



FONDUL SOCIAL EUROPEAN

Investește în oameni!

Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Proiect POSDRU/187/1.5/S/155420 - Promovarea științei și calității în cercetare prin burse doctorale (PROSCIENCE)



UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI

Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

OPTIMIZAREA TEHNOLOGIILOR DE REPARARE PRIN SUDARE LA ÎMBINĂRI CU ACCESIBILITATE REDUSĂ

Doctorand: Ing. Florina IONESCU

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof.univ.dr.ing. Marian GHEORGHE	de la	Universitatea "POLITEHNICA" din București
Conducător de doctorat	Prof.univ.dr.ing. Gheorghe SOLOMON	de la	Universitatea "POLITEHNICA" din București
Referent	Prof.univ.dr.ing. Theodor MACHEDON PISU	de la	Universitatea "Transilvania" din Brașov
Referent	Prof.univ.dr.ing. Dănuț MIHĂILESCU	de la	Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
Referent	Prof.univ.dr.ing. Ionelia VOICULESCU	de la	Universitatea "POLITEHNICA" din București

București, 2020

CUVÂNT ÎNAINTE

În perioada de desfășurare a activităților necesare realizării acestei teze de doctorat am beneficiat de îndrumarea, încrederea, sfaturile și sprijinul moral al conducătorului științific, Prof.univ.dr.ing. Gheorghe SOLOMON, de ajutorul și colaborarea cadrelor didactice și personalului tehnic al Facultății de Inginerie Industrială și Robotică din cadrul Universității Politehnica din București: Prof.univ.dr.ing. Ionelia VOICULESCU, Prof.univ.dr.ing. Alexandrina MIHAI, Prof.univ.dr.ing. Irina SEVERIN, Conf.univ.dr.ing. Gabriel GÂRLEANU, Conf.univ.dr.ing. Dumitru Titi CICIC, Conf.univ.dr.ing. Corneliu RONTESCU, Șef lucr.dr.fiz. Gabriela MATEIAȘI, care m-au ajutat la realizarea programelor experimentale ce au necesitat utilizarea unor echipamente și aplicații specializate și mi-au dat, cu ocazia susținerii rapoartelor de cercetare (referatelor de doctorat), multiple și consistente sugestii privind conținutul tezei și, nu în cele din urmă, am beneficiat de suportul moral și dragostea familiei mele. Tuturor acestora le adresez cele mai calde mulțumiri și îi asigur de întreaga mea recunoștință.

Întrucât cercetările efectuate în cadrul tezei de doctorat au fost cofinanțate pe o perioadă de 6 luni din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013, Proiect POSDRU/187/1.5/S/155420 – Promovarea științei și calității în cercetare prin burse doctorale, doresc să le aduc mulțumiri coordonatorului și întregii echipe a proiectului pentru oportunitatea oferită.

Florina Ionescu

CUPRINS

CUPRINS	2
LISTA TABELELOR	4
LISTA FIGURILOR	5
LISTA RELAȚIILOR MATEMATICE.....	8
LISTA DE ABREVIERI.....	9
CUVÂNT ÎNAINTE	11
INTRODUCERE.....	12
<i>CAPITOLUL I. STADIUL ACTUAL AL REPARAȚIILOR PRIN SUDARE ÎN ZONELE CU ACCES LIMITAT</i>	14
1.1 SCHIMBĂTOARE DE CĂLDURĂ.....	14
1.1.1. Definiție. Caracteristici. Rol funcțional	14
1.1.2. Clasificarea schimbătoarelor de căldură	15
1.1.3. Materiale de bază utilizate în construcția schimbătoarelor de căldură.....	18
1.1.4. Schimbătoare de căldură spirală.....	19
1.2. PROCEDEE DE SUDARE FOLOSITE.....	22
1.2.1. Procedeul de sudare WIG (Wolfram Inert Gas).....	22
1.2.1.1. Principiu, caracteristici, domeniu de aplicare	22
1.2.1.2. Materiale pentru sudare.....	23
1.2.2. Procedeul de sudare MIG (Metal Inert Gas).....	26
1.2.2.1. Principiu, caracteristici, domeniu de aplicare	26
1.2.2.2. Materiale pentru sudare.....	28
1.3. CONCLUZII.....	29
<i>CAPITOLUL II. CERCETĂRI PRIVIND TEHNOLOGIILE DE SUDARE ALE SCHIMBĂTOARELOR DE CĂLDURĂ ȘI ANALIZA FUNCȚIONĂRII SCHIMBĂTOARELOR DE CĂLDURĂ</i>	31
2.1. SOLICITĂRILE LA CARE SUNT SUPUSE SCHIMBĂTOARELE DE CĂLDURĂ ...	31
2.1.1. Coroziunea.....	31
2.1.2. Cavitația.....	32
2.2. TEHNOLOGIA DE SUDARE A SCHIMBĂTOARELOR DE CĂLDURĂ SPIRALĂ ..	35
2.2.1. Tehnologia actuală.....	35
2.2.2. Probleme apărute	35
2.3. POSIBILITĂȚI DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A CALITĂȚII REPARAȚIILOR	37
2.3.1. Trusa laparoscopică	37
2.3.2. Metode de evaluare a calității	38
2.3.2.1. Examinarea distructivă a îmbinărilor sudate	38
2.3.2.2. Examinarea nedistructivă a îmbinărilor sudate	39
2.4. CONCLUZII	43
<i>CAPITOLUL III. METODOLOGIA DE CERCETARE-DEZVOLTARE</i>	43
3.1. DIRECȚII DE CERCETARE-DEZVOLTARE	43
3.2. OBIECTIVELE ACTIVITĂȚII DE CERCETARE-DEZVOLTARE.....	44
3.3. METODOLOGIA DE CERCETARE.....	46
<i>CAPITOLUL IV. PROIECTAREA UNUI ECHIPAMENT PENTRU REPARAREA PRIN SUDARE A ÎMBINĂRILOR CU ACCES LIMITAT</i>	47

4.1. CERINȚE DE PROIECTARE	47
4.2. REALIZAREA STANDULUI DE REPARARE PRIN SUDARE	47
4.2.1. Videoendoscop	49
4.2.2. Sursa de sudare	49
4.2.3. Pistolet	50
4.2.3.1. Cerințe de proiectare ale pistolului	50
4.2.3.2. Elementele de dificultate ale problemei	50
4.2.3.3. Obiective	51
4.2.3.4. Impact	51
4.2.3.5. Proiectarea modelului de pistol îmbunătățit	51
4.2.3.6. Realizarea practică a pistolului	55
4.3. CONCLUZII	58
 <i>CAPITOLUL V. CERCETĂRI ȘI CONTRIBUȚII PRIVIND RECONDIȚIONAREA PRIN SUDARE A SCHIMBĂTOARELOR DE CĂLDURĂ CONFEȚIONATE DIN OȚEL INOXIDABIL AUSTENITIC (X2CRNIMO17-12-2)</i>	
5.1. PROIECTAREA ȘI REALIZAREA PROBELOR	59
5.1.1. Date de intrare	59
5.1.2. Materialul de bază	59
5.1.3. Materialul de adaos	60
5.1.4. Alegerea procedurii de reparare prin sudare	61
5.1.5. Proiectarea și realizarea probelor	61
5.2. CONCLUZII	66
 <i>CAPITOLUL VI. EVALUAREA CALITĂȚII REPARAȚIILOR EFECTUATE CU ECHIPAMENTUL PROIECTAT</i>	
6.1. EXAMINAREA NEDISTRUCTIVĂ A PROBELOR	67
6.1.1. Examinarea vizuală	67
6.1.2. Examinarea cu lichide penetrante	75
6.1.3. Examinarea cu radiații penetrante	81
6.2. EXAMINAREA DISTRUCTIVĂ. PLAN EXPERIMENTAL	84
6.2.1. Pregătirea probelor	85
6.2.2. Analiza datelor experimentale rezultate în urma testelor distructive	89
6.2.2.1. Analiza prin microscopie optică	89
6.2.2.2. Analiza prin microscopie electronică SEM	103
6.2.3. Determinarea durității materialului	109
6.3. CONCLUZII	113
 <i>CAPITOLUL VII. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE</i>	
7.1. CONCLUZII FINALE	115
7.2. CONTRIBUȚII PERSONALE	116
7.3. DIRECȚII DE DEZVOLTARE	117
BIBLIOGRAFIE	119
ANEXA 1. BULETIN EXAMINARE CU RADIAȚII PENETRANTE	127
ANEXA 2. ANALIZA METALOGRAFICĂ	129
ANEXA 3. RAPORT MICRODURITATE	141

INTRODUCERE

În prezenta lucrare, se prezintă metodele pentru optimizarea tehnologiilor de reparare prin sudare a schimbătoarelor de căldură spirală, ce presupun îmbinări cu accesibilitate redusă, realizate din oțel inoxidabil austenitic (X2CrNiMo17-12-2), dezvoltarea unor dispozitive adaptate condițiilor de sudare în zone greu accesibile (stand experimental, pistol de sudare) ce pot fi utilizate în acest demers și folosirea metodelor de examinare distructivă și nedistructivă necesare pentru aprecierea calității acestora.

Această teză de doctorat a fost dezvoltată pentru rezolvarea unor probleme tehnologice ridicate de beneficiari industriali, pentru efectuarea de reparații a schimbătoarelor de căldură spiralate și cu țevi și astfel s-a dezvoltat conceptul sudării laparoscopice, utilizând procedeul WIG cu un pistol de sudare îmbunătățit.

Sudarea WIG - Laparoscopică, este necesară pentru asamblarea/repararea diferitelor componente metalice la care accesul fizic este foarte limitat sau imposibil, interstiții sub 25 mm coroborat cu distanța mare între operator și zona sudată (0,1 – 1 m). Din punct de vedere științific, realizarea unui astfel de echipament și a tehnologiei aferente, reprezintă o noutate la nivel mondial.

Un astfel de echipament ar fi util în diferite domenii ingineresti cum ar fi aviație (structură/tren de rulare - sunt zone inspectate periodic cu ajutorul endoscoapelor însă nu se poate interveni pentru că nu există acces), termotehnică (schimbătoarele de căldură, indiferent de tipul constructiv, cu țevi, cu plăci sau spirală unde elementele constructive nu se pot repara local și trebuie înlocuite), instalații industriale (trasee de țevi), construcții metalice de orice tip (hale, clădiri, poduri, vapoare etc), industria auto (construcție sau reparație), centrale termice.

Lucrarea este structurată în 7 capitole ce descriu cercetările efectuate în vederea optimizării tehnologiilor de reparare prin sudare a îmbinărilor cu accesibilitate redusă, atenția fiind concentrată în special asupra reparației schimbătoarelor de căldură spirală.

În primul capitol al tezei, intitulat “Stadiul actual al reparațiilor prin sudare în zonele cu acces limitat”, sunt prezentate aspecte teoretice privind caracteristicile, rolul funcțional, clasificarea și materialele de bază utilizate în construcția schimbătoarelor de căldură. În cea de-a doua parte a capitolului sunt analizate și descrise procedeele de sudare folosite la reparațiile în zonele cu acces limitat: procedeul de sudare WIG (Wolfram Inert Gas) și procedeul de sudare MIG (Metal Inert Gas).

În capitolul al doilea, cu titlul “Cercetări privind tehnologiile de sudare ale schimbătoarelor de căldură și analiza funcționării schimbătoarelor de căldură”, sunt prezentate și analizate principalele solicitări la care sunt supuse schimbătoarele de căldură: coroziunea și cavitația și efectele acestora. Este descrisă tehnologia actuală de sudare a schimbătoarelor de căldură spirală și problemele asociate acesteia. De asemenea cuprinde analiza trusei medicale laparoscopice în vederea posibilității realizării conceptului de sudare laparoscopică și studiul metodelor de examinare distructivă și nedistructivă a îmbinărilor sudate.

Capitolul al treilea al tezei, intitulat “Metodologia de cercetare-dezvoltare”, este constituit din direcțiile de cercetare – dezvoltare din cadrul prezentei teze, precum și obiectivele acestei lucrări.

În capitolul al patrulea, intitulat “Proiectarea unui echipament pentru repararea prin sudare a îmbinărilor cu acces limitat”, sunt prezentate cerințele de proiectare și realizarea unui stand

experimental de reparare prin sudare. Sunt descrise componentele standului și realizarea practică a unui pistol de sudare îmbunătățit care să răspundă elementelor de dificultate ale problemei.

Cel de-al cincilea capitol al tezei de doctorat are titlul “Cercetări și contribuții privind recondiționarea prin sudare a schimbătoarelor de căldură confecționate din oțel inoxidabil austenitic (X2CrNiMo17-12-2)” și este destinat proiectării și realizării probelor ținând cont de datele de intrare, materialul de bază folosit și alegerea procedurii de reparare prin sudare.

În cel de-al șaselea capitol, cu titlul “Evaluarea calității reparațiilor efectuate cu echipamentul proiectat” sunt prezentate metodele de examinare folosite și rezultatele aplicării acestora asupra probelor realizate. Evaluarea calității punctelor de sudare obținute s-a realizat utilizând metode de examinare nedistructivă a probelor (examinarea vizuală, examinarea cu lichide penetrante, examinarea cu radiații penetrante) și metode de examinare distructivă a probelor (analiza prin microscopie optică, analiza prin microscopie electronică de baleiaj – SEM, determinarea compoziției chimice și determinarea durității materialului).

Ultimul capitol al tezei, capitolul 7, intitulat “Concluzii finale și contribuții personale”, cuprinde o sinteză a concluziilor generale, formulate pe baza studiilor elaborate și experimentelor efectuate, elementele de originalitate ale tezei de doctorat aduse tehnologiilor de sudare la îmbinări cu accesibilitate redusă și direcțiile de dezvoltare pentru cercetările viitoare.

CAPITOLUL I. STADIUL ACTUAL AL REPARAȚIILOR PRIN SUDARE ÎN ZONELE CU ACCES LIMITAT

Schimbătoarele de căldură sunt aparate cu funcție de transfer termic realizând transmiterea căldurii de la un mediu la altul. Acestea joacă un rol esențial în cadrul unor sisteme folosite la scară largă dintre care enumerăm automobilele, instalațiile de încălzire, refrigerare, climatizare, distilare (în industria chimică și petrochimică), în centrale termice, termoficare și ca anexe ale mașinilor termice [14, 15, 41].

Una dintre cele mai cunoscute aplicații ale schimbătoarelor de căldură este radiatorul autovehiculelor unde transferul de căldură se face între apa de răcire a motorului (fluidul cald) și aerul din mediul ambiant. După efectuarea unor studii s-a constatat că mai mult de două treimi din energia primară folosită într-o țară trece prin minim două schimbătoare de căldură. Un exemplu de astfel de schimbător de căldură este prezentat în figura 1.1 [15, 21, 41].

Pentru alegerea schimbătoarelor de căldură trebuie să se ia în considerare următoarele [14, 15, 21, 41, 43]:

- ✓ Materialul de construcție;
- ✓ Temperaturi de operare;
- ✓ Condiții de presiune și debit;
- ✓ Eficiență termică și căderi de presiune;
- ✓ Tendințe de ancrasare;
- ✓ Tipuri de fluid și stare de agregare;
- ✓ Posibilități de mentenanță, inspecție, curățare și reparare;
- ✓ Considerente economice;
- ✓ Tehnica de fabricație.

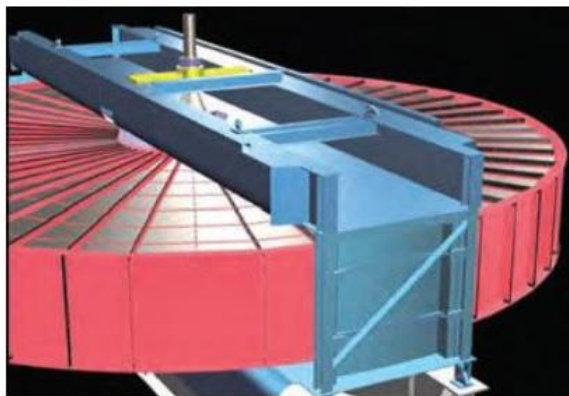


Fig.1 1. Exemplu de schimbător de căldură [21]

Pentru realizarea schimbătoarelor de căldură se folosește de obicei un singur material dar uneori se folosesc și două materiale (exemplu: oțel și aluminiu). La o scară relativ redusă se fac și acoperiri cu plastic împotriva coroziunii. La alegerea materialului pentru confecționare trebuie să se țină cont de proprietățile acestuia dar și de parametrii de lucru (exemplu: temperatură, presiune, agresivitatea agenților termici)[14, 15].

În funcție de modul constructiv-tehnologic de execuție schimbătoarele de căldură sunt clasificate conform tabelului 1.1.

Tabelul 1. 1. Clasificarea în funcție de modul constructiv- tehnologic de execuție [14, 15, 21, 41]

<i>Tip schimbător</i>	<i>Număr treceri</i>	<i>Mod preluare debit</i>	<i>Caracteristici principale</i>
Tubular	O trecere Mai multe treceri	Rigid Semielastic Elastic	Suprafața de transmitere a căldurii este constituită din țevi drepte. Agenții termici execută una sau mai multe treceri. Dilatările dintre suprafața de transmitere a căldurii și corpul exterior nu pot fi compensate la cele rigide, sunt compensate parțial la cele semielastice și total la cele elastice.
Cu serpentină cilindrică sau plană	Mai multe treceri pentru agentul primar	Elastic	Suprafața de transmitere a căldurii este constituită din serpentine de țevi introduse în recipiente (la boilere, rezervoare de încălzire etc.).
Speciale: ✓ cu plăci; ✓ cu nervuri; ✓ cu aripioare; ✓ cu ace; ✓ cu spirale.	Una sau mai multe treceri Circulație mixtă sau încrucișată	Rigid Elastic	Suprafața de transmitere a căldurii are o formă specială; corespunzătoare condițiilor particulare de transmitere a căldurii.

Deoarece activitatea schimbătoarelor de căldură constă în transferul de căldură între diferite medii, materialele preponderant utilizate pentru construcția acestora sunt oțelurile inoxidabile [14, 15, 21, 41].

Oțelurile inoxidabile sunt materiale înalt aliate pe bază de fier, crom și carbon ce conțin și alte elemente (exemplu: Ni, Mo, Si, etc.), la care principala caracteristică este rezistența la coroziune foarte mare în diferite medii chimice sau bio-chimice. Pentru îmbunătățirea comportării la sudare, conținutul de carbon din compoziție este scăzut (la oțelurile inoxidabile austenitice acesta este cuprins în domeniul 0,1-0,01%C) iar cromul este prezent în proporție de peste 12% Cr (procente masice). Adăugarea cromului în compoziția chimică a oțelului inoxidabil contribuie la asigurarea inoxidabilității acestuia, manifestată prin tendință de oxidare foarte scăzută în diferite medii și la diferite temperaturi de utilizare. Cromul formează la suprafața oțelului o peliculă foarte subțire, aderentă și impenetrabilă de oxid, care protejează volumul de material împotriva atacului chimic, capabilă de autoregenerare în condiții de alterare mecanică sau chimică [14, 41, 43].

Schimbătoarele de căldură spirală sunt acele schimbătoare la care suprafața de schimb termic este reprezentată de o bandă rulată în forma unei spirale. Se realizează astfel două canale paralele, câte unul pentru fiecare fluid, oferind suprafață mică de contact cu mediul extern și datorită acestui lucru, avantaje deosebite în aplicațiile la temperaturi extreme. Uzual, înălțimea canalelor este cuprinsă între 5 și 20 mm. Acestea oferă avantaje deosebite în aplicațiile la temperaturi extreme, oferind o suprafață mică de contact cu mediul exterior. Schema de principiu a funcționării unui schimbător de căldură spirală este prezentată în figura 1.2 [21, 41, 43].

De obicei presiunea este limitată la 20 bar din cauza suprafețelor relativ plane, existând însă și construcții care pot fi folosite la presiuni de sute de bar și temperaturi de sute de grade Celsius. Acest tip de schimbător este compact având căderi de presiune mici și poate fi folosit pentru fluide care pot colmata canalele, tipul de curgere favorizând autocurățarea [14, 21, 41].

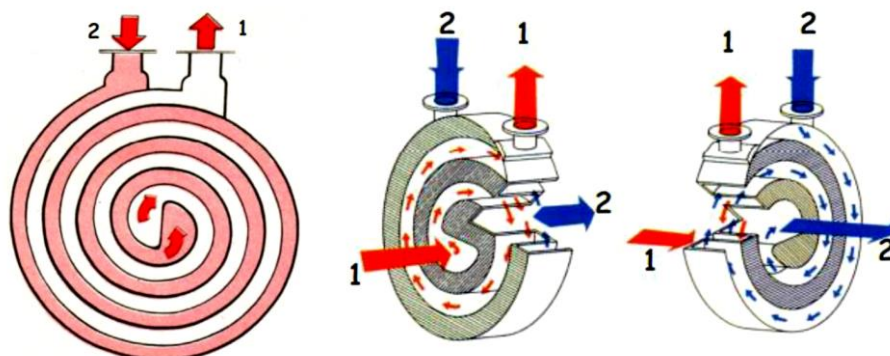


Fig. 1.2. Schema de principiu a unui schimbător de căldură spirală [43]

1, 2 - agent termic care iese, respectiv intră în schimbătorul de căldură (albastru - fluid rece, roșu fluid cald)

Printre avantajele acestui tip de schimbătoare de căldură se numără [14, 15, 21, 43]:

- ✓ Coeficienți mari de transfer termic;
- ✓ Compactitate (A/V mare);
- ✓ Diferențe mici de presiuni;
- ✓ Rezistență la murdărire;
- ✓ Curățare relativ ușoară.

Dezavantaje ale schimbătoarelor de căldură spirală sunt [14, 15, 21, 43]:

- ✓ Fabricație complicată;
- ✓ Presiune de lucru redusă (max. 1.5 MPa);
- ✓ Cost relativ ridicat;
- ✓ Etanșare dificil de realizat.

CAPITOLUL II. CERCETĂRI PRIVIND TEHNOLOGIILE DE SUDARE ALE SCHIMBĂTOARELOR DE CĂLDURĂ ȘI ANALIZA FUNCȚIONĂRII SCHIMBĂTOARELOR DE CĂLDURĂ

În timpul utilizării schimbătorului de căldură apar diferite fenomene de degradare datorate regimului termic, corozivității mediului de lucru, vitezei de curgere a fluidelor, vâscozității și durtății microparticulelor din fluid. În lucrare, au fost analizate fenomenele care generează deformarea sau perforarea peretelui metalic, cum sunt coroziunea și cavitația [25, 26, 27, 30, 39].

Coroziunea erozivă, o formă locală a coroziunii, se întâmplă din cauza mișcării fluidului de-a lungul suprafeței materialului. Aceasta se regăsește pe întreaga suprafață a schimbătorului de căldură, mai puțin fiind expus exteriorul acestuia deoarece nu intră în contract direct cu fluidul aflat în mișcare.

Coroziunea erozivă este accelerată în general atunci când apa care intră în schimbător are în componență aer sau particule solide ca nisipul, dar coroziunea erozivă poate apărea de asemenea atunci când folosim apă filtrată sau lipsită de aer. Cele mai importante din punct de vedere rezistență la coroziunea erozivă sunt filmele de protecție depuse cu anumite materiale sau aliaje [25, 27, 30, 39].

Parametrii care influențează coroziunea erozivă sunt "turbulențele" și parametrii referitori la fluide ca viteză, nivel de particule în suspensie, nivel de bule de aer prezente, presiune parțială locală, cavitație dar și geometria piesei [25, 26, 30]. Câteva imagini care ilustrează astfel de defecte datorate celor două fenomene sunt prezentate în figura 2.1.

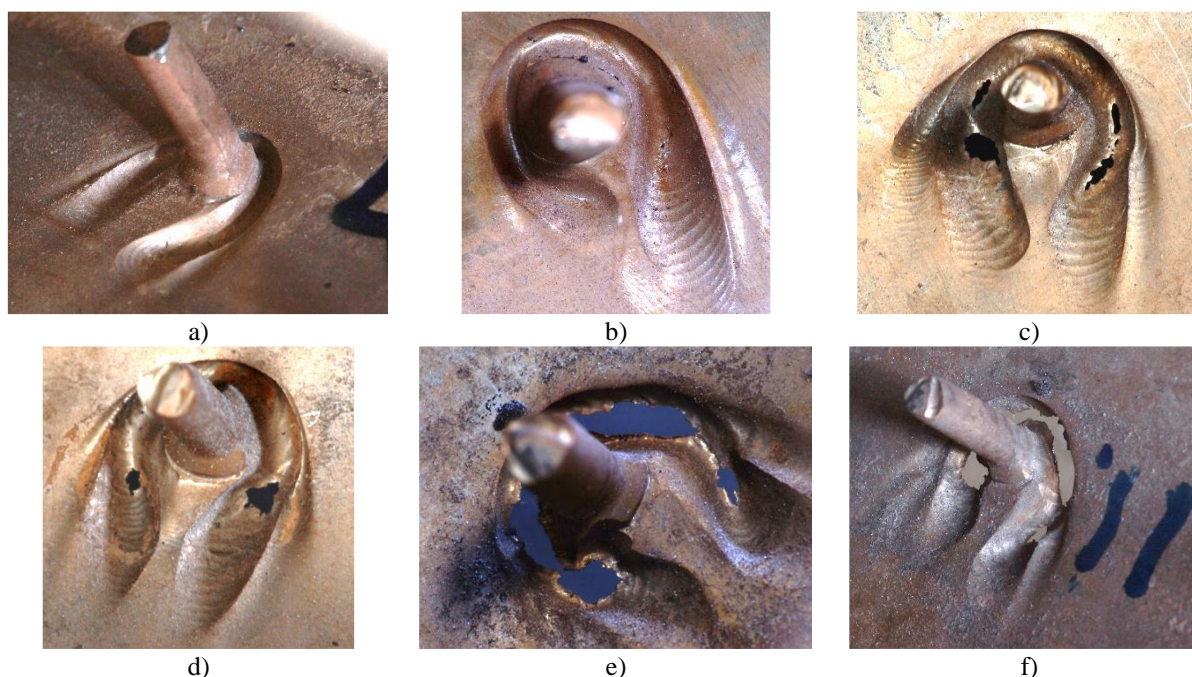


Fig. 2.1. Defecte datorate fenomenelor de coroziune și cavitație [30]

- a), b) – subțierea materialului sub formă de valuri/văi apărute în jurul distanțierului;
 c), d) – lipsă de material sub formă de găuri apărute în jurul distanțierului;
 e), f) – găuri în formă de potcoavă apărute în jurul distanțierului.

Cavitația este fenomenul de producere, într-un curent de lichid, a unui vid parțial unde se formează bule de vapori sau de gaze care, aglomerându-se, determină vibrații și coroziune mecanică, prezentând pericol de distrugere pentru pereții conductei prin care circulă lichidul, pentru paletetele turbinelor (Dex online) [41].

Cavitația, uneori denumită și coroziune de cavitație sau eroziune de cavitație, este procesul dinamic de formare, dezvoltare și implozie a bulelor sau cavitațiilor umplute cu vapori și gaze dintr-un lichid [27, 30, 39].

Printre factorii favorizanți apariției și dezvoltării bulelor cavitaționale enumerăm în primul rând scăderea presiunii dar și impuritățile, microfisurile, creștăturile și corpurile solide care pot fi văzute în figura 2.2 a) și b). Acești factori determină reținerea unor volume microscopice de gaz nedizolvat în lichid creând astfel nuclee sau germeni de cavitație [27, 30, 39].

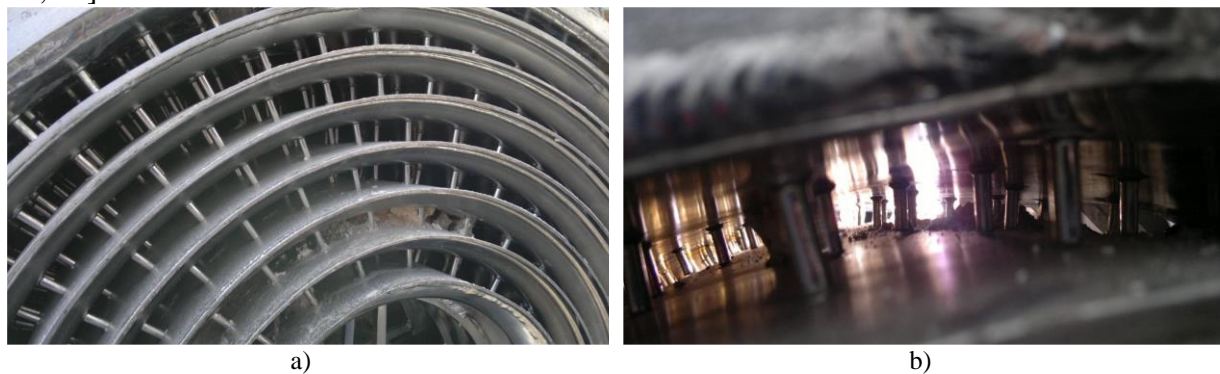


Fig. 2.2. Factori favorizanți fenomenului de cavitație [30]
 a), b) Impurități, corpuri străine situate între spirele schimbătorului de căldură

Metoda de reparare cu decopertare este considerată o problemă din punct de vedere cost, timp și eficiență. Reparația presupune decopertarea, adică decuparea dinspre exterior către interior a foilor (spirelor) schimbătorului până se ajunge la foaia cu defect. Pașii de realizare ai reparației sunt [15, 21, 27, 30, 41]:

- ✓ Identificarea zonei afectate;
- ✓ Decuparea foilor de la exterior la interior până la zona afectată;
- ✓ Repararea propriu-zisă prin sudare;
- ✓ Verificarea reparației realizate;
- ✓ Sudarea decupajelor făcute anterior;
- ✓ Verificarea sudurii decupajelor;
- ✓ Testarea la presiune.

De obicei, cele mai multe defecte sunt localizate pe foile (spirele) aflate către centrul schimbătorului, acolo unde viteza periferică crește foarte mult, datorită micșorării diametrului spirei. Spira de început are un diametru aproximativ de 1 m iar cea de sfârșit de 0.3 m, ceea ce înseamnă o creștere de aproape 3 ori a vitezei periferice de curgere cu implicații majore asupra fenomenului de cavitație [15, 21, 30, 41].

Metoda este facilă din punct de vedere al reparației, dar prezintă mai multe dezavantaje [15, 21, 27, 30, 41]:

- decopertarea foilor bune, care nu au defect, putând apoi prin sudarea ulterioară de închidere să adăugăm defecte schimbătorului de căldură reparat;
- în majoritatea cazurilor, defectele sunt la spira/spirele cu diametru mic, deci cele din interior. Asta înseamnă că vom decoperta mai mult de jumătate din foi (spire) pentru a ajunge la foaia defectă;
- dacă defectele sunt dispuse în mai multe zone pe tot diametrul unei spire și aceasta este poziționată la interiorul schimbătorului, înseamnă ca decopertarea să fie executată de mai multe ori în zone diferite iar costurile reparației sunt foarte mari și nu se justifică. Un astfel de caz unde defectele au fost dispuse pe toată lățimea spirelor aflate către centrul schimbătorului și pe tot diametrul este prezentat în figura 2.3.



a)



b)

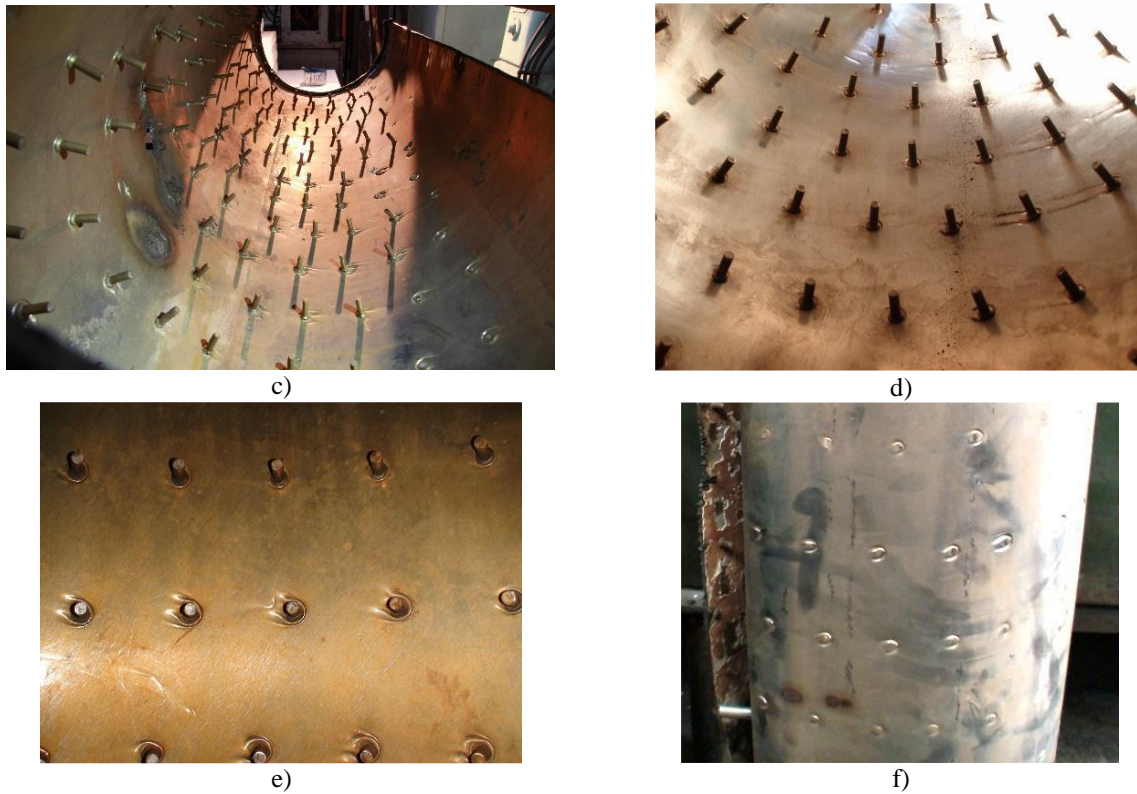


Fig. 2.3. Schimbător de căldură cu defecte pe toată lățimea spirelor, către centrul schimbătorului și pe tot diametrul [30] a), b) imagine de ansamblu a schimbătorului de căldură spirală;
c) spiră decopertată; d), e) valurile/văile create în jurul distanțierelor – pe partea din interior;
f) valurile/văile create în jurul distanțierelor – pe partea din exterior.

În cadrul tezei de doctorat au fost utilizate metodele de îmbunătățire a calității reparațiilor ce constau în crearea unui dispozitiv miniatural pentru efectuarea sudurilor în zone greu accesibile, prin similitudine cu trusa medicală laparoscopică, utilizarea unor oțeluri cu caracteristici de rezistență mecanică sau la coroziune mai mari și utilizarea unor tehnici de examinare nedistructivă cu aparatură specializată.

Făcând o paralelă între repararea prin sudare a îmbinărilor cu accesibilitate redusă și procedura de laparoscopie putem atribui abdomenului caracteristica de spațiu greu accesibil. Cum nici în stomac nu se ajunge cu ușurință, nici în zonele greu accesibile nu se pot realiza facil lucrări de reparare prin sudare.

Laparoscopia este o procedură chirurgicală ce folosește un tub subțire, luminat, numit laparoscop, ce este introdus în abdomen printr-o mică incizie la nivelul peretelui abdominal și care este folosită pentru examinarea organelor abdominale sau genitale interne. Aceasta este folosită pentru diagnosticul unor afecțiuni precum chisturile, aderențele, fibroamele și infecțiile. În multe cazuri, laparoscopia elimină necesitatea unei operații extensive (laparotomie) ce ar necesita o incizie mare a abdomenului. Laparoscopia implică riscuri mai mici, este mai puțin costisitoare și poate fi efectuată fără a necesita spitalizare [41]. Prin similitudine și sudarea laparoscopică folosită la repararea schimbătoarelor de căldură spirală elimină necesitatea decopertării spirelor acestuia și astfel implică riscuri mai mici.

Aparatura laparoscopică este formată din sistemul de insuflare, circuitul imagistic, circuitul de electrochirurgie, sistemul de spălare - aspirare și instrumentar [41, 42]. Astfel, pentru realizarea conceptului de sudare laparoscopică am luat ca exemplu elementele componente ale aparatului folosite în laparoscopie și le-am transpus și adaptat standului de sudare de realizat în vederea reparării prin sudare a zonelor cu accesibilitate redusă. Elementele standului experimental vor fi camera de inspecție videoendoscopică, sistem de achiziție, prelucrare,

stocare date și vizualizare: aparat foto, laptop, hard disk extern, imprimantă, materiale de lucru: tablă, țevă, gaze de protecție, materiale de adaos, tub de ghidare sârmă, adaptoare semnal video VGA – SVGA, standul realizat pentru fixarea probelor și repararea prin sudare, echipamentul de sudare ESAB - Origo Tig 3000i AC/DC, pistolul de sudare îmbunătățit, scule și dispozitive necesare prelucrării probelor înainte și după sudare pentru analiza calității îmbinărilor sudate.

CAPITOLUL III.

METODOLOGIA DE CERCETARE-DEZVOLTARE

Obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare din cadrul tezei de doctorat constă în *realizarea de cercetări și dezvoltări privind repararea prin sudare a îmbinărilor cu accesibilitate redusă.*

Obiectivele specifice ale acestei activități sunt, după cum urmează:

- ✓ **OS1** → realizarea unei sinteze a aspectelor importante prezentate în stadiul actual privind repararea prin sudare în zonele cu acces limitat și a schimbătoarelor de căldură spiralate.
- ✓ **OS2** → stabilirea metodologiei de cercetare-dezvoltare.
- ✓ **OS3** → proiectarea și realizarea unui stand experimental pentru repararea prin sudare în zonele cu acces limitat.
- ✓ **OS4** → realizarea și evaluarea calității reparării prin sudare a unor țevi de diametre mici din oțel inoxidabil austenitic (X2CRNiMo17-12-2).
- ✓ **OS 5** → enumerarea concluziilor generale, ale contribuțiilor personale și direcțiilor viitoare de cercetare.

Prin atingerea obiectivelor au rezultat șapte capitole ale tezei de doctorat, au fost elaborate 4 lucrări de cercetare în curs de publicare în reviste de specialitate (1) și la conferințe naționale și internaționale (3).

În raport cu obiectivul principal al activității de cercetare-dezvoltare, se consideră următoarea structură de lucru:

- ✓ Analiza schimbătoarelor de căldură;
- ✓ Analiza materialelor de bază utilizate în construcția schimbătoarelor de căldură;
- ✓ Analiza procedeelelor de sudare folosite pentru reparația prin sudare a zonelor cu acces limitat;
- ✓ Analiza solicitărilor la care sunt supuse schimbătoarele de căldură;
- ✓ Proiectarea unui echipament pentru repararea prin sudare a îmbinărilor cu acces limitat;
- ✓ Proiectarea și realizarea de probe realizate din țevi cu diametre mici din oțel inoxidabil austenitic (X2CrNiMo17-12-2) în care s-au realizat defecte care să imite cavități de diferite forme și dimensiuni, ulterior recondiționate prin sudare;
- ✓ Examinarea îmbinărilor realizate utilizând un set minimal de metode nedistructive, și anume: examinarea vizuală, examinarea cu lichide penetrante, examinarea cu radiații penetrante și metode distructive, cum ar fi: determinarea compoziției chimice, determinarea microdunității Vickers și determinarea microstructurii.

În figura 3.1 este prezentată structura prezentei teze de doctorat.

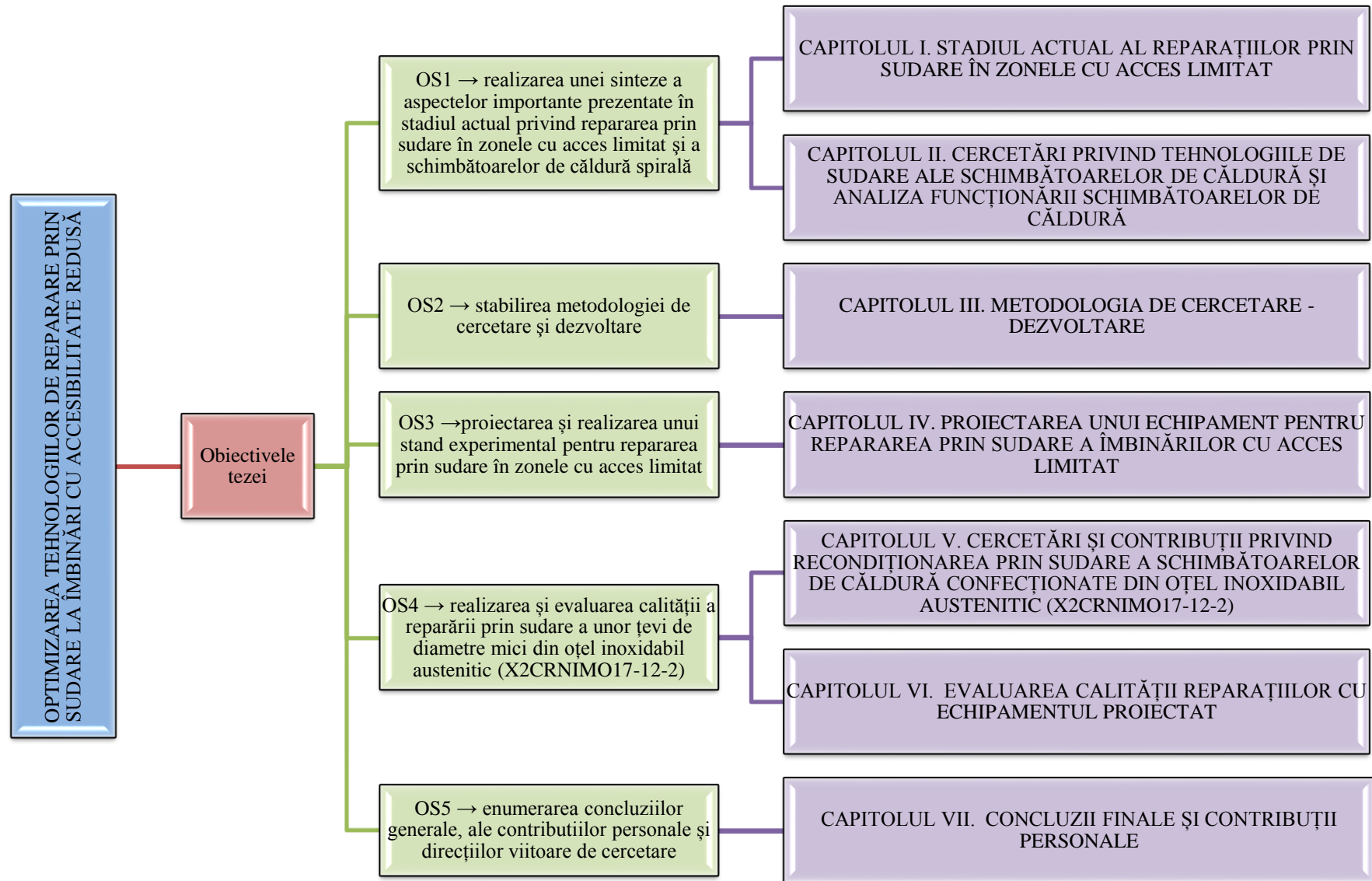


Fig. 3.1. Structura tezei de doctorat

CAPITOLUL IV. PROIECTAREA UNUI ECHIPAMENT PENTRU REPARAREA PRIN SUDARE A ÎMBINĂRILOR CU ACCES LIMITAT

În prezent există pistolete de sudare WIG cu sau fără sârmă, care pot să realizeze suduri manuale/mecanizate/robotizate însă dimensiunile lor sunt relativ mari, având cel puțin două dintre dimensiuni peste 25 – 35 mm. Pentru sudarea manuală, gâtul pistolului poate fi rigid sau flexibil, iar poziționarea și manevrarea lui în timpul sudării se face direct de către operator, de obicei de la o distanță mică, aproximativ 50 – 70 mm.

Pentru realizarea standului experimental pentru sudare s-au luat în considerare următoarele:

- ✓ Tot procesul să poată fi vizualizat pe un monitor și eventual înregistrat pe un suport electronic cu ajutorul unei microcamere, similar chirurgiei laparoscopice;
- ✓ Pistolul WIG să poată fi manevrat de la distanță, manual sau printr-un sistem mecanic – ca în cazul brațelor utilizate la trusele laparoscopice sau cu ajutorul unor actuatore ultrasonore printr-un sistem de comandă wireless sau cu fir utilizând un joystick.

Schema de principiu a standului experimental realizat în vederea reparării prin sudare a probelor utilizând pistolul de sudare WIG îmbunătățit este prezentată în figura 4.1.

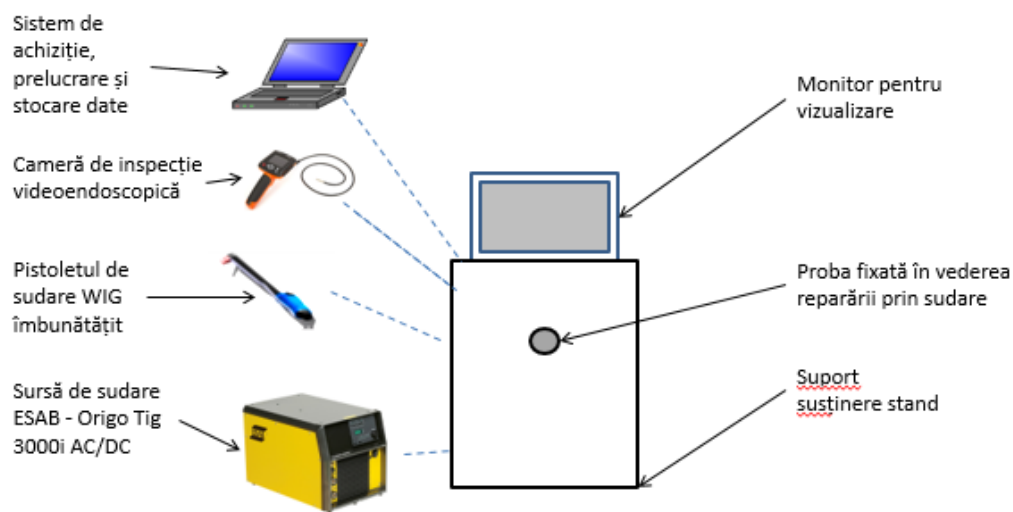


Fig. 4.1. Schema de principiu a standului experimental pentru sudare [32]

Pentru a testa eficiența standului experimental s-au stabilit următoarele etape [29]:

- ✓ Modificarea unui pistol WIG ales după anumite criterii;
- ✓ Achiziționarea unei camere de inspecție videoendoscopice pentru a putea vizualiza și monitoriza procesul de sudare. Imaginile au fost apoi procesate și salvate pe suport electronic;
- ✓ Realizarea de probe utilizând un semifabricat de tip tablă, sudură cap la cap și de colț;
- ✓ Realizarea de probe utilizând un semifabricat de tip țevă cu diametrul de 42 mm. În țevă în prealabil au fost executate prin prelucrare mecanică, defecte ce pot să apară în exploatare, pori, găuri, fisuri;
- ✓ Repararea defectelor din țevi prin sudare utilizând pistolul și noua tehnologie laparoscopică.

În figura 4.2 este prezentat standul experimental realizat.

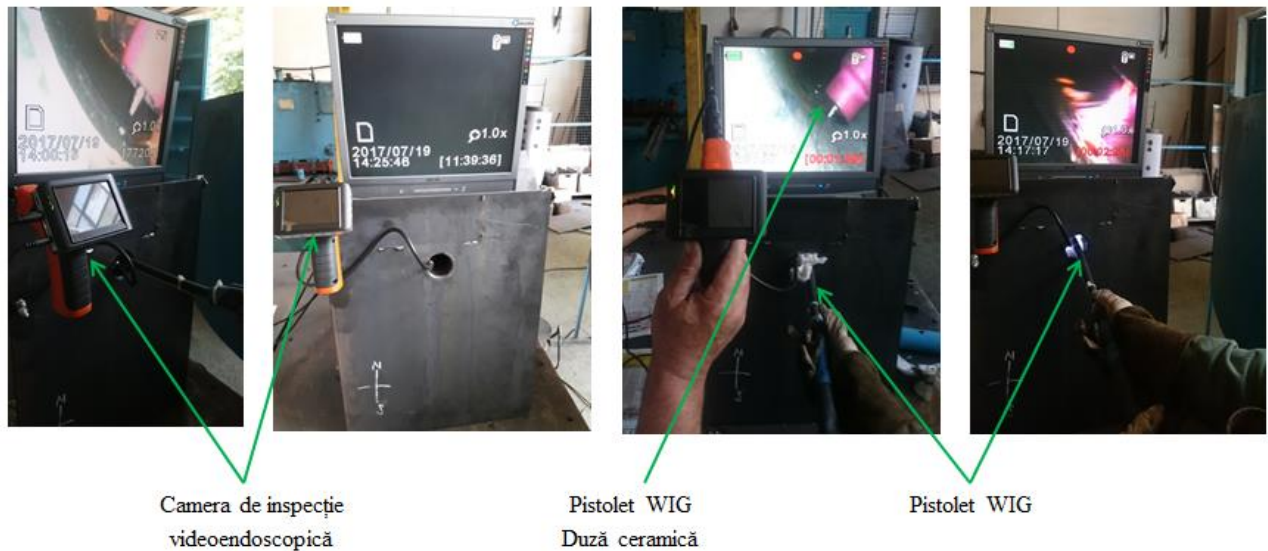


Fig. 4.2. Stand experimental pentru sudare [29]

Proiectarea și realizarea unui astfel de echipament de sudare flexibil, de dimensiuni foarte mici, sub 25 mm pe orice direcție a ridicat mai multe probleme tehnice ce au trebuit să fie luate în considerare și anume [29]:

- Proiectarea și realizarea unui pistol de sudare miniatural;
- Poziționarea și manevrarea exactă a pistolului de sudare;
- Vizualizarea on-line: a pistolului, a materialului de bază, a celui de adaos (dacă este cazul) și a băii metalice;
- Aducerea gazului de protecție în zona sudurii;
- Evacuarea gazului / fumului / condensului din zona sudurii pentru a putea vizualiza în condiții optime baia de metal topit;
- Asigurarea transmiterii curentului și tensiunii de sudare de la echipament la pistol prin dimensionarea exactă a pieselor ce compun pistolul;
- Temperatura de lucru – răcirea în timpul lucrului a tuturor componentelor ce fac parte integrantă din echipament – dispozitiv. Trusele laparoscopice sunt utilizate în special pentru investigații /operații la care temperatura de lucru nu depășește valoarea de 40 - 50°C. În cazul sudării, temperatura de lucru este mult superioară acestei valori și ca atare toate mecanismele trebuie proiectate și adaptate să poată fi utilizate și la temperaturi mai mari.

Realizarea acestui pistol și a tehnologiei de sudare aferente va deschide o nouă eră în lumea sudurii. Posibilitatea realizării unor suduri la distanță mare de aproximativ 0,1 - 1 m și în locuri greu accesibile, va deschide noi direcții de cercetare în toate domeniile industriale. Putem face o analogie cu domeniul medical unde descoperirea posibilității de investigare sau operare laparoscopică a dus la noi metode de operare, mult mai puțin invazive, cu costuri mici și rezultate foarte bune față de cele clasice [29].

Pentru identificarea celor mai mici pistoale existe pe piața actuală s-au studiat produsele celor mai mari companii producătoare de echipamente de sudare de pe piața actuală. Caracteristicile care au fost luate în considerare sunt:

- Tipul de răcire al pistolului (cu gaz sau lichid);
- Diametrul electrodului de wolfram;
- Curentul maxim de sudare în curent continuu și alternativ;
- Diametrul exterior al gâtului pistolului;

- Caracteristici duză (diametru, lungime, material).

Luând în considerare caracteristicile pistolului mai sus menționate, modelul de pistol ales pentru îmbunătățire este pistolul SR24WFX al TBI Industries. Este un pistol răcit cu lichid și gât flexibil potrivit pentru exigențele actuale unde accesul la îmbinarea sudată sau spațiul de pătrundere al capului pistolului sunt limitate. Poate fi utilizat și în zonele unde este imposibil de sudat cu pistoletele WIG ”de zi cu zi”. La proiectarea echipamentului miniatural de sudare WIG – laparoscopic s-a realizat o analogie cu dispozitivele/mecanismele de operare/investigare din sfera medicală, îndeosebi cu chirurgia laparoscopică dar bineînțeles cu adaptările specifice tehnologiei de sudare prin topire.

Pistolul proiectat trebuie să îndeplinească următoarele funcții [29]:

- ✓ dimensiunea capului de sudat pe orice direcție să nu fie mai mare de 20 mm;
- ✓ să poată fi manevrat de la distanță manual sau printr-un sistem mecanic – ca în cazul brațelor utilizate la trusele laparoscopice sau cu ajutorul unor actuatori ultrasonore printr-un sistem de comandă wireless sau cu fir utilizând un joystick;
- ✓ tot procesul să poată fi vizualizat pe un monitor și eventual înregistrat pe un suport electronic cu ajutorul unei micro camere utilizată în chirurgia laparoscopică.

Pistolul realizat cu ajutorul programului Catia V5 este prezentat în figura 4.3.

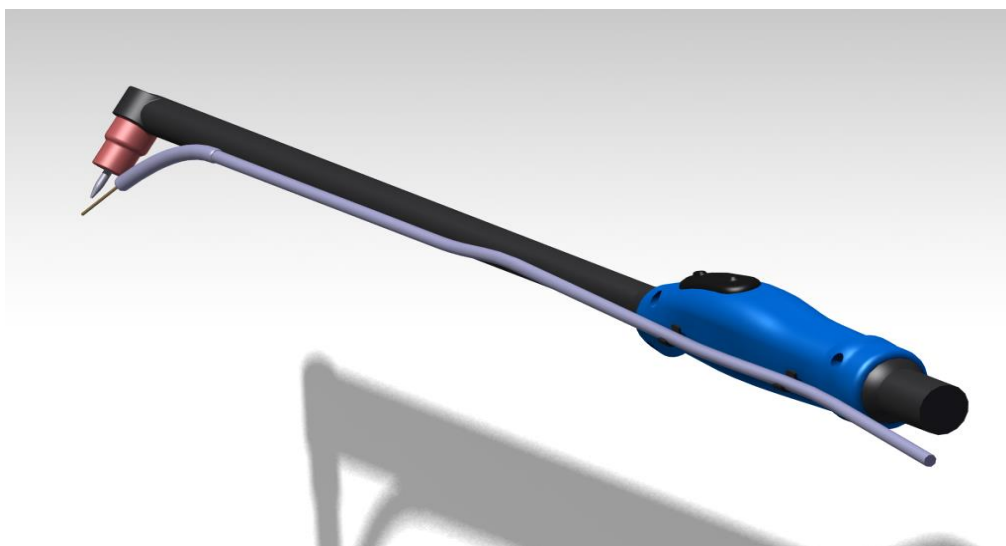


Fig.4.3. Imaginea pistolului 3D realizat în software-ul Catia V5

Pistolul ales a fost modificat în sensul că i-a fost adăugată partea de alimentare cu sârmă de sudură – rolă, vezi figura 4.6 [99, 101].



Fig. 4. 4. Pistolul utilizat.



Fig.4.5. Capul de sudare al pistolului

Sârma de sudură vine în dreptul electrodului de wolfram prin intermediul unui tub de ghidare metalic. Tubul de ghidare a fost prins de corpul pistolului și de gâtul acestuia astfel încât să formeze un corp comun. Ieșirea sârmei din tub se face prin intermediul unei duze de contact, figura 4.4. și figura 4.5.

1) Comanda celor două subansamble, pistol și derulator se face separat. Pistolul poate să amorseze arcul electric și dacă este necesar, prin intermediul unei pedale se poate acționa pornirea și oprirea derulatorului.

2) Ținând cont de viteza de sudare, am ales un derulator la care viteza de avans a sârmei să fie minim de 0,8 m / min – LN 27 cu două role.

Pentru testarea pistolului realizat și a standului experimental au fost executate îmbinări sudate a unor table oțel S235 cu grosime de 5 mm. Îmbinările au fost sudate cap la cap și de colț. De asemenea, au fost create în mod artificial defecte de tipul pori, șanțuri, găuri care apoi au fost reparate prin sudare. Aceste teste au fost făcute pentru a putea obișnui operatorul cu noul tip de pistol [29].

Ulterior au fost pregătite mai multe țevi în interiorul cărora au fost create defecte de tipul pori, șanțuri, găuri care apoi au fost reparate prin sudare, vezi figura 4.6 [29].



Fig. 4. 6. Produse de tip țevă cu defecte create artificial

Toate sudurile au fost executate prin introducerea pistolului în țevă și monitorizarea băii de metal topit cu ajutorul camerelor video-endoscopice.

În figura 4.7 sunt prezentate rezultatele obținute în urma reparării prin sudare a probelor utilizând pistolul îmbunătățit realizat.



Fig. 4. 7. Imagini cu probe tip țevă după repararea prin sudare

CAPITOLUL V. CERCETĂRI ȘI CONTRIBUȚII PRIVIND RECONDIȚIONAREA PRIN SUDARE A SCHIMBĂTOARELOR DE CĂLDURĂ CONFEȚIONATE DIN OȚEL INOXIDABIL AUSTENITIC (X2CRNIMO17-12-2)

Pentru desfășurarea experimentelor s-au realizat o serie de probe, care au fost ulterior examinate nedistructiv și distructiv.

Pentru realizarea activităților propuse s-au parcurs următoarele etape:

- ✓ realizarea unor cavități artificiale;
- ✓ stabilirea tehnologiei de recondiționare utilizată pentru realizarea probelor;
- ✓ realizarea recondiționării;
- ✓ curățarea mecanică și chimică (degresare) a probelor;
- ✓ examinarea vizuală;
- ✓ examinarea cu lichide penetrante;
- ✓ examinarea cu radiații penetrante;
- ✓ curățarea chimică a probelor;
- ✓ debitarea în vederea obținerii de epruvete și probe pentru examinarea distructivă;
- ✓ rectificarea epruvetelor și probelor;
- ✓ determinarea microstructurii îmbinării sudate;
- ✓ determinarea compoziției chimice prin spectrometrie;
- ✓ determinarea durtății Vickers.

Pentru realizarea experimentelor au fost debitate țevi din oțel inoxidabil austenitic, X2CrNiMo17-12-2, cu dimensiunile: diametrul exterior - $\varnothing 42$, grosime 3mm și lungime 50 mm și 250 mm, în care au fost realizate găuri străpunse cu diametre de 2 mm, 3 mm și 4 mm. Planul experimental constă în parcurgerea următoarelor etape: alegerea materialului de bază; alegerea procedurii de reparare prin sudare; alegerea materialului de adaos; repararea prin sudare a probelor.

Pentru realizarea planului experimental s-a ales ca material de bază oțelul inoxidabil austenitic – X2CrNiMo17-12-2 [31].

Oțelul inoxidabil austenitic X2CrNiMo17-12-2 este o versiune a tipului X5CrNiMo17-12-2 și se deosebește de acesta printr-un conținut mai scăzut de Carbon, dar și printr-o limită de curgere și rezistență la rupere mai mici. Acesta oferă însă o sudabilitate mai bună și, de asemenea, ameliorează rezistența la coroziune în jurul zonelor sudate [31].

În tabelul 5.1 este prezentată compoziția chimică a oțelului inoxidabil austenitic X2CrNiMo17-12-2 conform standardului de material EN ISO 100088-3, iar în tabelul 5.2 sunt prezentate echivalențele oțelului în conformitate cu alte standarde. Proprietățile mecanice ale oțelului X2CrNiMo17-12-2 sunt prezentate în tabelul 5.3 [31].

Tabel 5.1. Compoziția chimică a oțelului X2CrNiMo17-12-2 [31, 34]

<i>Material</i>	<i>Compoziție chimică</i>										
<i>EN ISO 100088-3</i>	<i>C</i> [%]	<i>Mn</i> [%]	<i>P</i> [%]	<i>S</i> [%]	<i>Si</i> [%]	<i>Cr</i> [%]	<i>Ni</i> [%]	<i>Mo</i> [%]	<i>N</i> [%]	<i>Cu</i> [%]	<i>Alte elemente</i> [%]
X2CrNiMo17-12-2	0,03	2	0,045	0,03	0,75	16 – 18	10 – 14	2 – 3	0,10	–	–

Tabel 5.2. Echivalențe oțel X2CrNiMo17-12-2 cu alte mărci de oțel din lume [31, 34]

ASME	DIN 17440	EN 10088 – 3	UNS	AFNOR
316L	1.4404	X2CrNiMo17-12-2 (1.4404)	S31603	Z3CND17-11-02

Tabel 5.3. Proprietățile mecanice ale oțelului inoxidabil austenitic X2CrNiMo17-12-2 [31, 34]

<i>Material</i>	<i>Proprietăți mecanice</i>				
<i>EN ISO 100088-3</i>	Rezistența la rupere [MPa]	Limita de curgere [MPa]	Alungirea (% la 50 mm) [min,%]	Duritatea	
				Brinell	Rockwell B
X2CrNiMo17-12-2	485	170	40	217	95

Procedeul de sudare ales este WIG cu material de adaos, iar gazul de protecție Ar 100%. Parametrii regimului de sudare utilizați în cadrul experimentelor au fost stabiliți în conformitate cu recomandările producătorului; valorile acestora sunt prezentate în tabelul 5.4. și au fost monitorizați pe toată durata procesului de sudare.

Tabel 5.4. Parametrii tehnologici stabiliți pentru realizarea experimentelor [31, 33]

Nr. crt.	Parametrul	Valoare
1.	Curentul de sudare I_s [A]	137±10
2.	Tensiunea arcului U_a [V]	14,2±2
3.	Viteza de avans a sârmei v_a [m/min]	1.8±0.1
4.	Debitul de gaz II (Ar 100%), D_g [l/min]	13±1
5.	Viteza de sudare, v_s [cm/min]	12-15

În cadrul experimentelor s-a utilizat material de adaos de tip sârmă din oțel inoxidabil austenitic marca OK Tigrod 316L (L=low, simbolizând un conținut scăzut de carbon).

Acest oțel este adesea recomandat pentru operații de sudare, încărcare cu sudură sau reparații, deoarece oferă caracteristici de rezistență la coroziune foarte bune, au sudabilitate și rezistență mecanică a sudurilor bune. Marca 316L are caracteristici superioare comparativ cu marca 304 (care este mai ieftină), deoarece este aliată suplimentar cu 2-3%Mo, ceea ce sporește și rezistența la coroziune punctiformă (pitting) în cazul unor solicitări la cald. Totodată, sârma 316L poate fi utilizată pentru zone greu accesibile, deoarece nu necesită curățirea sudurii de rădăcină înainte de depunerea stratului următor, ceea ce ar presupune o operație suplimentară în zona de sudare cu acces limitat.

Pentru realizarea experimentelor au fost pregătite țevi din oțelul inoxidabil austenitic X2CrNiMo17-12-2 cu diametrul exterior de 42 mm, grosime 3 mm, de lungimi [101]:

- 250 mm - probele 1÷3 - prezentate în figura 5.1, pe care s-au realizat găuri cu diametrele de 2, 3, respectiv 4 mm;
- 50 mm - proba 4 - prezentată în figura 5.2, pe care s-a realizat un defect liniar poziționat pe lungimea țevii;
- 50 mm - proba 5 - prezentată în figura 5.3, pe care s-a realizat un defect liniar poziționat pe circumferință.

Debitarea țevilor s-a realizat cu ajutorul unei mașini de debitat cu răcire pentru a evita modificările structurale ale oțelului inoxidabil austenitic.



Fig. 5.1. Țeavă oțel X2CrNiMo17-12-2, probele 1÷3 [31, 33]



Fig. 5.2. Țeavă oțel X2CrNiMo17-12-2, proba 4 [31]



Fig. 5.3. Țeavă oțel X2CrNiMo17-12-2, proba 5 [31]

Probele au fost fixate în standul experimental și reparate prin sudare. Pentru realizarea probelor prin procedeul WIG s-a utilizat un echipament ESAB - Origo Tig 3000i AC/DC.

Acesta permite formarea arcului de sudare începând cu 5 A – 300 A. Repararea prin sudare a probelor a avut loc prin procedeul WIG cu material de adaos, vezi figura 5.4 .



Fig. 5.4. Repararea prin sudare a probelor [31, 33]

Probele obținute sunt prezentate în figurile 5.5÷ 5.9 [32].

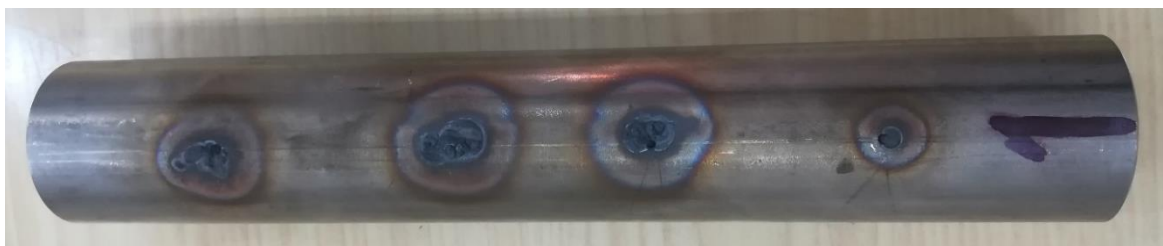


Fig. 5.5. Proba 1 – găuri cu diametrul de 2 mm



Fig. 5.6. Proba 2 – găuri cu diametrul de 3 mm

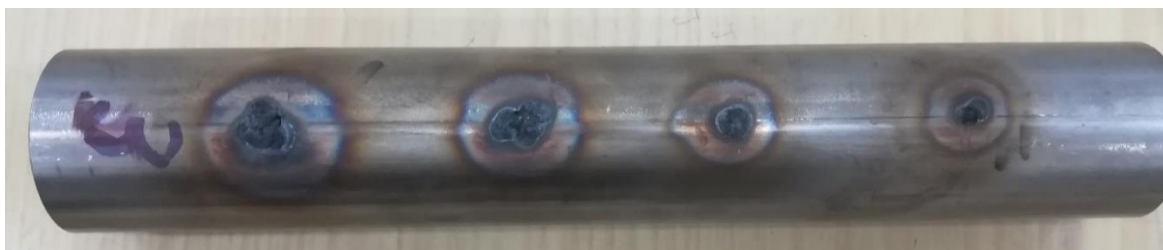


Fig. 5.7. Proba 3 – găuri cu diametrul de 4 mm



Fig. 5.8. Proba 5 – defect liniar poziționat pe circumferință



Fig. 5.9. Proba 4 –defect liniar poziționat pe lungimea țevii

CAPITOLUL VI. EVALUAREA CALITĂȚII REPARAȚIILOR EFECTUATE CU ECHIPAMENTUL PROIECTAT

Pentru a analiza calitatea punctelor de sudură obținute prin procedeul de reparare prin sudare ales au fost utilizate o serie de metode de examinare nedistructivă, după care, au fost prelevate epruvete pentru realizarea încercărilor distructive.

Examinarea vizuală a punctelor de sudură a fost realizată utilizând metoda directă (cu ochiul liber) și metoda indirectă utilizând un videoproiector pentru examinarea interioară a probelor. În urma examinării vizuale directe s-a putut constata faptul că cu cât dimensiunea cavității este mai mare cu atât pătrunderea este mai mică. În cazul probelor au fost identificate următoarele imperfecțiuni: lipsă de pătrundere, aspect necorespunzător, scurgeri de material.

Pentru examinarea suprafeței interioare s-a utilizat un stand experimental format din videoproiectorul VIDEOPROBE VP 300, probele de examinat și un fluxmetru pentru măsurarea intensității luminoase. Examinarea a fost realizată de 3 ori modificând intensitatea luminoasă de la 230 lux la 330 lux și 430 lux [31].

În figura 6.1 sunt prezentate imaginile preluate cu videoproiectorul VIDEOPROBE VP 300 pentru proba 1 cu intensitate luminoasă de 230 lux.

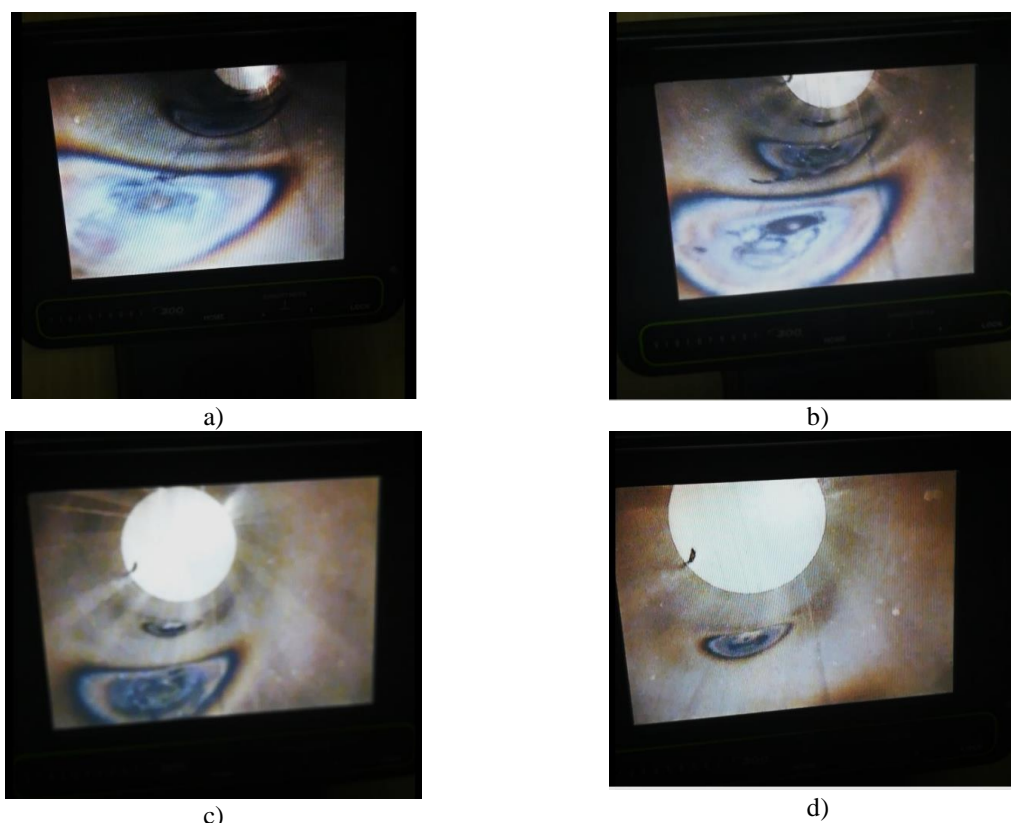


Fig. 6.1. Imagini preluate cu videoproiectorul utilizând o intensitate luminoasă de 230 lx - proba 1
a) punctul 1 de reparare prin sudare situat la 50 mm de capătul de acces; b) punctul 2 de reparare prin sudare situat la 100 mm de capătul de acces; c) punctul 3 de reparare prin sudare situat la 150 mm de capătul de acces; d) punctul 4 de reparare prin sudare situat la 200 mm de capătul de acces

Analizând imaginile obținute se poate constata că cu cât distanța față de capătul de acces este mai mare cu atât calitatea reparării prin sudare devine mai slabă. Până la o distanță de aproximativ 100 - 150 mm față de capătul de acces sudura are un aspect bun, neînregistrându-se imperfecțiuni grave. La distanța de 200 mm se pot observa scurgeri de metal, stropi dar și suprafețe arse.

În ceea ce privește intensitatea luminoasă, cu cât aceasta crește cu atât este mai ușor de vizualizat defectele, mai puțin cele situate pe capătul opus al țevii.

Pentru punerea în evidență a imperfecțiunilor de dimensiuni mici de pe suprafața piesei (care nu pot fi detectate vizual) sau din imediata apropiere a suprafeței, s-a utilizat examinarea cu lichide penetrante. Pentru desfășurarea examinării cu lichide penetrante s-au stabilit temperatura mediului ambiant de 20°C și setul de lichide penetrante (penetrant PFINDER 860, dezvoltant PFINDER 870).

Etapele examinării cu lichide penetrante a probelor sunt:

1. Curățirea probei - s-a realizat curățare chimică prin degresare - degresant PFINDER890;



Fig. 6.2. Curățirea suprafețelor,
a) Probele 1÷3 - defecte circulare, b) Probele 4 și 5 - defecte liniare

2. Uscarea suprafeței s-a realizat forțat cu ajutorul unui jet de aer cald;
3. Aplicarea penetrantului s-a realizat prin pulverizare pe suprafața de contact de la o distanță de aproximativ 10 cm, timpul de penetrare utilizat: 10 min; proba 4, respectiv proba 5 au fost examinate și la interior (figura 6.3, respectiv figura 6.4);



Fig. 6.3. Aplicare penetrant - probele 1÷3

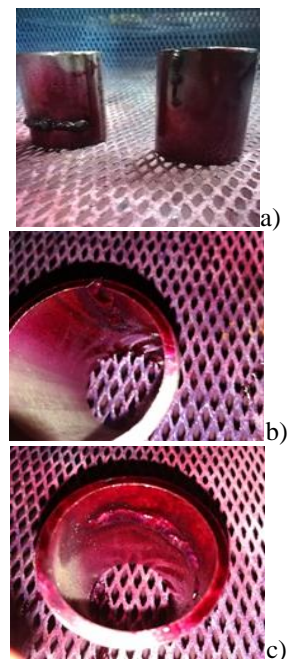


Fig. 6.4. Aplicare penetrant - proba 4, respectiv proba 5, a) exterior - probele 4,5, b) Proba 4 - interior, c) Proba 5 - interior

4. Îndepărtarea excesului de penetrant – s-a realizat prin spălare;
5. Uscarea suprafeței - s-a realizat forțat cu ajutorul unui jet de aer cald;
6. Aplicare dezvoltant - vezi figura 6.5, respectiv 6.6
 - ✓ dezvoltantul s-a aplicat într-un strat uniform și subțire, pe toată suprafața de examinat, fiind bine agitat înainte de folosire;
 - ✓ după ce s-a aplicat dezvoltantului, suprafața examinată a fost lăsată să se usuce la temperatura camerei;
 - ✓ durata de dezvoltare a început imediat după ce s-a uscat suprafața, timpul de dezvoltare fiind de 20 min;



Fig. 6.5. Aplicare developant probele 1÷3

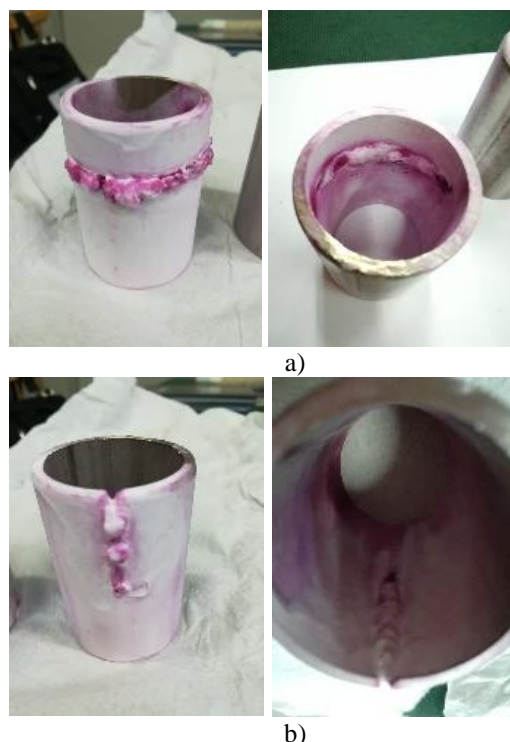


Fig. 6.6. Aplicare developant, a) proba 4 exterior interior b) proba 5 exterior interior

În cazul examinării cu lichide penetrante, s-a observat că suprafața exterioară a sudurii prezintă imperfecțiuni, lipsa de pătrundere fiind cea mai frecventă. S-au identificat, pe cele 5 probe verificate, următoarele imperfecțiuni: suflură (P5), lipsă de pătrundere (P1, P2, P3, P5), exces de pătrundere (P3, P4, P5), scurgere de metal la rădăcină (P1, P2, P3), supratopire (P1, P2, P3) și grosime excesivă a sudurii (P4, P5).

Examinarea probelor din oțel cu radiații penetrante s-a realizat cu ajutorul instalației de radiografiere cu raze X cu obținerea imaginii pe film radiografic. Aceasta s-a realizat în cadrul laboratorului S.C. Weld Mildin CND S.R.L. din Pitești și s-a realizat în proporție de 100%.

Date tehnice:

- Proba: țevă.
- Material: X2CrNiMo17-12-2.
- Dimensiuni: $\phi 42.3 \times 3$.
- Geometria de expunere: geometrie normală.
- Tehnica de radiografiere: un perete.
- Clasa de radiografiere: clasa B.
- Indicatori de calitate utilizați W 10 FE, sensibilitate: W14/0,16.
- Parametrii de radiografiere:

Parametrii tubului de raze X: U= 190KV; I = 4,7 mA;

Dimensiunea petei focale: 3 mm;

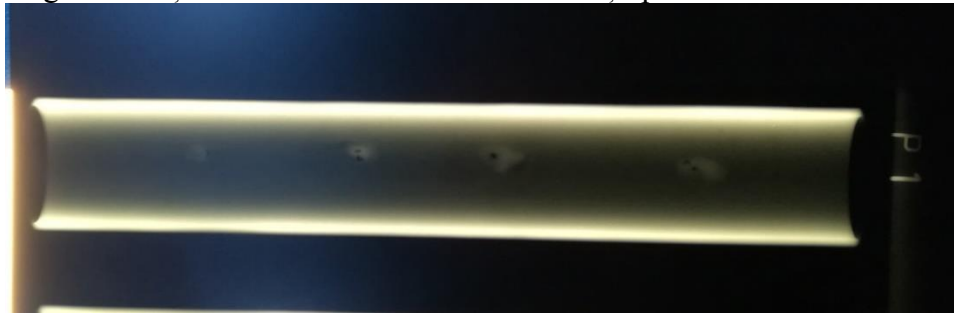
Distanța sursă-film = 700 mm;

Timp de expunere = 16 s;

Tipul filmului : FUJI FILM IX 100 NIF;

Ecran intensificator (Material: Pb, Grosime: 0.02 mm față, 0.02 mm spate).

Interpretarea filmelor radiografice s-a realizat în conformitate cu SR EN ISO 17363 - 1, Nivel B, SR EN ISO 5817, Nivel B și SR EN ISO 10675-1, Nivel 1. În figura 6.7 sunt prezentate filmele radiografice obținute în urma examinării cu radiații penetrante.



a)



b)



c)



d)



e)

Fig. 6.7. Imagini obținute în urma examinării cu radiații penetrante.
a) proba 1, b) proba 2, c) proba 3, d) proba 4, e) proba 5

În urma examinării cu radiații penetrante se poate observa că toate probele realizate au prezentat incluziuni solide însă, s-au identificat și defectele următoare: por (P1), suflură (P2, P3), pătrundere incompletă la rădăcină (P4) și lipsă de topire (P5).

Pentru realizarea încercărilor distructive au fost prelevate 8 probe și prelucrate prin debitare mecanică sub fluid de răcire.

Pregătirea probelor a constat în parcurgerea următoarelor etape [33]:

- ✓ Înglobarea probelor s-a realizat în rășină fenolică;
- ✓ Lustruirea manuală a probelor utilizând discuri abrazive cu granulația de 360, 500 și 1000 și soluție Topol 3. Probele au fost atacate folosind apă regală constituită din 3 părți HCl și o parte HNO₃. Probele sunt prezentate în figurile 6.8, respectiv 6.9;



Fig. 6.8. Proba 1 - poziționarea punctelor de sudare [33], 1.1. - punctul 1 - 50 mm; 1.2 - punctul 2 - 100m; 1.3. - punctul 3 - 150 mm; 1.4 - punctul 4 - 200 mm [33].



Fig. 6.9. Proba 2 - poziționarea punctelor de sudare [33], 2.1. - punctul 1 - 50 mm; 2.2 - punctul 2 - 100m; 2.3. - punctul 3 - 150 mm; 2.4 - punctul 4 - 200 mm [33].

Analiza metalografică s-a realizat prin microscopie optică conform SR EN 1321:2000, STAS 7626-79, CR 12361:1996 + AC: 1997, cu microscopul Olympus GX51 echipat cu software specializat pentru prelucrarea imaginilor – AnalySis. Condiții de măsurare: temperatura +26°C (temperatura de referință +23°C±5°C), umiditate 42% [33].

Câteva dintre rezultatele obținute în urma analizei microscopice sunt prezentate mai jos: proba 1 - defecte circulare cu diametru gaură Φ 2 mm, structura materialului de bază în figura 6.10, punctul 1 de sudură - distanță 50 mm față de punctul de acces al pistolului - figurile 6.11 - 6.13 și punctul 2 de sudură - distanță 100 mm față de punctul de acces al pistolului - figurile 6.14-6.17 [33].

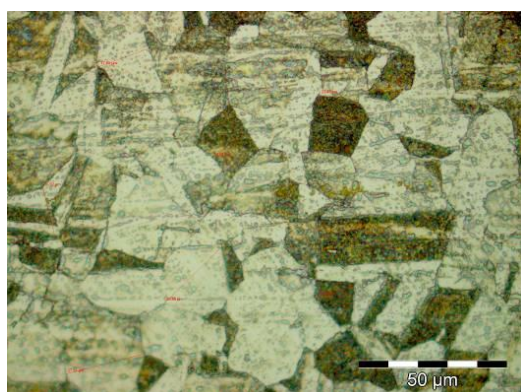


Fig. 6.10. Aspectul microstructurii materialului de bază.

Grăunți poliedrici maclați (deformați plastic prin rotirea planelor atomice), aspect specific materialelor cu plasticitate mare.

Proba 1.1 (orificiu de 2 mm), zona 1 (la 50 mm de capăt)

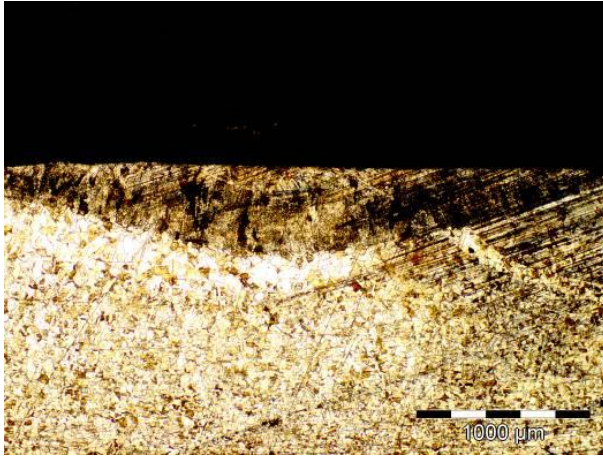


Fig. 6.11. Sudură în secțiune transversală (50x)

Sudarea s-a efectuat din două treceri, cu suprapunere de circa 500μm, pentru asigurarea pătrunderii și topirii complete a materialului de adaos, cu umplerea completă a orificiului de 2 mm.

Sudura nu are supraînălțare, zona topită superioară situându-se la nivelul suprafeței materialului de bază.

În zona rădăcinii se observă zona de influență termo-mecanică (deschisă la culoare) cu lățime de circa 200 μm. Pe zona analizată, sudura este bine formată și lipsită de discontinuități.

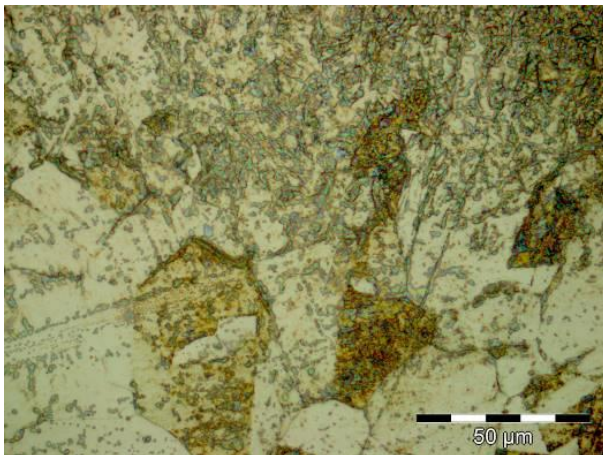


Fig. 6.12. Zona de diluție material de bază - sudură (500x)

Zona de amestec între sudură și materialul de bază este continuă și fără defecte. Pe limitele grăunților de austenită din materialul de bază se observă ușoare segregări ale unor compuși (culoare închisă).

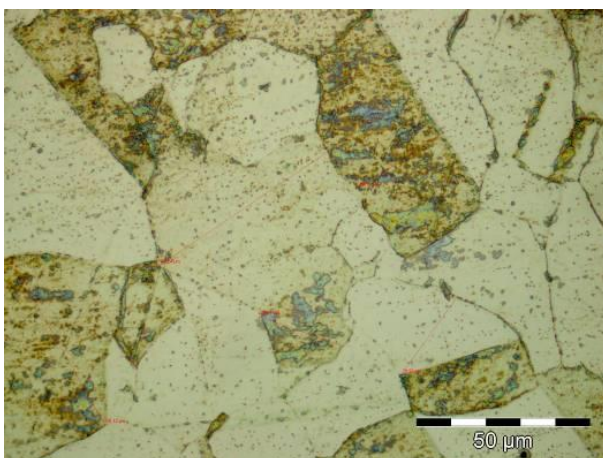


Fig. 6.13. ZIT – zona de supraîncălzire cu grăunți poliedrici grosolani (500x)

De asemenea, se remarcă o tendință de creștere a granulației austenitice, diametrul mediu al grăuntelui fiind de circa 58μm, comparativ cu circa 15 μm în materialul de bază.

Proba 1.2 (orificiu de 2mm), zona 2 (la 100 mm de capăt)

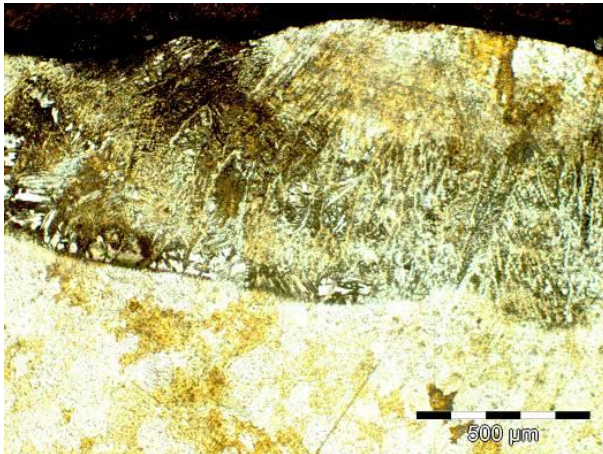


Fig. 6.14. Cusătură – strat final (100x)

În acest caz, sudura s-a realizat din două straturi. Un strat de umplere a zonei orificiului și un strat superficial pentru obținerea supraînălțării. Primul strat a suferit o răcire lentă, ceea ce a generat o microstructură cu granulație grosolană, dendritică. Stratul final al cusăturii sudate prezintă o înălțime de 852 μm și o lățime de 3106 μm. Zona de legătură cu cusătura principală are o microstructură aciculară.

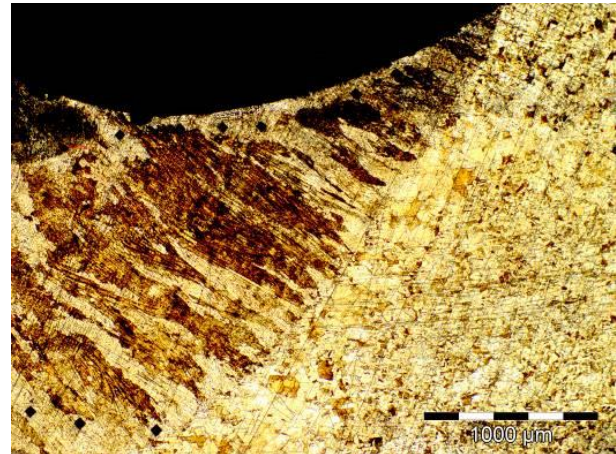


Fig. 6.15. Cusătură principală (50x)

Grăunții au crescut pe lungimi între 200 și 500 μm, fiind orientați pe direcția fluxului termic, către zona centrală a sudurii. Supraîncălzirea s-a datorat valorii prea ridicate a curentului de sudare (137A) comparativ cu peretele țevii de 3mm. Un alt efect nedorit a fost apariția unei contracții la solidificare, care a necesitat încă un strat depus pentru încheierea sudurii la nivelul peretelui interior al țevii.

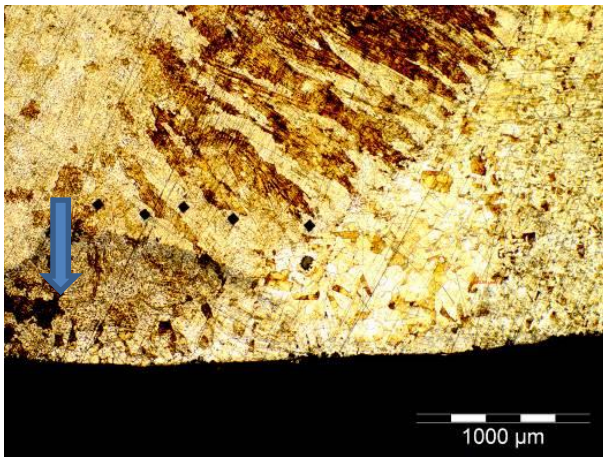


Fig. 6.16. Zona de rădăcină (50x)

Cusătura principală prezintă dendrite de austenită și ferită delta cu precipitări inter-dendritice. Grăunții sunt alungiți pe direcția fluxului termic. Zona de influență termomecanică prezintă granulație mare. Lichiditatea excesivă a băii metalice a dus și la apariția unui efect de perforare a peretelui țevii, cu formarea unui defect de segregare la baza sudurii (indicat de săgeată).

Pe imagine se pot vedea și amprente de microduritate pe zona de rădăcină a sudurii.

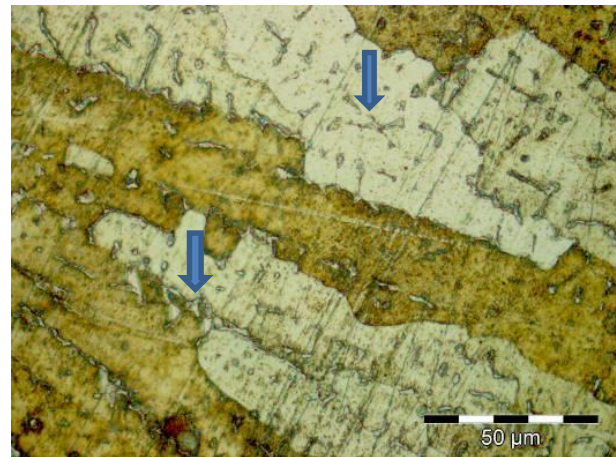


Fig. 6.17. Zona de rădăcină (1000x)

În acest caz, regimul termic la sudare neadecvat a determinat precipitarea unor particule de ferită delta (indicate cu săgeți), intra- și inter-granular în raport cu grăunții de austenită grosolani, alungiți și orientați pe direcția fluxului termic.

În cazul piesei 1, au fost analizate zonele cu suduri experimentale executate cu procedeul WIG, poziționate la diferite adâncimi în raport cu capătul de pătrundere al dispozitivului de sudare. Pe măsură ce adâncimea de plasare a sudurii crește, dificultatea de realizare a unei suduri corecte se amplifică, prin faptul că sudura nu are o geometrie uniformă. Prin creșterea valorii curentului de sudare, apare tendința de scurgere a metalului topit la rădăcina sudurii și se formează defecte de tip pori, segregări. Totodată, crește proporția de ferită delta din sudură. Acest aspect nu este dorit, deoarece procentul de ferită care asigură cele mai bune condiții de rezistență la fisurare este cuprins în domeniul 5-8%.

Examinarea prin microscopie electronică SEM s-a efectuat conform SR EN 1321:2001, utilizând microscopul electronic Quanta Inspect S, FEI Olanda, echipat cu analizor de microcompoziție chimică EDAX Z2e. Analizele de micro-compoziție locală s-au efectuat pentru a evalua distribuția elementelor chimice prezente în diferite zone, ca urmare a efectelor câmpului termic la sudare. Totodată, prin astfel de analize se pot identifica compuși sau faze, și pe baza valorilor efective ale compoziției chimice ale acestora, se pot face aprecieri privind nivelul de aliere (conținutul de Cr, Ni, Mo sau C) sau a tendinței de segregare (formarea carburilor de crom) [33].

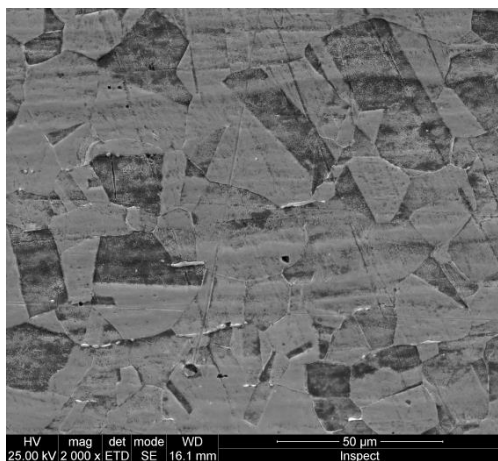


Fig. 6.18. Material de bază (2000x)

Materialul de bază este un oțel inoxidabil austenitic, caracterizat prin microstructura poliedrică a austenitei cu plane de alunecare a blocurilor atomice specifice (macle).

Pe limitele grăunților de austenită se observă prezența feritei delta, sub formă de insule alungite, de culoare mai deschisă în raport cu grăunții cristalini de austenită.

Cu ajutorul detectorului EDAX și a programului de software aferent al dispozitivului, este posibilă achiziția unor imagini micro-grafice a zonelor de interes (fig. 6.19 și 6.21), reprezentarea grafică a distribuției spectrelor atomice ale elementelor identificate (fig. 6.20 și 6.22), a valorilor numerice ale compoziției chimice (tabelul 6.1 și 6.2), precum și reprezentarea grafică a distribuției spațiale a elementelor chimice (mapping elemental) -fig. 6.23.

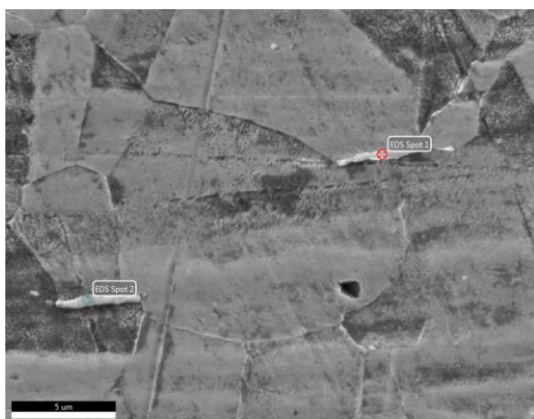


Fig. 6.19. Analiza EDAX pe o microzonă din materialul de bază (pe insulele de ferită delta)

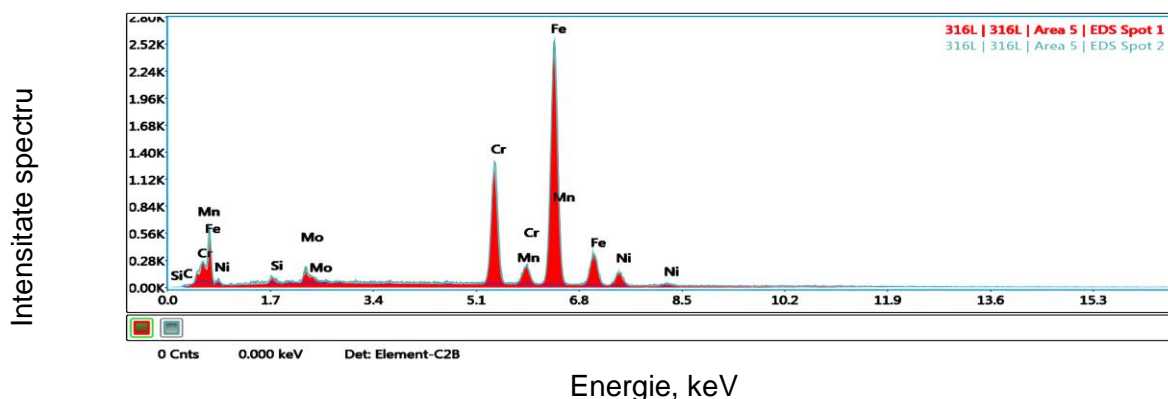


Fig. 6.20. Spectrul de distribuție al elementelor chimice din materialul de bază determinat prin analiza EDAX.

Tabelul 6.1. Valori individuale ale compoziției chimice pentru zonele analizate (corelație cu figura 6.19)

Element	Greutate %	Atomi %	Eroare %
316L, PROBA 1.2, punctul 1, Material de bază			
C K	0,89	3,95	28,13
SiK	0,92	1,74	18,8
MoL	2,69	1,5	15,53
CrK	22,6	23,24	2,62
MnK	1,2	1,17	21,07
FeK	66,53	63,69	2,27
NiK	5,17	4,71	7,87

Cusătura sudată (proba 1.2)

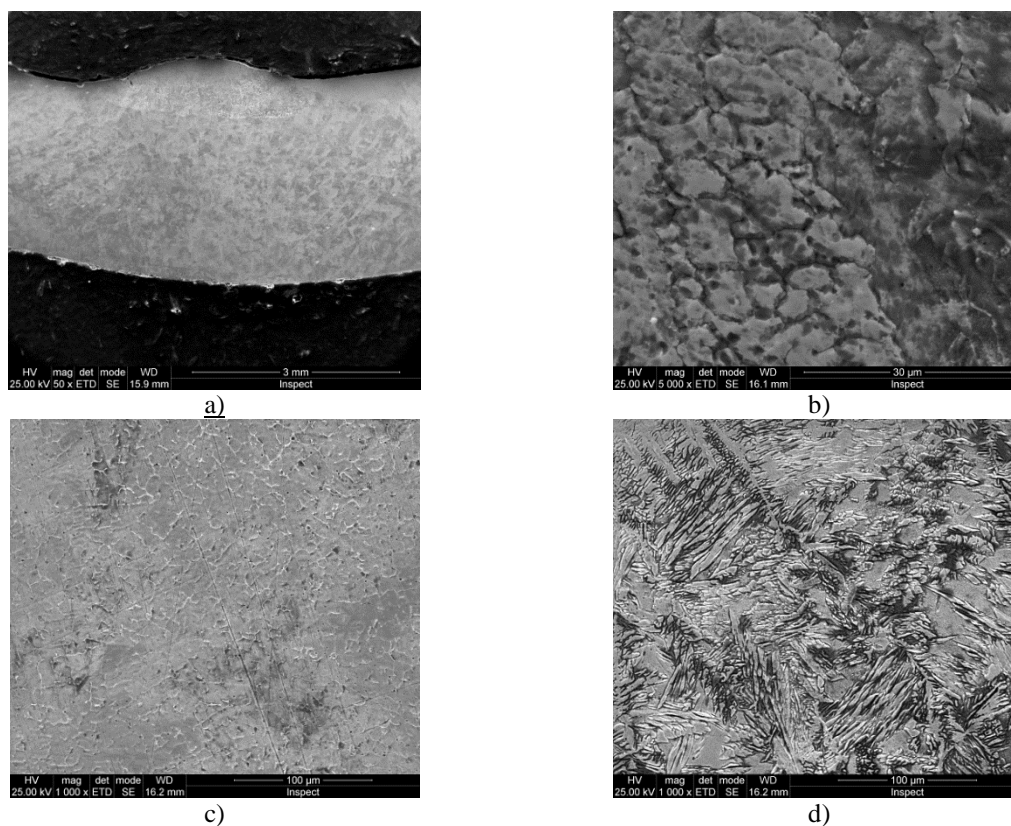


Fig. 6.21. Imagini micrografice din diferite zone ale cusăturii sudate, a) Sudură (50x) Aspect macroscopic al îmbinării sudate, b) Sudură (5000x) Austenită - microstructură dendritică și pelicule fine de ferită delta intergranulare, c) Microstructură fină de austenită cu aspect dendritic, d) Sudură (5000x) Austenită, ferită și martensită.

2. Analiza EDAX de micro-compoziție chimică locală pentru cusătură

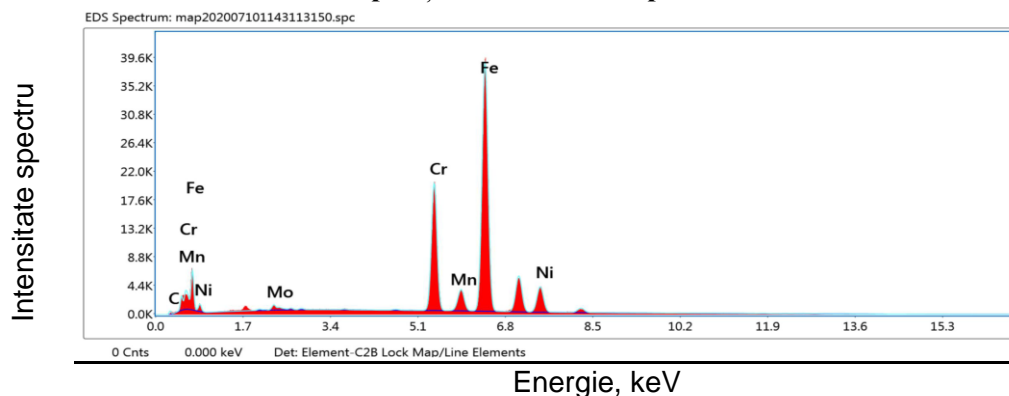


Fig. 6.22. Spectrul de distribuție al elementelor chimice din cusătura sudată determinat prin analiza EDAX

Tabelul 6.2. Valori individuale ale compoziției chimice pentru zonele analizate (corelație cu fig.6.21)

Element	Greutate %	Atomi %	Eroare %
PROBA 1.2, punctul 1, zonă sudură			
C K	1,17	5,18	11,73
MoL	1,01	0,56	5,78
CrK	22,64	23,14	1,71
MnK	1,45	1,40	4,34
FeK	64,43	61,30	1,76
NiK	9,3	8,42	3,20

Determinarea durtății materialului a fost realizată utilizând microdurimetrul Shimadzu HMV 2T, forța de apăsare de 4,903N, timpul de testare de 10 secunde și s-au efectuat câte 5 măsurări succesive, în linie, pe zonele caracteristice cu distanțe de circa 500μm între amprente. Valorile microdurtăților măsurate pentru primele două probe sunt centralizate în tabelul 6.3., iar graficele reprezentative sunt prezentate în figurile 6.24 ÷6.25 [32].

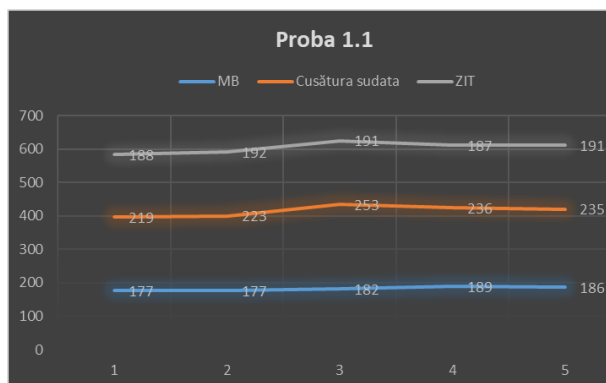


Fig. 6.24. Graficul durtăților proba 1.1 [32]

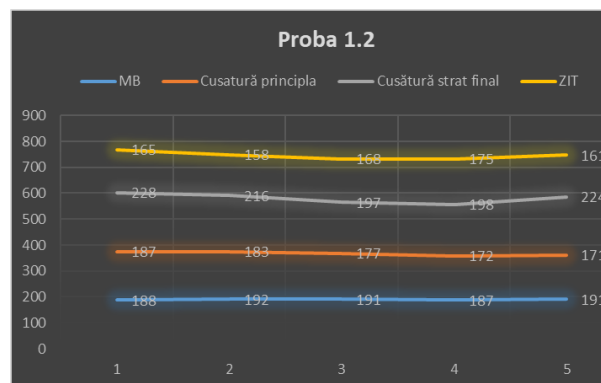



Fig. 6.25. Graficul durtăților proba 1.2 [32]

Tabelul 6.3. Valorile durtăților [32]

<i>Imagine macroscopică a probelor înglobate în rășină fenolică</i>	Valori individuale, HV0,5		Valoare medie, HV0,5	Deviația standard	Coefficientul de variație
	MB 1.1	177, 177, 182, 189, 186	182	5,36	2,94
	Sudură	219, 223, 253, 236, 235	233	13,31	5,71
	ZIT	220, 208, 213, 193, 195	206	11,61	5,64
	MB 1.2	188, 192, 191, 187, 191	190	2,17	1,14
	Sudură principală	187, 183, 177, 172, 171	178	6,93	3,89
	Sudură strat final	228, 216, 197, 198, 224	213	14,45	6,80
	ZIT	165, 158, 168, 175, 161	165	6,58	3,98
	<i>Probele 1.1 si 1.2</i>				

CAPITOLUL VII. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

➤ **CONCLUZII FINALE**

Din cercetările efectuate se pot desprinde următoarele concluzii:

- ✓ S-a realizat o cercetare a stadiul actual al reparațiilor prin sudare în zonele cu acces limitat.
- ✓ S-a efectuat un studiu al materialelor de bază utilizate în construcția schimbătoarelor de căldură.
- ✓ S-a realizat un studiu al procedeelelor de sudare utilizate pentru repararea zonelor cu acces limitat.
- ✓ S-a realizat un studiu al metodelor de examinare nedistructivă și distructivă utilizate în domeniul sudării.
- ✓ S-a realizat un studiu al solicitărilor la care sunt supuse schimbătoarele de căldură.
- ✓ S-a realizat un stand experimental pentru repararea prin sudare a zonelor cu accesibilitate redusă.
- ✓ S-au realizat probe de tip țevă cu diametru mic în care au fost create defecte artificiale, care ulterior au fost reparate prin sudare utilizând procedeul WIG.
- ✓ Probele obținute au fost examinate vizual și cu lichide penetrante pentru a pune în evidență eventualele imperfecțiuni poziționate pe suprafața îmbinării sudate sau care comunică cu exteriorul.
- ✓ În urma procedeeului de reparare prin sudare se poate constata că cu cât distanța față de capătul de acces este mai mare cu atât calitatea sudurii obținute scade;
- ✓ Calitatea sudurii scade cu creșterea dimensiunii cavității;
- ✓ În urma examinării vizuale directe au fost identificate o serie de imperfecțiuni, dar cea mai gravă dintre acestea fiind lipsa de pătrundere.
- ✓ În cazul examinării vizuale la interior s-a putut observa faptul ca până la o distanță de aproximativ 100 - 150 mm față de capătul de acces sudura are un aspect bun, neînregistrându-se imperfecțiuni grave.
- ✓ La distanța de 200 mm se pot observa picături de metal, dar și arsuri.
- ✓ În urma examinării cu lichide penetrante s-a observat că suprafața exterioră a sudurii prezintă imperfecțiuni, lipsa de topire fiind cea mai frecventă.

- ✓ În urma examinării cu radiații penetrante se poate observa că toate probele realizate au prezentat incluziuni solide.
- ✓ La majoritatea probelor analizate valorile de duritate în zona de influență termică sunt mai scăzute comparativ cu cele din sudură sau materialul de bază.
- ✓ Sunt mici diferențe între valorile durității la materialele de bază, deși probele sunt realizate din același material (oțel inoxidabil austenitic 316L).
- ✓ Valorile durității sudurilor sunt considerabil mai mari comparativ cu cele ale materialului de bază, ceea ce acreditează ideea că este posibil ca în suduri să se formeze faze dure în timpul sudării sau la răcirea după sudare.

Astfel, obiectivele descrise în cadrul capitoului 3 al prezentei teze, realizarea unei sinteze a aspectelor importante prezentate în stadiul actual privind repararea prin sudare în zonele cu acces limitat, realizarea unei sinteze a aspectelor importante prezentate în stadiul actual privind repararea prin sudare a schimbătoarelor de căldură spiralate, proiectarea și realizarea unui stand experimental și a unui pistol de sudare îmbunătățit pentru repararea prin sudare în zonele cu acces limitat, realizarea și evaluarea calității reparării prin sudare a unor țevi de diametre mici din oțel inoxidabil austenitic (X2CRNIMO17-12-2), au fost îndeplinite.

➤ **CONTRIBUȚII PERSONALE**

Pe parcursul tratării și soluționării problematice legate de temă au fost aduse principalele contribuții personale prezentate în continuare:

- ✓ Analiza critică, sistematizarea și sintetizarea informațiilor existente privind caracterizarea constructiv-funcțională a schimbătoarelor de căldură și procedeele de sudare folosite la reparațiile în zonele cu acces limitat: a) procedeul de sudare WIG (Wolfram Inert Gas), b) procedeul de sudare MIG (Metal Inert Gas).
- ✓ Definierea principalelor solicitări la care sunt supuse schimbătoarele de căldură și efectele acestora: a) coroziunea, b) cavitația.
- ✓ Analiza trusei medicale laparoscopice în vederea posibilității realizării conceptului de sudare laparoscopică și studiul metodelor de examinare distructivă și nedistructivă a îmbinărilor sudate.
- ✓ Proiectarea și realizarea unui stand experimental pentru repararea prin sudare a zonelor cu accesibilitate redusă și a unui pistol îmbunătățit după analizarea în prealabil a pistolurilor de sudare actuale.
- ✓ Proiectarea și realizarea unor probe de tip țevă cu defecte artificiale din oțelul inoxidabil X2CrNiMo17-12-2.
- ✓ Repararea prin sudare a probelor realizate utilizând standul creat.
- ✓ Evaluarea calității punctelor de sudare obținute utilizând metode de examinare nedistructivă a probelor (examinarea vizuală, examinarea cu lichide penetrante, examinarea cu radiații penetrante) și metode de examinare distructivă a probelor (analiza prin microscopie optică, analiza prin microscopie electronică de baleiaj – SEM, determinarea compoziției chimice și determinarea durității materialului).

Prezenta teză de doctorat, prin problematică, abordare și rezultate, acoperă o serie de elemente privind repararea prin sudare a schimbătoarelor de căldură spiralate, examinarea nedistructivă și distructivă, precum și dezvoltarea unui stand experimental pentru facilitarea procesului de reparare prin sudare a zonelor cu acces limitat în scopul dezvoltării de metode noi.

Importanța științifică a prezentei teze este susținută de contribuțiile sale la: propunerea unei tehnologii de realizare a reparării prin sudare a schimbătoarelor de căldură spiralate și realizarea unui stand experimental pentru testarea tehnologiei de reparare prin sudare.

Importanța practică a prezentei teze constă în faptul că studiile de caz realizate în ceea ce privește analiza punctelor de sudare realizate prin tehnologia propusă pe probe de tip țevă din oțelul inoxidabil X2CrNiMo17-12-2 și rezultatele acestora sunt utile pentru studenți, specialiști și alți utilizatori pentru o mai bună caracterizare a defectelor ce au loc în timpul procesului de sudare și pentru a estima efectele acestui proces, dar și calitatea cusăturii în raport cu distanța dintre operator și locul ce necesită reparare.

➤ **DIRECȚII DE DEZVOLTARE**

Problematika tehnologiilor de reparare prin sudare a zonelor cu accesibilitate redusă necesită o activitate de cercetare – dezvoltare amplă, continuă și analitică. Complexitatea și volumul mare al problematicii tratate în cadrul prezentei teze nu a permis abordarea și soluționarea tuturor aspectelor pe care le implică tema acestei lucrări.

Miniaturizarea și mai mult a pistolului de sudare și dezvoltarea unei căi de ghidare pentru mărirea preciziei poziționării acestuia față de defect reprezintă două dintre direcțiile principale de urmat. Deși cercetările și testele realizate și-au îndeplinit scopul propus inițial, nu a fost posibilă realizarea fizică a unei reparații prin sudare a schimbătorului de căldură spirală disponibil. Există însă și schimbătoare de căldură spirală la care pot fi aplicate metodele și echipamentele propuse în cadrul acestei teze dar acestea nu au fost disponibile experimentării fiind în afara posibilităților unității de învățământ sau a elaboratorului prezentei teze.

De asemenea cercetările pot fi continuate în scopul realizării de reparații prin sudare în zonele cu acces limitat la adâncimi mai mari comparativ cu cele realizate în cadrul experimentelor detaliate în cadrul tezei dar și în direcția evaluării aplicabilității și dezvoltării metodelor și echipamentelor propuse în vederea reparării altor tipuri de schimbătoare de căldură și a altor echipamente ce prezintă acces limitat.

În domeniul ingineriei, sudarea laparoscopică, fiind un concept complet nou, se va dezvolta într-un ritm foarte accelerat pe mai multe direcții. Una dintre perspectivele de dezvoltare va fi de proiectare și realizare de noi echipamente de sudare, poziționare, manevrare și vizualizare în timp real.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1]. Alex. Mihai s.a. *Inspekția Calității, Metode nedistructive de examinare, Îndrumar de laborator*, Ed. Printech 2011
- [2]. Alex. Mihai s.a. *Introducere în inspekția calității*, Editura PRINTECH, București 2008
- [3]. Baldev Raj, Raj, C V Subramanian, T Jayakumar, *Non-Destructive Testing of Welds*, Alpha Science International, Limited, 2001
- [4]. Cătălin Gheorghe AMZA, Dumitru Titi CICIC, Florea Dorel ANANIA, Diana POPESCU, *Metode de evaluare a calității produselor industriale*, Editura PRINTECH, București 2013
- [5]. D. Qizhan, *Welding of Stainless Steel [M]*, China Machine Press, China, 2009
- [6]. I. Lucaciu, F. Blaga, L. Miloș, *Teoria proceselor de sudare*, Ed. Universității din Oradea, 2002
- [7]. L.D. Ghenghea, *Teoria proceselor de sudare*, Ed. Tehnica Info, Chișinău, 2001
- [8]. R. Halmslaw, *Introduction to the Non-Destructive Testing of Welded Joints*,
- [9]. Safta, V.I., *Defectoscopie nedistructivă industrială*, Ed. Sudură, Timișoara, 2001
- [10]. Sârbu, Ionel, *Tehnologia sudării prin topire a pieselor metalice*, Ed. Tehnica Info, Chișinău, 2001
- [11]. Solomon Ghe., Cicic D., *Teoria proceselor de sudare, Partea a IIa*, Editura Bren 2010
- [12]. Voicu, M., *Examinarea cu lichide penetrante*, Ed. PRINTECH, București 2008
- [13]. Zgura Ghe., Iacobescu G., Rontescu C., Cicic D., *Tehnologia sudării prin topire*, Ed. Politehnica Press, 2007
- [14]. Fontana, M. G. and Greene, N. D., *Corrosion Engineering*, 2nd edn., McGraw-Hill, New York, 1978
- [15]. Forchhammer, P., *Results of damage research on corrosion failures in heat exchangers*, *Heat Transfer Eng.*, 5, 19–32 (1984)
- [16]. Hunag, B.S., Yang, J., Lu, D.H., and Bin, W.J. 2016. Study on the microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour of S355JR/316L dissimilar welded joint prepared by gas tungsten arc welding multi-pass welding process. *Science and Technology of Welding and Joining* 21 (5): 381-388. DOI: doi.org/10.1080/13621718.2015.1122152
- [17]. Inoue, H. & Koseki, T. (2017). Solidification mechanism of austenitic stainless steels solidified with primary ferrite. *Acta Materialia*. 124, 430-436. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.11.030
- [18]. J.N. Dupont, C.S. Kusko, *Technical note: Martensite formation in austenitic/ferritic dissimilar alloy welds*, *Weld. J.* (2007) 51–54
- [19]. Jing, W., Min-Xu, L., Lei Z., Wei C., Ningxu L., and Li-Hua, H. 2012. Effect of welding process on the microstructure and properties of dissimilar weld joints between low alloy steel and duplex stainless steel. *Int. J. Min. Met. Mater.* 19 (6): 518-524. DOI: 10.1007/s12613-012-0589-z
- [20]. K. Monika, M.C. Bala, P.K. Nanda, K.R Prahalada, *The Effect of Heat Input on the Mechanical Properties of MIG Welded Dissimilar Joints*. *International Journal of Engineering Research & Technology*, ISSN: 2278-0181, Vol. 2 Issue 9, September - 2013
- [21]. Kuppan Thulukkanam, *Heat exchanger Design Handbook*, CRC Press, Taylor&Francis Group, USA, 2013
- [22]. Mirsalehi, S.E., Ahmadi, M. 2015. Investigation on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of AISI 316L stainless steel to ASTM A335-P11 low alloy steel dissimilar welding joints. *Mater. High Temp.* 32: 627-635. DOI: doi.org/10.1179/1878641315Y.0000000009

- [23]. N. Ghosh, P.K. Pal, G. Nandi, R. Rudrapati, Experimental investigation of TIG welding of austenitic stainless steel with change in composition of filler material, in: Proceedings of the National Conf. on Recent Trends in Manuf. Science and Technol. Kolkata, 2013, pp. 27–35
- [24]. R.M. Molak, K. Paradowski, T. Brynk, L. Ciupinski, Z. Pakiela, K.J. Kurzydowski, Measurement of mechanical properties in a 316L stainless steel welded joint, Int. J. Pressure Vessels Piping 86 (2009) 43–47
- [25]. Roșca Radu, Elemente de mecanica fluidelor și acționări hidraulice, Editura "Ion Ionescu de la Brad", Iași, 2015
- [26]. David R. Stinebring, Michael L. Billet, Jules W. Lindau, Robert F. Kunz, Developed Cavitation-Cavity Dynamics, USA
- [27]. Syrett, B. C. and Coit, R. L., Causes and prevention of power plant condenser tube failures, Mater. Perform., February, 44–49
- [28]. Totten G.E. (2006). Steel heat treatment handbook. (2nd ed.). London: Taylor & Francis Group.
- [29]. Contract de finanțare UPB – GEX nr. 35 / 26.09.2016, PROIECT - COD 397, Sudarea laparoscopică– Procedeu WIG
- [30]. F. Ionescu, Ghe. Solomon, G. Gârleanu, D. Gârleanu, Optimization of welding joints technologies with reduced accesibility, „Welding 2016” Conference, Pitești, 14-15.04.2016
- [31]. F. Ionescu, Ghe. Solomon, G. Gârleanu, D. Gârleanu and M.C. Dijmărescu, Reconditioning by Welding of the Spiral Heat Exchangers Made of Austenitic Stainless Steel - X2CRNIMO17-12-2, ModTech 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 916 (2020) 012049 doi:10.1088/1757-899X/916/1/012049
- [32]. F. Ionescu, I. Voiculescu, Ghe. Solomon, G. Gârleanu and D. Gârleanu, Experimental study towards WIG welded joint. Case study: Repair by welding of Austenitic Stainless Steel - X2CRNIMO17-12-2 pipes, 11th International Conference on Advanced Manufacturing Technologies- ICAMAT 2020
- [33]. F. Ionescu, I. Voiculescu, Ghe. Solomon, G. Gârleanu and D. Gârleanu, Effects of welding methods on the structural properties of Austenitic Stainless Steel - X2CRNIMO17-12-2 pipes repaired by welding, - U.P.B. Sci. Bull., Series D
- [34]. ***SR EN 10088-1 - Stainless steels - Part 1: List of stainless steels, 2015
- [35]. ***SR EN 10088-2 - Stainless steels - Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes, 2015
- [36]. ***SR EN ISO 6520:2007 Welding and allied processes – Classification of geometric imperfections in metallic materials
- [37]. ***SR EN ISO 5817:2015 Welding - Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys (beam welding excluded) Quality levels for imperfections
- [38]. ***<http://www.asr.ro/>
- [39]. ***Studiul fenomenului de cavitație, Lucrarea 5, <http://www.termo.utcluj.ro/>
- [40]. ***Welding journal magazine, What you should know about austenitic stainless steels, by H. R. Castner
- [41]. ***http://ro.wikipedia.org/wiki/Schimb%C4%83tor_de_c%C4%83ldur%C4%83 - Schimbător de căldură
- [42]. ****Gruia Z.*, Noțiuni de bază în Chirurgia laparoscopică, <http://www.slideshare.net/gruiaz/aparatura-si-instrumentarul-in-chirurgia-laparoscopica>
- [43]. ***Gavrilă L-Gh., Curs 12, 14, 15 Schimbătoare de căldură, <http://cadredidactice.ub.ro/>