Low Alloy - HSLA) la sudarea mecanizată MAG-M cu sârme tubulare, fără a genera modificări mecano-metalurgice în materialul de bază, asigurându-se îmbinări sudate de bună calitate, prin reducerea substanțială a tensiunilor și deformațiilor, cu o bună rezistență la coroziunea marină, și în plus, să ofere avantaje economice certe beneficiarilor.

Utilizarea la sudarea cap la cap a rosturilor înguste ( $\alpha = 40^\circ$ ), a suporturilor ceramice plate și a reductorului de presiune cu economizor pentru gaz de protecție, au condus la o reducere substanțială de manoperă, materiale de adaos (sârme tubulare pentru sudare) și material auxiliar (amestec de gaze de protecție activ).

*Pentru atingerea scopului principal, acela de a crește gradul de cunoaștere în domeniul sudării mecanizate MAG-M a îmbinărilor sudate cap la cap pe suport ceramic plat, și de a oferi informații prețioase și utile celor din domeniul naval și nu numai, cercetările experimentale s-au axat, pe următoarele **cinci direcții de cercetare (obiective specifice)**:*

- O1. Materiale, standuri și echipamente utilizate în cadrul programelor experimentale;*
- O2. Cercetări experimentale preliminare privind analizele cordoanelor depuse;*
- O3. Cercetări experimentale privind comportarea la sudarea mecanizată MAG-M a oțelului naval EH 36;*
- O4. Cercetările privind analizele MEF și experimentale ale tensiunilor și deformațiilor la sudarea cap la cap MAG-M;*
- O5. Cercetări experimentale privind analizele comportărilor la coroziune marină.*

**Activitățile de cercetare** efectuate pe parcursul studiului doctorat, **au fost derulate utilizând infrastructurile moderne din cadrul a două universități** (Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați și Universitatea "Politehnica" din București), **un institut de cercetări** (Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Geologie și Geoecologie Marină - GeoEcoMar din București) **și o societate comercială** (SC Ductil SA Buzău).

Trecând în revistă concluziile parțiale din fiecare capitol al tezei de doctorat, se pot stabili următoarele **concluzii generale**:

**A.** Referitor la **Stadiul actual al cercetărilor în domeniul tezei de doctorat**, se pot contura următoarele **concluzii**:

1. Nava ce urmează a se construi, este o navă maritimă cu destinație și exploatare specială (de cercetare marină), având corpul realizat din oțel și suprastructura din aliaj de aluminiu;
2. Sudarea MAG este frecvent întâlnită în variantă semimecanizată, pretându-se cu ușurință la mecanizare, automatizare și chiar robotizare, prezintă un grad mare de universalitate, fiind cea mai răspândită în industrie (construcții metalice din oțeluri nealiate și slab aliate de mari dimensiuni);
3. Pornind de la principalele criterii tehnico-economice de selecție a procedurii de sudare prin topire cap la cap a tablelor din domeniul naval, se consideră faptul că, selecția procedurii de

sudare mecanizată MAG cu sârmă tubulară este soluția cea mai recomandată;

4. Pe plan național și internațional, la sudarea semimecanizată/mecanizată MAG cu sârmă tubulară a oțelurilor navale, se utilizează sârme tubulare cu pulberi metalice și/sau rutilice, care permit utilizarea unor regimuri de sudare productive, chiar și în cele mai dificile poziții de sudare, utilizând frecvent amestecul de gaze de protecție M21 (Corgon 18) care combină avantajele CO<sub>2</sub>-lui pur, cu stropirea redusă a amestecurilor Ar + O<sub>2</sub>;

5. De foarte multe ori în producție, se impune folosirea unor suporturi de susținere a băii de metal lichid, în timpul formării băii și până la răcirea acesteia, pentru evitarea curgerii metalului lichid din rostul dintre componentele de sudat;

6. În cazul structurilor metalice sudate de mai dimensiuni apar atât tensiuni nedorite sau intenționate (folositoare) cât și deformații (contractia longitudinală, contractia transversală, contractia rostului, rotația și îndoirea componentelor în jurul axei îmbinării sudate), determinate de încălzirea locală și neuniformă specifică procesului de sudare;

7. Pe plan internațional, s-au realizat aplicații în repararea structurilor metalice, prin combinarea Modelării cu Elemente Finite (MEF) cu experiment. Deasemenea, încă din etapa de proiectare a structurilor metalice navale, pornindu-se de la procedurile de sudare care urmează a se utiliza, s-au făcut modelări cu elemente finite în scopul reducerii deformațiilor și tensiunilor reziduale;

8. În cazul oțelurilor, întâlnim două tipuri de coroziune (chimică și electrochimică), condiționate de specificul acestora, mediul coroziv și condițiile de operare. Registrele navale grupează pentru navele și structurile metalice plutitoare din mediul marin, șase zone de coroziune: submersibilă; de splash (stropi); atmosferică; tancurile de balast; magaziile de marfă și spațiile interne. Metodele de investigare a coroziunii pot fi electrochimice și neelectrochimice, metodele electrochimice fiind cele mai eficiente și totodată cele mai utilizate pentru caracterizarea și evaluarea rezistenței la coroziune.

**B. Referitor la *Materiale, standuri și echipamente utilizate în cadrul programelor experimentale*, se desprind următoarele concluzii:**

➤ Materialul de bază utilizat în cadrul vastelor programe experimentale a fost oțelul naval EH 36 cu grosimea de 10 mm, elaborat sub supravegherea registrului naval Det Norske Veritas (DNV);

➤ Materialele de adaos selectate pentru programele experimentale (sârmă plină ER70S-6, sârmă tubulară cu pulberi metalice E70C-6MH4 și sârmă tubulară cu flux rutilic E81T1-Ni1MJH4, cu diametrele de 1,2 mm), sunt de ultimă generație, elaborate de un mare producător mondial, sub supravegherea Registrului Naval Lloyd's Register (LR);

➤ Pe baza recomandărilor producătorului de sârme, pentru protecția arcului electric de sudare, a fost utilizat amestecul de gaze de protecție M21 (82% Ar + 18% CO<sub>2</sub>);

➤ Pentru susținerea straturilor de rădăcină, s-au ales suporturi ceramice plate cu canal concav, Keraline TF2-9;

➤ Pentru sudare, s-au utilizat patru standuri, având în componență echipamente performante la nivel mondial (sursa universală Phoenix 405 Progress puls MM TDM și tractorul de sudare K-BUG 5102);

- stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția PA;
- stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în pozițiile PF și PE;
- stand pentru sudarea mecanizată MAG-M în poziția PC;
- stand pentru analizele câmpurilor termice și a tensiunilor la sudarea mecanizată MAG-M în poziția orizontală PA;

➤ Reductorul de presiune cu economizor ELGA Optimator AR/MIX 30L asigură scăderea consumului de gaz de protecție până la 45%.

**C. Din *Cercetările experimentale preliminare privind analiza cordoanelor depuse*, se pot contura următoarele concluzii:**

1. Productivitățile topirilor și a depunerilor, randamentele nominale, coeficienții de topire și de depunere și coeficienții de pierdere, depind de tipul sârmei (plină sau tubulară), tipul miezului (pulbere metalică sau flux rutilic) și de tipul protecției (CO<sub>2</sub> sau amestec de gaze de protecție activ);

2. Caracteristicile de depunere au fost mai mici, datorită pierderilor prin stropi și suplimentar a topirii miezului sârmei tubulare rutilice, rezultând zgură și gaze;
3. Analizele macroscopice ale celor patru epruvete au evidențiat clar zonele cordoanele depuse și lipsa defectelor interioare;
4. Cordoanele depuse au avut un aspect dendritic cu grăunți alungiți de ferită aciculară și perlită modificată;
5. Zonele de influență termomecanică au fost constituite din ferită cu grăunți mai mari decât cei ai materialului de bază în zona de supraîncălzire, cu extindere de aproximativ 1 mm;
6. Microduratele Vickers HV1 sub cordoanele depuse s-au situat în limite strânse, atât în cazul sârmei pline cât și în cazul sârmelor tubulare.

**D. Cercetările experimentale privind comportarea la sudarea mecanizată MAG-M a oțelului naval EH 36, au condus la următoarele concluzii:**

1. Îmbinările sudate cap la cap au fost de calitate, fără defecte exterioare și interioare;
2. Toate epruvetele plate cu porțiunea calibrată pentru încercarea la tracțiune transversală, s-au rupt în metalul de bază (rupere ductilă, fără defecte), la valori apropiate de rezistența de rupere la tracțiune a materialului de bază achiziționat;
3. Rezultatele încercărilor mecanice la îndoire transversală frontală la un unghi de  $180^\circ$  pe un dorn cu diametrul de 40 mm, au confirmat lipsa defectelor, rezultatele fiind bune (fără defecte);
4. Un aspect important care trebuie semnalat, este realizarea unor îmbinări sudate cu foarte bune caracteristici de plasticitate, aspect dovedit de valorile energiei de rupere absorbite la temperatura de  $-20^\circ\text{C}$ , cu mult peste energia minimă acceptată de 34 J, conform regulilor registrului naval Lloyd's Register (LR);
5. Analizele macroscopice au evidențiat clar zonele straturilor/cordoanele depuse în rostul dintre componentele de sudat și lipsa defectelor interioare;
6. Analizele microscopice au evidențiat aceleași microstructuri indiferent de poziția de sudare;
7. Comparând valorile microduratele Vickers HV1 în zonele îmbinărilor sudate pe cele două direcții de investigare, valorile sunt maxime pe direcția de investigare I-I amplasată în stratul final și minime pe direcția de investigare II-II amplasată în stratul de rădăcină, tratat termic de straturile de umplere și finale. Indiferent de poziția de sudare, valorile microduratele Vickers HV1 au fost maxime în SUD. Comparând valorile microduratele în subzonele de supraîncălzire din ZIT și în axele îmbinărilor sudate, se constată că, indiferent de zonele de analiză, valorile microduratele au fost maxime în straturile finale, medii în straturile de umplere și minime în straturile de rădăcină. Valorile microduratele s-au situat cu mult sub valoarea maximă impusă de regulile registrului naval Lloyd's Register (LR) de 350 HV1. Rezultatele obținute au demonstrat că în cele patru îmbinări sudate cap la cap, nu au fost identificate structuri dure și fragile.

*În concluzie, rezultatele bune ale încercărilor mecanice de laborator și ale analizelor macroscopice și microscopice, fac posibilă aplicarea tehnologiilor de sudare a oțelului naval de înaltă rezistență marca EH 36 cu grosimea de 10 mm în poziția comodă PA și în pozițiile dificile (PF, PE și PC). Conform regulilor registrului naval Lloyd's Register (LR), tehnologiile de sudare pot fi extinse pentru grosimi de table în domeniul  $3 < S \leq 12$ , la  $3 \dots 2 \cdot S$ , adică  $3 \dots 20$  mm.*

**E. Referitor la Cercetările privind analizele MEF și experimentale ale tensiunilor și deformațiilor la sudarea cap la cap MAG-M, se desprind următoarele concluzii:**

1. Din analizele comparate a stărilor de tensiune determinate prin modelarea cu elemente finite (MEF) și experimental pe cele 3 zone de analiză a îmbinării sudate cap la cap, au rezultat următoarele concluzii:
  - Se remarcă o abatere de la modelarea cu elemente finite (MEF) și validare experimentală mediată de 19% pentru zona 1 de început a procesului de sudare, de 20% pentru zona 2 centrală, respectiv de 21% pentru zona 3 de sfârșit a procesului de sudare;
  - Aceste abateri, deși nu este în domeniul de 10% acceptat de ingineria mecanică, totuși se înscriu, prin complexitatea fenomenelor din îmbinarea sudată, în limite care pot fi acceptate;

➤ De aici se poate concluziona că metoda experimentală folosită validează modelările numerice realizate. Concluzia este că modelarea numerică folosită poate fi acceptată ca fiind cu rezultate credibile și în limitele ingineresti;

➤ Tensiunile normale înregistrate experimental și calculate numeric nu depășesc limita de curgere a materialului de bază (442 MPa conform certificate de calitate).

2. Din analizele comparate a stărilor de deformații determinate prin modelarea cu elemente finite (MEF) și experimental pe cele 3 zone de analiză a îmbinării sudate cap la cap, au rezultat următoarele concluzii:

➤ Deformațiile plastice efective cresc foarte repede la amorsarea arcului electric, urmând ca apoi să se stabilizeze la o valoare aproximativ constantă, pentru toate cele 3 zone de analiză a îmbinării sudate;

➤ Deformațiile elastice echivalente în modul, sunt mai mari decât deformațiile plastice efective, datorită caracterului vîsco-elastoplastic al comportării materialului de bază. Acest comportament este relevat de raportul în care se găsesc deformațiile plastice efective și deformațiile elastice echivalente;

➤ La sudarea stratului 2 final, deformațiile plastice efective și cele elastice echivalente au valori mai mari comparativ cu cele obținute în cazul sudării stratului 1 de rădăcină. Acest lucru este normal să se întâmple deoarece, nu mai sunt posibile dilatări, respectiv deplasări și mare parte din energia termică se transformă în energie potențială de deformație, aceasta conducând la creșterea deformațiilor;

*Metodologia de studiu prezentată în acest capitol este verificată experimental și poate fi folosită pentru studiul fenomenelor care au loc în îmbinările sudate cap la cap mecanizat MAG-M.*

**F. Din Cercetările experimentale privind analizele comportărilor la coroziune marină,** se pot contura următoarele concluzii:

1. În urma efectuării testelor de coroziune electrochimică pentru cele cinci epruvete, se pot concluziona următoarele:

➤ Monitorizarea potențialului în circuit deschis OCP a arătat că acesta atinge starea de echilibru numai în cazul epruvetei sudate în poziția PE, pentru celorlalte epruvete potențialul continuând deplasarea spre valori negative;

➤ Valoarea minimă a rezistenței de polarizare  $R_p$  este atinsă numai de epruveta MB, celelalte epruvete atingând valori mai mari, fapt datorat elementelor de aliere din sârmele tubulare;

➤ Cea mai mică valoare a vitezei de coroziune  $v_{cor}$  este atinsă de suprafața epruvetei PA;

➤ Pentru toate cele cinci epruvete, măsurarea curbilor de polarizare potențiodinamică PD a evidențiat prezența unui domeniu pasiv situat între - 1 V și - 0,5 V;

➤ Voltamogramele ciclice CV au arătat că nu există susceptibilitate a apariției *coroziunii în pitting*, curbele fiind caracteristice *coroziunii generalizate uniforme*;

2. Adâncimile asperităților suprafețelor epruvetelor după finalizarea analizelor de comportare la coroziune în apă de mare, sunt mult mai mari decât adâncimile asperităților suprafețelor înainte de efectuarea analizelor de comportare la coroziune, datorită acțiunii corozive neuniforme a suprafețelor epruvetelor;

3. Analizele microgafiilor SEM realizate înainte de coroziune au confirmat existența unor suprafețe curate și netede fără prezența produșilor de coroziune. După imersarea în apa de mare s-a constatat că pe toate suprafețele epruvetelor s-au format straturi dense și compacte de produși de coroziune;

4. Analizele EDX după încetarea testelor de coroziune, au arătat că a intervenit scăderea procentului de FeK și creșterea procentului de OK, acest fapt confirmând formarea produșilor de coroziune pe suprafețele analizate, fapt confirmat și de analiza microgafiilor SEM. Aceleași analize EDX au arătat prin afișarea hărților (mapare) o creștere a concentrațiilor de CK și OK și o scădere a concentrațiilor de FeK, creșterea concentrației de CK fiind atribuită aderenței microorganismelor din apa de mare naturală pe suprafața epruvetelor;

5. Metodele electrochimice de testare a comportamentului la coroziune au un rol important în stabilirea și alegerea procedurilor de sudare în funcție de expunerea și solicitarea sub acțiunea mediului marin.

*În concluzie, analizele la coroziune în mediu marin natural, trebuie extinse pe etapele de pregătire și aplicare a diferitelor protecții anticorozive a corpului navei maritime (sablare, pasivare și vopsire) și pe analizele produșilor de coroziune prin metoda difracției cu raze X (XRD).*

## 7.2. Contribuții personale

Activitatea realizată în cadrul tezei de doctorat, precum și rezultatele cercetărilor proprii publicate sau prezentate în cadrul unor manifestări științifice naționale și internaționale, permit enunțarea următoarelor *contribuții personale* în problematica dezvoltată în cadrul tezei de doctorat.

### 7.2.1. Contribuții teoretice

În plan teoretic, pot fi evidențiate următoarele *contribuții*:

1. Stadiul actual al cercetărilor privind sudarea mecanizată cap la cap MAG pe suport ceramic a oțelurilor navale;
2. Stadiul actual al cercetărilor privind analizele tensiunilor și deformațiilor la sudarea prin topire cap la cap MAG;
3. Stadiul actual al cercetărilor privind analizele comportărilor la coroziune marină a materialului de bază și a îmbinărilor sudate;
4. Selecția materialului de bază, materialelor de adaos și a materialelor auxiliare pentru cercetările experimentale;
5. Selecția echipamentelor pentru sudarea mecanizată cap la cap MAG;
6. Optimizarea rostului la sudare mecanizată cap la cap MAG;
7. Stabilirea metodelor de control nedistructiv și distructiv;
8. Stabilirea dimensiunilor probelor sudate cap la cap, a modului de prelevare și a dimensiunilor epruvetelor.

### 7.2.2. Contribuții experimentale

Din programul experimental se desprind următoarele *contribuții*:

1. Conceperea și realizarea a cinci standuri utilizate în cadrul programelor experimentale;
2. Determinarea caracteristicilor de topire și de depunere ale sârmelor pline și tubulare;
3. Analizele macroscopice și microscopice ale cordoanelor depuse;
4. Analizele microdurității Vickers HV1 sub cordoanele depuse;
5. Cercetări experimentale privind stabilirea parametrilor regimurilor de sudare;
6. Sudarea efectivă mecanizată MAG-M cu sârme tubulare pe suport ceramic plat, în cele patru poziții, care intervin la sudarea învelișului navei de cercetări marine;
7. Controlul nedistructiv (vizual și cu radiații penetrante) a probelor sudate;
8. Controlul distructiv (încercări mecanice la tracțiune transversală, îndoire transversală frontală, încovoiere prin șoc KV, microdurități Vickers HV1 și analize macroscopice și microscopice) a probelor sudate;
9. Proiectarea, realizarea și experimentarea standului pentru analizele câmpurilor termice și a tensiunilor;
10. Realizarea și etalonarea traductoarelor pentru măsurarea tensiunilor;
11. Realizarea probei sudate cap la cap;
12. Achiziția datelor privind evoluțiile tensiunilor;
13. Cercetări privind analizele MEF și experimentale ale tensiunilor și deformațiilor la sudarea cap la cap MAG-M;
14. Cercetări experimentale privind analizele comportării la coroziune marină a materialului de bază și a îmbinărilor sudate;
15. Cercetări experimentale privind influența coroziunii marine asupra adâncimilor asperităților suprafețelor epruvetelor prelevate din materialul de bază și din îmbinările sudate;

16. Cercetări experimentale privind analizele microstructurale SEM și compoziționale EDX.

### 7.3. Realizări în domeniul tezei de doctorat

În perioada de pregătire doctorală, am fost **implicat în cadrul proiectului de cercetare-dezvoltare-inovare câștigat prin competiție, PN-III-P1-1.2-PCCDI-2017-0875-HEAPROTECT, Sisteme de protecție individuală și colectivă pentru domeniul militar pe bază de aliaje cu entropie ridicată (Individual and collective protection systems for the military field based on high entropy alloys)**, poziția 51 în lista persoanelor implicate în proiect, în perioada 15.03.2018-30.11.2020.

Diseminarea rezultatelor cercetărilor experimentale efectuate pe parcursul studiilor doctorale, s-a materializat prin **publicarea a 4 articole în reviste internaționale de prestigiu în domeniul abordat (ISI Proceeding), publicarea a 4 articole în reviste BDI, publicarea sau comunicarea a 13 articole la manifestări științifice naționale și internaționale, 2 citări și elaborarea și susținerea în fața comisiei de îndrumare a 3 rapoarte științifice**, după cum urmează:

- **publicate în reviste cotate/indexate ISI Proceeding: 4 (1 prim autor);**
- **publicate în reviste BDI: 4 (3 prim autor);**
- **publicate în volumul unor manifestări științifice naționale: 1 prim autor;**
- **prezentate oral sau poster la conferințe internaționale: 8 (4 prim autor);**
- **prezentate oral sau poster la conferințe naționale: 4 prim autor, un premiu II (2017) și un premiu III (2018) la Scientific Conferences of Doctoral Schools, Perspectives and challenges in doctoral research!, organizate de CSSD-UDJG;**
- **citări în articole publicate în reviste cotate ISI, indexate în ISI Proceedings sau în reviste BDI: 2**
- **rapoarte științifice susținute în perioada de pregătire doctorală: 3**

### 7.4. Direcții viitoare de cercetare

Rezultatele teoretice și experimentale obținute în urma programului de cercetare științifică, prezentat detaliat în cadrul prezentei teze de doctorat, deschid oportunitatea continuării acestuia pe următoarele **direcții viitoare de cercetare**:

1. Comportarea la sudarea mecanizată MAG a oțelurilor utilizate la realizarea construcțiilor metalice sudate, parțial sau total imerse (amenajări portuare, conducte magistrale subacvatice, centrale eoliene etc);

2. Analizele câmpurilor termice la îmbinări sudare cap la cap și de colț prin folosirea unei camere de termografieră care să permită achiziția de date a temperaturilor mari din baia de metal topit;

3. Analizele tensiunilor și deformațiilor la îmbinări sudare cap la cap și de colț și în poziții dificile, prin folosirea metodelor experimentale fără contact;

4. Analizele la coroziune în mediu marin natural, după sablare, pasivare și diferite protecții anticorozive, în zonele stratului final (MB - ZIT - SUD) aflate în contact direct cu mediul marin coroziv;

5. Analizele produșilor de coroziune utilizând metoda difracției cu raze X (XRD).

## LISTĂ LUCRĂRI PUBLICATE ȘI PREZENTATE

### **A. Articole științifice publicate în reviste cotate/indexate ISI Proceeding: 4 (1 prim autor)**

1. **Florescu, S. N.**, Gheonea, M. C., Mihailescu, D., Teodor, V., *Influence of marine corrosion on the roughness of MAG welded joint surfaces*, The 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, NEWTECH-2020, September, 09-11<sup>th</sup>, Galati, Romania, (NT05), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020 (acceptată și în curs de publicare).

2. Gheonea, M. C., **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., Teodor, V., *Influence of marine corrosion on the roughness of the dry hyperbaric underwater MAG welding joints*, The 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, NEWTECH-2020, September, 09-11<sup>th</sup>, Galati, Romania, (NT06), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020 (acceptată și în curs de publicare).

3. Gheonea, M. C., Mihailescu, D., **Florescu, S. N.**, Scutelnicu, E., *Experimental research on melting and deposition characteristics of wires during Gas Metal Arc Welding*, The 6<sup>th</sup> International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering, 2018, Constanta, Romania, MODTECH-2018, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 400(2018) 022027  
doi:10.1088/1757-899X/400/2/022027,

[http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1YaSahcEhYaWNmFnmT&search\\_mode=GeneralSearch&prID=86983280-b9d7-4cc0-84df-31adeecb16f8](http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1YaSahcEhYaWNmFnmT&search_mode=GeneralSearch&prID=86983280-b9d7-4cc0-84df-31adeecb16f8)

4. Gheonea, M. C., Mihailescu, D., **Florescu, S. N.**, Scutelnicu, E., *Experimental assessment of gases and fumes developed during Gas Metal Arc Welding*, The 6<sup>th</sup> International Conference on Modern Manufacturing Technologies in Industrial Engineering, 2018, Constanta, Romania, MODTECH-2018, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 400(2018) 022028  
doi:10.1088/1757-899X/400/2/022028,

[http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1YaSahcEhYaWNmFnmT&search\\_mode=GeneralSearch&prID=15a3579c-4b91-4a55-b65b-4fc8a21240b7](http://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=C1YaSahcEhYaWNmFnmT&search_mode=GeneralSearch&prID=15a3579c-4b91-4a55-b65b-4fc8a21240b7)

### **B. Articole științifice publicate în reviste BDI: 4 (3 prim autor)**

1. **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., Gheonea, M. C., *Experimental research on the behavior of EH 36 naval steel at the MAG-M mechanized butt welding*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XI, Shipbuilding, Galati University Press, 2019, Pages 47-54, ISSN: 1221-4620, e-ISSN 2668-3156,

<http://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/fanship/article/view/2189/2427>

2. **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., Birsan, D. C., Mocanu, C. I., *Researches on the thermal fields analysis at MAG-M mechanized butt welding with solid wire*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XI, Shipbuilding, Galati University Press, 2018, Pages 73-80, ISSN: 1221-4620, e-ISSN: 2668-3156,

<http://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/fanship/article/view/1011/947>

3. **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., Gheonea, M. C., Mardare, L., *Experimental study of maritime ships corrosion in the black sea, by using MAG-M mechanized butt welding with metal-cored wire and rutile flux-cored wire*, Geo-Eco-Marina Journal, No. 24, 2018, Pages 127-131, ISSN: 2248-2776, ISSN-L: 1224-6808, [https://www.geoecomar.ro/website/publicatii/Nr.24-2018/08\\_FLORESCU\\_web\\_2018.pdf](https://www.geoecomar.ro/website/publicatii/Nr.24-2018/08_FLORESCU_web_2018.pdf)

4. Onica, M. C., **Florescu, S. N.**, Mocanu, C. I., Gavan, E., *Numerical simulation of heat transfer behavior after temperature modification*, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XI, Shipbuilding, Galati University Press, 2016, Pages 39-42, ISSN: 1221-4620, e-ISSN: 2668-3156, <http://www.gup.ugal.ro/ugaljournals/index.php/fanship/article/view/1092/1295>



**C. Articole științifice publicate în volumul unor manifestări științifice naționale: 1 prim autor**

1. **Florescu, S. N.**, Mihăilescu, D., Gheonea, M. C., *Evaluarea caracteristicilor de topire și de depunere ale sârmelor pline și tubulare utilizate la sudarea mecanizată MAG-M a corpului navelor maritime*, Conferința Sudura-2018, Editura Sudura, Timișoara, 2018, Pag. 103-114, ISSN 1843-4738 (CD),  
[https://www.google.ro/search?q=file:///F:/Conferinta%2520+ASR%2520Sudura%25202018%2520-%2520+Timisoara/CD20+CONFERINTA/LUCRARI%20CONFERINTA.htm+file:///F:/Conferinta%2520ASR%2520Sudura%25202018%2520-%2520Timisoara/CD%2520CONFERINTA/LUCRARI%20CONFERINTA/17\\_FLORESCU.pdf&spell=1&sa=X&ved=2ahUKEwjou5TvxP3oAhW0oXEKHfPfDS0QBSqAegQICRAs&biw=1920&bih=937](https://www.google.ro/search?q=file:///F:/Conferinta%2520+ASR%2520Sudura%25202018%2520-%2520+Timisoara/CD20+CONFERINTA/LUCRARI%20CONFERINTA.htm+file:///F:/Conferinta%2520ASR%2520Sudura%25202018%2520-%2520Timisoara/CD%2520CONFERINTA/LUCRARI%20CONFERINTA/17_FLORESCU.pdf&spell=1&sa=X&ved=2ahUKEwjou5TvxP3oAhW0oXEKHfPfDS0QBSqAegQICRAs&biw=1920&bih=937)

**D. Articole științifice prezentate oral sau poster la conferințe internaționale: 8 (4 prim autor)**

1. **Florescu, S. N.**, Gheonea, M. C., Mihailescu, D., Teodor, V., *Influence of marine corrosion on the roughness of MAG welded joint surfaces*, The 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, NEWTECH-2020, September, 09-11<sup>th</sup>, Galati, Romania, 2020, Online Edition, Oral Presentations, Book of Abstracts, NT05, Page 23  
[https://www.newtech2020.ugal.ro/pages/NEWTECH2020\\_Booklet.pdf](https://www.newtech2020.ugal.ro/pages/NEWTECH2020_Booklet.pdf)

2. Gheonea, M. C., **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., Teodor, V., *Influence of marine corrosion on the roughness of the dry hyperbaric underwater MAG welding joints*, The 6<sup>th</sup> International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, NEWTECH-2020, September, 09-11<sup>th</sup>, Galati, Romania, 2020, Online Edition, Oral Presentations, Book of Abstracts, NT06, Page 23  
[https://www.newtech2020.ugal.ro/pages/NEWTECH2020\\_Booklet.pdf](https://www.newtech2020.ugal.ro/pages/NEWTECH2020_Booklet.pdf)

3. **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., Birsan, D. C., Gheonea, M. C., *Researches on the thermal fields analysis at MAG-M mechanized butt welding with solid wire*, 12<sup>th</sup> European Symposium on Thermal Analysis & Calorimetry (ESTAC12), Brasov, Romania, 2018, Book of Abstracts, Poster Session 2 (PS2.142), ISBN: 978-3-940237-50-7, Page 508, <http://estac12.org/>

4. **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., Gheonea, M. C., *Macroscopic, microscopic and microdurty Vickers HV1 analyzes of MAG-M mechanized deposited welding cords in horizontally position with solid and flux-cored wires*, The 8<sup>th</sup> Conference on Material Science & Engineering, Galati, Romania, 2018, Book of Abstracts, Poster Session (P20), Pages 47-48, <http://www.ugalmat.ugal.ro/Program.html>  
<http://www.ugalmat.ugal.ro/BOOK%20OF%20ABSTRACT-UGALMAT2018%20.pdf>

5. **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., Gheonea, M. C., Mardare, L., Benea, L., *Analysis of corrosion resistance of EH 36 and butt welded joints in sea water, with solid and flux-cored wires*, The 8<sup>th</sup> Conference on Material Science & Engineering, Galati, Romania, 2018, Book of Abstracts, Poster Session (P21), Page 48, <http://www.ugalmat.ugal.ro/Program.html>  
<http://www.ugalmat.ugal.ro/BOOK%20OF%20ABSTRACT-UGALMAT2018%20.pdf>

6. Gheonea, M. C., **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., Mardare, L., Benea, L., *Influence of seawater on submerged dry hyperbaric welded joints, with solid and flux-cored wires*, Conference on Material Science & Engineering, The 8<sup>th</sup> Conference on Material Science & Engineering, Galati, Romania, 2018, Book of Abstracts, Poster Session (P22), Page 49, <http://www.ugalmat.ugal.ro/Program.html>  
<http://www.ugalmat.ugal.ro/BOOK%20OF%20ABSTRACT-UGALMAT2018%20.pdf>

7. Gheonea, M. C., Mihailescu, D., **Florescu, S. N.**, *Research on dry hyperbaric underwater mechanized MAG-M welding with ecological cored wire*, Conference on Material Science & Engineering, with solid and flux-cored wires, The 8<sup>th</sup> Conference on Material Science & Engineering, Galati, Romania, 2018, Book of Abstracts, Poster Session (P23), Page 49, <http://www.ugalmat.ugal.ro/Program.html>  
<http://www.ugalmat.ugal.ro/BOOK%20OF%20ABSTRACT-UGALMAT2018%20.pdf>

8. Mardare, L., Benea, L., **Florescu, S. N.**, Mihailescu, D., *Corrosion behavior in Black Sea water of welded joints processed on EH 36 naval steel after bending deformation with root compression*, Conference on Material Science & Engineering, with solid and flux-cored wires, The 8<sup>th</sup> Conference on Material Science & Engineering, Galati, Romania, 2018, Section I: Advanced

**E. Articole științifice prezentate oral sau poster la conferințe naționale: 4 prim autor**

1. Florescu, S. N., Mihăilescu, D., Gheonea, M. C., *Experimental research on the behavior of EH 36 naval steel at the MAG-M mechanized butt welding*, The 12<sup>th</sup> Conference Galati Naval Architecture, GNA-2019, 2019, Faculty of Naval Architecture, "Dunarea de Jos" University of Galati, Scientific Papers Presentations, <https://www.gna.ugal.ro/preliminary.php>

2. Florescu, S. N., Mihăilescu, D., *Experimental research on mechanized welding MAG-M in narrow gap*, Scientific Conference of Doctoral Schools, Perspectives and challenges in doctoral research!, 6<sup>th</sup> Edition of CSSD-UDJG, 2018, Galați, Poster Session, Section 1, Advanced Research in Mechanical and Industrial Engineering (PP.1.19), Page 149, [http://www.cssd-udjg.ugal.ro/files/2018/05\\_Program\\_detaliat\\_al\\_conferintei\\_2018.pdf](http://www.cssd-udjg.ugal.ro/files/2018/05_Program_detaliat_al_conferintei_2018.pdf) (Premiul III).

3. Florescu, S. N., Mihăilescu, D., *Stand for data acquisition on field thermal stresses and deformation to the mechanized welding MAG-M*, Scientific Conference of Doctoral Schools, Perspectives and challenges in doctoral research!, 5<sup>th</sup> Edition of CSSD-UDJG, 2017, Galați, Poster Session, Section 1, Advanced Research in Mechanical Engineering, Industrial Engineering, Electrical Engineering and Systems Engineering (PP.1.3), Page 19, [http://www.cssd-udjg.ugal.ro/files/2017/Program\\_detaliat\\_al\\_conferintei\\_2017\\_FINAL.pdf](http://www.cssd-udjg.ugal.ro/files/2017/Program_detaliat_al_conferintei_2017_FINAL.pdf) (Premiul II).

4. Florescu, S. N., *GeoEcoMar research marine infrastructures*, Scientific Conference of Doctoral Schools, Perspectives and challenges in doctoral research!, 5<sup>th</sup> Edition of CSSD-UDJG, 2017, Galați, Poster Session, Section 4, Advanced Investigation Methods in Environment and Biohealth (PP.4.17), Page 22, [http://www.cssd-udjg.ugal.ro/files/2017/Program\\_detaliat\\_al\\_conferintei\\_2017\\_FINAL.pdf](http://www.cssd-udjg.ugal.ro/files/2017/Program_detaliat_al_conferintei_2017_FINAL.pdf)

**F. Citări în articole publicate în reviste cotate ISI și indexate în ISI Proceedings: 2**

**1. Citare în articol publicat în revistă cotată ISI**

1. Gheonea M. C., Mihailescu D., Florescu, S. N., Scutelnicu, E., *Experimental research on melting and deposition characteristics of wires during Gas Metal Arc Welding*, ModTech2018 International Conference, Modern Technologies in Industrial Engineering, June 13 - 16, 2018, Constanta, Romania, Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Volume: 400, Article Number: 022027, DOI: 10.1088/1757-899X/400/2/022027, Accession Number: WOS:000461147400027, ISSN: 1757-8981, [https://apps.webofknowledge.com/full\\_record.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&qid=4&SID=D4QvZaeJB69kqV1lxxC&page=1&doc=4](https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=4&SID=D4QvZaeJB69kqV1lxxC&page=1&doc=4)

A fost citată la poziția 8 în:

Gupta, S. K., Raja, A. R., Vashista, M., *Effect of heat input on microstructure and mechanical properties in gas metal arc welding of ferritic stainless steel*, Materials Research Express, Volume: 6 Issue: 3, Article Number: 036516, Published: Mar 2019, DOI: 10.1088/2053-1591/aaf492, Impact Factor 2018 = 1.449, Q3, Accession Number: WOS: 000453353100002, [https://apps.webofknowledge.com/CitingArticles.do?product=WOS&REFID=568498511&SID=D4QvZaeJB69kqV1lxxC&search\\_mode=CitingArticles&parentProduct=WOS&parentQid=4&parentDoc=4&excludeEventConfig=ExcludelfFromFullRecPage](https://apps.webofknowledge.com/CitingArticles.do?product=WOS&REFID=568498511&SID=D4QvZaeJB69kqV1lxxC&search_mode=CitingArticles&parentProduct=WOS&parentQid=4&parentDoc=4&excludeEventConfig=ExcludelfFromFullRecPage)

**2. Citare în articol publicat indexat în ISI Proceedings sau în revistă BDI**

1. Gheonea M. C., Mihailescu D., Florescu, S. N., Scutelnicu, E., *Experimental research on melting and deposition characteristics of wires during Gas Metal Arc Welding*, ModTech 2018 International Conference, Modern Technologies in Industrial Engineering, June 13 - 16, 2018, Constanta, Romania, Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, Volume: 400, Article Number: 022027, DOI: 10.1088/1757-899X/400/2/022027, Accession Number: WOS:000461147400027, ISSN: 1757-8981, [https://apps.webofknowledge.com/full\\_record.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&qid=4&SID=D4QvZaeJB69kqV1lxxC&page=1&doc=4](https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=4&SID=D4QvZaeJB69kqV1lxxC&page=1&doc=4)

A fost citată la poziția 5 în:

Gupta, S. K., Mehrotra, S., *Effect of welding speed on weld bead geometry and percentage*

*dilution in Gas Metal Arc Welding of SS409L*, Materials Today-Proceedings, Volume: 18, Part: 7, 2019, Pages 5032-5039, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.497>, WOS:000499475200350, [https://apps.webofknowledge.com/full\\_record.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&qid=7&SID=D1pAtYTFN9SwrV2uwL1&page=1&doc=1](https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=7&SID=D1pAtYTFN9SwrV2uwL1&page=1&doc=1)

**G. Rapoarte științifice susținute în perioada de pregătire doctorală: 3**

1. **Florescu, S. N.**, *Raport de Documentare, Stadiul actual al cercetărilor privind sudarea mecanizată MAG în condiții de montaj a învelișului navei*, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 2017.

2. **Florescu, S. N.**, *Raport Științific nr. 2, Cercetări experimentale privind comportarea oțelului naval EH 36 la sudarea mecanizată cap la cap MAG*, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 2018.

3. **Florescu, S. N.**, *Raport Științific nr. 3, Cercetări privind determinarea experimentală a câmpurilor termice și a stărilor de tensiuni și deformații la sudarea mecanizată cap la cap MAG*, Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, 2020.

Septembrie 2020

Ing. Ștefan Nabi FLORESCU

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [13] \*\*\* *Welding positions for groove welds*, Hebei Lufeng Piping Equipment Company, 2015, ISSN: 0921-5093.
- [17] Asibeluo, I. S., Emifoniye, E., *Effect of arc welding current on the mechanical properties of A36 carbon steel weld joint*, SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME), Volume V2, 2015, Issue 9, Pages 79-88, ISSN: 2348-83607.
- [18] Conrardy, C., *Gas Metal Arc Welding-Welding fundamentals and processes*, ASM Handbook, ASM International, Volume 6A, 2011, Pages 309-317, ISBN:978-1-62708-174-0.
- [19] DeOilers, B., Lupian, N., Rumph, R., Granados, V., *Welding procedure qualification of A36 steel plates using the GTAW and GMAW processes*, 2016, ISSN: 1033-4378.
- [27] Timings, R., *Fabrication and welding engineering*, NEWNES Press imprint of Elsevier, Oxford, USA, 2008, ISBN 10: 0-7506-6691-9, ISBN 13: 978-0-7506-6691-6.
- [30] Weman, K., *Welding processes handbook*, Woodhead Publishing Ltd. and CRC Press. LLC, Cambridge, England, 2003, ISBN: 1-85573-689-6, ISBN: 0-8493-1773-8.
- [75] Fanrong Kong, Junjie Ma, Radovan Kovacevic, *Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 211, 2011, Pages - 66 --1111, ISSN: 0924-0136.
- [76] Jiang, W., Xu, X. P., Gong, J. M., Tu, S. T., *Influence of repair length on residual stress in the repair weld of a clad plate*, Nuclear Engineering and Design, Volume 246, 2012, Pages 211-219, ISSN: 0029-5493.
- [77] Jiang, W., Luo, Y., Zhang, G., Tu, S. T., *Experimental to study the effect of multiple weld-repairs on microstructure, hardness and residual stress for a stainless steel clad plate*, Materials & Design, Volume 51, 2013, Pages 1052-1059, ISSN Online: 2331-4249.
- [78] Šarga, P., Menda, F., *Comparison of ring-core method and hole-drilling method used for determining residual stresses*, American Journal of Mechanical Engineering, Volume 1, No. 7, 2013, Pages 335-338, ISSN (Print): 2328-4102, ISSN (Online): 2328-4110.
- [79] Gray, T., Camilleri, D., McPherson, N., *Control of welding distortion in thin-plate fabrication: Design support exploiting computational simulation*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2014, ISSN: 2041-3076.
- [80] Pham Son Minh, Tran Viet Phu, *Study on the structure deformation in the process of Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, American Journal of Mechanical Engineering, Volume 2, No. 4, 2014, Pages 120-124, ISSN: 1738494X.
- [81] Pasternak, H., Launert, B., Krausche, T., *Welding of girders with thick plates - Fabrication, measurement and simulation*, Journal of Constructional Steel Research, Volume 115, 2015, Pages 407-416, ISSN: 0346-251X.
- [82] Chen, B. Q., Hashemzadeh, M., Garbatov, Y., Guedes Soares, C., *Numerical and parametric modeling and analysis of weld-induced residual stresses*, International Journal of Mechanical and Material in Design, Volume 11, 2015, Pages 439-453, Online ISSN: 1528-896X, Print ISSN: 0892-7219.
- [83] Wang, J., Yuan, H., Ma, N., Murakawa, H., *Recent research on welding distortion prediction in thin plate fabrication by means of elastic FE computation*, Marine Structures, Volume 47, 2016, Pages 42-59, ISSN: 0951-8339.
- [84] Guangming, F., Marcelo, I. L., Menglan, D., Segen, F. E., *Influence of the welding sequence on residual stress and distortion of fillet welded structures*, Marine Structures, Volume 46, 2016, Pages 30-55, ISSN: 0951-8339.
- [85] Yi, M. S., Kim, S. H., Kim, S. J., Seo, J. K., Paik, J. K., *Development of an empirical formula for predicting weld-induced initial deflection in steel stiffened-plate structures: Numerical and experimental studies*, 2017, ISSN: 1744-5302.
- [87] Chen, B. Q., Hashemzadeh, M., Garbatov, Y., Guedes Soares, C., *Numerical and parametric modeling and analysis of weld-induced residual stresses*, International Journal of Mechanical and Material in Design, Volume 11, 2015, Pages 439-453, ISSN: 1569-1713.

- [91] Myung Su Yi, Chung Min Hyun, Jeom Kee Paik, *Three-dimensional thermo-elastic-plastic finite element method modeling for predicting weld-induced residual stresses and distortions in steel stiffened-plate structures*, World Journal of Engineering and Technology, Volume 6, 2018, Pages 176-200, ISSN Online: 2331-4249, ISSN Print: 2331-4222.
- [96] Gannon, L., Liu, Y., Pegg, N., Smith, M. J., *Nonlinear collapse analysis of stiffened plates considering welding-induced residual stress and distortion*, Ships and Offshore Structures, Volume 11, 2015, Pages 228-244, ISSN: 1744-5302.
- [101] Alipooramirabad, H., Paradowska, A., Ghomashchi, R., Reid, M., *Investigating the effects of welding process on residual stresses, microstructure and mechanical properties in HSLA steel welds*, Journal of Manufacturing Processes, Volume 28, 2017, Pages 70-81, ISSN: 1024-1752.
- [102] Suo Li, Sendong Rena, Yanbin Zhanga, Dean Denga, Hidekazu Murakawab, *Numerical investigation of formation mechanism of welding residual stress in P92 steel multi-pass joints*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 244, 2017, Pages 240-252, ISSN: 0346-251X.
- [103] Myung Su Yi, Chung Min Hyun, Jeom Kee Paik, *Three-dimensional thermo-elastic-plastic finite element method modeling for predicting weld-induced residual stresses and distortions in steel stiffened-plate structures*, World Journal of Engineering and Technology, Volume 6, 2018, Pages 176-200, ISSN Print: 2331-4222, ISSN Online: 2331-4249.
- [108] Marcus, P., Maurice, V., *Materials Science and Engineering, Vol. II, Fundamental aspects of corrosion of metallic materials*, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), Edited by Rees D. Rawlings, EOLSS Publishers/UNESCO, 2009, Pages 99-103, ISBN: 978-1-84826-032-0.
- [111] Sastri, V. S., *Challenges in corrosion: Costs, causes, consequences and control*, John Wiley & Sons, Wiley Series in Corrosion, Ottawa, Ontario, Canada, 2015, ISBN: 978-1-118-52210-3.
- [113] Shaw, B. A., Kelly, R. G., *What is corrosion?*, Electrochemical Society Interface, Spring, Volume 15, No. 1, 2006, Pages 24-26, ISSN: 1064-8208.
- [116] \*\*\* *DNV-RP-B101*, Recommended practice Det Norske Veritas - Corrosion protection of floating production and storage units, Høvik, Nornay, 2007.
- [117] \*\*\* *Rule Note NI 607 DNI R00 E*, Bureau Veritas - Guidelines for corrosion protection applicable to inland navigation vessels, Belgium, 2013.
- [121] \*\*\* *Dry Dock Coating Report Mare Nigrun*, AkzoNobel, Imo Number 7119408, 03.06.2017.
- [135] Ragu Nathan, S., Balasubramanian, V., Malarvizhi, S., Rao, A. G., *Effect of welding processes on mechanical and microstructural characteristics of high strength low alloy naval grade steel joints*, Defence Technology, Volume 11, 2015, Pages 308-317, ISSN: 2214-9147.
- [136] Qusay Adel Al-Kaseasbeh, *Electrochemical investigation of corrosion resistance of weldments in steel bridges*, A Thesis Submitted to the Graduate Faculty of the North Dakota State University of Agriculture and Applied Science, In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science, 2015, ISSN: 0749-5536.
- [137] Haumesser, P. H., *Nucleation and growth of: From thin films to nanoparticles*, Technology & Engineering, 2016, Pages 72-106, ISBN: 9780081012031.
- [138] Byju John, Sathiya Paulraj, Jolly Mathew, *The role of shielding gas on mechanical, metallurgical and corrosion properties of corten steel welded joints of railway coaches using GMAW*, Advances in Science and Technology Research Journal, Volume 10, No. 32, 2016, Pages 156-168, ISSN: 1662-0356.
- [140] D. de la Fuente, Alcántara, J., Chico, B., Díaz, I., Jiménez, J. A., Morcillo, M., *Characterisation of rust surfaces formed on mild steel exposed to marine atmospheres using XRD and SEM/Micro-Raman techniques*, Corrosion Science, Volume 110, 2016, Pages 253-264, ISSN: 0010-938X.
- [141] Gretchen J. Swarra, Tristan Kadinga, Carl H. Lamborga, Chad R. Hammerschmidt, Katlin L. Bowman, *Dissolved low-molecular weight thiol concentrations from the U.S. Geotraces North Atlantic Ocean zonal transect*, Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, Volume 116, 2016, Pages 77-87, ISSN: 0967-0637.
- [142] Fytianos, G., Ucara, S., Grimstvedt, A., Svendsena, H. F., Knuutila, H., *Corrosion evaluation of MEA solutions by SEM-EDS, ICP-MS and XRD*, Energy Procedia, Volume 86, 2016, Pages 197-204, ISSN: 1876-6102.
- [147] Maina Portella Garcia, Gerson Luiz Mantovani, R. Vasant Kumar, Renato Altobelli Antunes,

- Corrosion behavior of Metal Active Gas Welded Joints of a High-Strength Steel for automotive application*, Journal of Materials Engineering and Performance, Published online: 06 September 2017, ISSN: 1059-9495.
- [148] Jagadesh Kumar, J., Diwakar, G., Satyanarayana, V. V., *Corrosion fatigue of welded joints in marine and naval structures: A Review*, International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), Volume 7, 2017, Issue 6, Pages 155-162, ISSN (P): 2249-6890; ISSN (E): 2249-8001.
- [150] Kirchgeorg, T., Weinberg, I., Hörnig, M., Baier, R., Schmid, M. J., Brockmeyer, B., *Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment*, Marine Pollution Bulletin, Volume 136, 2018, Pages 257-268, ISSN: 0010938X.
- [151] Beeharry, P., Surnam, B.Y.R., *Athmospheric corrosion of welded mild steel*, Materials Today: Proceedings, Volume 5, 2018, Pages 7476-7485, ISSN: 0883-0355.
- [152] Sajid, H. U., Kiran, R., *Influence of corrosion and surface roughness on wettability of ASTM A36 steels*, Journal of Constructional Steel Research, Volume 144, 2018, Pages 310-326, ISSN: 0143-974X.
- [153] Pradhan, D., Mahobia, G. S., Chattopadhyay, K., Singh, V., *Effect of surface roughness on corrosion behavior of the superalloy IN718 in simulated marine environment*, Journal of Alloys and Compounds, Volume 740, 2018, Pages 250-263, ISSN: 1854-6250.
- [154] Gang Wang, Qing Wu, Xue-Zhong Li, Jun Xu, Yao Xu, Wen-Hao Shi, Shi-Lin Wang, *Microscopic analysis of steel corrosion products in seawater and sea-sand concrete*, Materials, MDPI, Basel, Switzerland, 2019, ISSN: 2073-4441.
- [155] Hagen, C. M. H., Hognestad, A., Knudsen, O., Sorby, K., *The effect of surface roughness on corrosion resistance of machined and epoxy coated steel*, Progress in Organic Coatings, Volume 130, 2019, Pages 17-23, ISSN: 0300-9440.
- [157] Abioye, T. E., Ariwoola, O. E., Ogedengbe, T. I., Farayibi, P. K., Gbadeyan, O. O., *Effects of welding speed on the microstructure and corrosion behavior of dissimilar Gas Metal Arc Weld joints of AISI 304 stainless steel and low carbon steel*, Materials Today: Proceedings, Volume 17, 2019, Pages 871-877, ISSN: 0010-938X.
- [160] Choi, Y. Y., Lee, S. H., Park, J. C., Choib, J. C., Yoon, Y. S., *The impact of corrosion on marine vapour recovery systems by VOC generated from ships*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Volume 11, 2019, Pages 52-58, ISSN: 2092-6782.
- [161] Hagen, C. M. H., Hognestad, A., Knudsen, O., Sorby, K., *The effect of surface roughness on corrosion resistance of machined and epoxy coated steel*, Progress in Organic Coatings, Volume 130, 2019, Pages 17-23, ISSN (Print): 1854-6250, ISSN (Online): 1855-6531.
- [164] Weifeng Xie, Te Huang, Chunli Yang, Chenglei Fan, Sanbao Lin, Wanghui Xu, *Comparison of microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of Gas Metal Arc (GMA) and Ultrasonic-wave-assisted GMA (UGMA) welded joints of Al-Zn-Mg alloy*, Journal of Materials Processing Tech., Volume 277, 2020, ISSN: 0924-0136.
- [168] Higgins, R., Bolton, B., *Materials for engineers and technicians*, Newnes Press, Oxford, USA, 2010, ISBN 13: 978-1-85617-769-6.
- [202] \*\*\* *Lloyd's Register*, Rules for the manufacture, testing and certification of materials, July 2018.
- [216] Youmin Rong, Gaoyang Mi, Jiajun Xu, Yu Huang, *Laser penetration welding of ship steel EH 36: A new heat source and application to predict residual stress considering martensite phase transformation*, Marine Structures, Volume 61, 2018, Pages 256-267, ISSN: 0951-8339.
- [217] Youmin Rong, Ting Lei, Jiajun Xu, Yu Huang, Chunming Wang, *Residual stress modelling in laser welding marine steel EH 36 considering a thermodynamics-based solid phase transformation*, International Journal of Mechanical Sciences, Volume 146-147, 2018, Pages 180-190, ISSN: 0020-7403.