

CONTRIBUȚII PRIVIND PROCESUL DE SUDARE MAG ÎN ROST ÎNGUST A OȚELURILOR DESTINATE EXECUȚIEI CONDUCTELOR MAGISTRALE DE GAZ

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la Universitatea Politehnica Timișoara în domeniul de doctorat Ingineria materialelor

autor ing. Dinu SIMIONESCU

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Ion MITELEA

luna februarie anul 2022

Capitolul 1

STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND COMPORTAREA LA SUDARE A OȚELURILOR PENTRU CONDUCTELE MAGISTRALE

1.1. Introducere

La ora actuală pe plan mondial, cererea transportului produselor petroliere si a gazelor naturale este in continuă creștere. Pentru transportul acestor produse se dezvolta in continuare noi rețele de conducte magistrale subterane si submarine. Costurile de realizare a acestor tipuri de conducte sunt destul de ridicate, motiv pentru care, pe plan mondial se desfăsoară ample cercetări in urmatoarele directii:

- utilizarea unor țevi pentru conducte magistrale din oțeluri de înalta rezistență, ceea ce conduce la micșorarea grosimii de perete, deci la un consum mai mic de materiale de adaos;

- dezvoltarea unor tehnologii de sudare de mare randament;

- implementarea unor metode automate de control.

Pentru oțelurile nealiate, creșterea caracteristicilor mecanice nu se poate realiza prin creșterea concentrației de carbon, deoarece aceasta are drept urmare micșorarea tenacitații, ductilității si a sudabilitații. Din aceasta cauză, creșterea caracteristicilor mecanice se va face prin unul din următoarele procedee [1],[20],[33],[40],[51],[58], [84],[86],[104]:

- finisarea granulaței;
- durificarea soluției solide prin microaliere;
- durificarea prin precipitare dispersă;
- creșterea densitații de dislocații.

1.4. Elementele de dificultate ale problematicii abordate

Conductele magistrale sunt destinate transportului sub presiune a gazelor naturale, produse care sunt bogate in hidrogen sulfurat. Datorită presiunilor ridicate și a mediului toxic folosit la transportul gazelor naturale, tehnologiile respective de sudare și controlul îmbinarilor sudate impun o deosebită atenție cercetătorilor.

Sudarea tradițională a conductelor magistrale de grosimi mari și de lungimi de ordinul sutelor și miilor de kilometri folosind procedeul manual cu electrozi înveliți nu se recomandă datorită atât productivitații scăzute cât și costului ridicat raportat la sudarea complet automată a conductelor. De asemenea, folosirea electrozilor celulozici (electrozi care introduc o cantitate ridicată de hidrogen) la sudarea manuală a conductelor de grosimi medii și mari nu este recomandată de nici un producator de materiale de sudare datorită perocolului de fisurare cauzat de prezența hidrogenului.

Sudarea MAG (Metal Active Gas). Folosirea sudării MAG în rost îngust (narrow gap MAG welding) necesită precauții speciale care să asigure ca varful sârmei electrod este poziționat precis pentru a asigura o topire corespunzătoare ale fețeleor rostului de sudare [4],[36], [78],[103]. Sudarea MAG în rost îngust folosind un singur cap de sudare este tehnica dominantă și a fost optimizată în trecut să producă productivitatea maximă folosind acest proces de sudare. Continua dezvoltare a sudării MAG folosind doua capete de sudare și folosirea sudării MAG la radăcină conduce la o creștere importantă a productivitații [71],[80].

Sudarea conductelor magistrale și controlul nedistructiv sunt guvernate de norma API 1104 [89]. Comportarea la coroziune tensofisurantă se va face conform normei NACE TM0177, Metoda B [88], iar prepararea și îndoirea probelor pentru testul de coroziune conform normei ASTM G39 [102].

Lucrarea își propune găsirea unei modalități de limitare a transformărilor microstructurale nedorite în zonele îmbinărilor sudate, concomitent cu mărirea productivității prin implementarea unui proces de sudare MAG cu rost îngust a unui oțel tratat termomecanic care este destinat execuției conductelor pentru industria petrolului și a gazelor. Ea oferă cunoștințe suplimentare legate de selecția adecvată a materialelor de sudare, omologarea tehnologiei de sudare având în vedere o creștere substanțială a productivității prin folosirea atât a sudării automate interne a rădăcinii cât și prin folosirea a două capete de sudare pentru umplerea rostului concomitent cu o reducere a consumului de material de adaos datorită rostului îngust.

1.5. Obiectivele tezei de doctorat propuse

Dificultățile semnalate la sudarea MAG cu rost îngust impun efectuarea de ample cercetări experimentale care să urmărească îndeplinirea următoarelor obiective:

- 1. Oportunitatea realizării unor îmbinări sudate ale conductelor cu diametru de 42" (1066,8 mm) din oţeluri microaliate de înalta rezistenţă cu conţinut redus în carbon, tratate termomecanic (TTM), API 5LX65M, folosind procedeul MAG în spray arc pentru stratul de rădăcină şi curent pulsat la umplerea rostului. Echipamentul de sudare folosit, va fi compus dintr-o maşină de sudat a interiorului ţevii, şi două masini de sudat a exteriorului ţevii, fiecare fiind prevăzută cu două capete de sudat pentru umplere, la care conducta este fixă iar echipamentul prezintă o miscare orbitală vertical descendenta in jurul ţevii.
- **2.** Stabilirea parametrilor tehnologici ai regimului termic de sudare pentru rădăcină și pentru straturile de umplere a rostului.
- **3.** Selecția unor materiale de adaos compatibile cu metalul de bază care să conducă la obținerea unui metal depus cu caracteristici de întrebuințare favorabile; astfel, se va opta pe varianta utilizării unei sârme ER 70S-G pentru sudarea rădăcinii, iar pentru umplere, sârma E70S-6.
- 4. Evaluarea calității îmbinărilor sudate prin investigații ale structurii microscopice, încercări mecanice (duritate, tracțiune statică, încovoiere prin şoc, indoire la rece) şi prin control nedistructiv (particule magnetice, raze x) cu stabilirea liniilor directoare care trebuie avute în vedere pentru evitarea defectelor posibile într-un caz particular de îmbinare a unor asemenea oțeluri.

CERCETĂRI EXPERIMENTALE ASUPRA PARAMETRILOR PROCESULUI DE SUDARE

2.1. Particularitățile procesului de sudare MAG cu rost îngust

Procesul de sudare MAG folosește un arc electric între un electrod fuzibil sub formă de sărmă și baia de metal, protecția fiind realizată de o sursă externă de gaz activ sau amestecuri de gaze inerte cu gaze active [10],[18],[103].

El este utilizat la îmbinarea țevilor, conductelor magistrale, recipienților sub presiune, construcțiilor din șantierele navale, etc.

Sudarea MAG în rost îngust este o tehnică de sudare cu treceri multiple utilizată pentru a îmbina îndeosebi materiale metalice cu grosime ridicată folosind rosturi de sudare în I sau in V cu un unghi sub 10° și o deschidere a rostului de 6-16 mm.

Caracteristicile de bază ale acestui proces sunt:

- Rost îngust, fețele rostului sunt paralele sau ușor deschise;
- Deformații reduse datorită formei rostului;

- Sudarea cu treceri multiple cu unul sau două treceri pe strat;

- În general, zona influențată termic (ZIT) este redusă datorită sudarii cu energie liniara redusă;

2.2. Conducerea programului experimental

Conductele magistrale cu diametrul de 42" (1066.8mm) și grosimea peretelui de 31.75mm, executate din oțel microaliat de înaltă rezistență API5L X65M, tratat termomecanic au fost sudate prin procedeul MAG în spray arc pentru stratul de rădăcină & hot pass și curent pulsat la umplerea rostului folosind echipamentul de sudare al firmei CRC Evans. Acesta este compus dintr-o mașină de sudat a interiorului țevii, IWM și două mașini de sudat a exteriorului țevii, P625, fiecare fiind prevăzută cu două capete de sudare pentru umplere, la care conducta este fixă iar echipamentul de sudare prezintă o mișcare orbitală vertical descendentă în jurul țevii.

Înainte de asamblare, capetele țevilor sunt prelucrate mecanic pentru obținerea rostului îngust (fig.2.12).



Fig.2.12 Forma si dimensiunile rostului

2.3. Caracterizarea metalului de bază și a materialului auxiliar

2.3.1 Caracterizarea metalului de bază

Există numeroase metode de tratament termomecanic, trei dintre ele fiind ilustrate în fig.2.16. Primele două (tipul I si II fig.2.16) nu conțin o răcire accelerată de la temperatura de sfârșit de deformare și diferă între ele în principal prin intervalul de temperatură în care are loc acest proces. A treia metodă (tipul III fig.2.16) cuprinde o răcire accelerată după procesul de laminare controlată [68],[69],[104].

Structura materialului	Temperatura[°C]	Proces convențional	Proces controlat termomecanic
Austenita (echiaxială) recristalizată	Aprox.1200°C Normalizare	 	
Austenita (alungită) nerecristalizată	Ar ₃		
Austenită + ferită Ferită + Perlită Ferită + Bainită	Ar ₁	Laminare CR	Tipul I Tipul II Tipul III
Nota: CR – Lamina	are controlată	Normalizare	

Fig. 2.16. Comparație între procesul convențional și procesul controlat termomecanic

Compoziția chimică a metalului de bază utilizat în experimentări este redată în tab.2.1. **Tab.2.1** Compoziția chimică a materialul de baza: API 5L X65M

X65M	C%	Si%	P%	S%	Cu %	Ti%	Mn %	Ni %	Cr %	Al %	Mo %	V%	Nb%	B%
Valori	0.0	0.22	0.0	0.00	0.02	0.01	1 5 2	0.01	0.10	0.03	0.00	0.0	0.04	0.00
efective	43	0.32	07	09	0.02	3	1.55	8	0.19	8	8	04	4	02
Compoziț ie conf. API 5L	0.1	0.4	0.0 16	0.00 2	0.35	0.04	1.6	0.3	0.3	0.06	0.15	0.0 8	0.05	0.00 05

Obs. API Specification 5L: Specification for Pipe Line (API 2018) – normă a Institutului American al Petrolului [90].

2.3.2 Caracterizarea materialului auxiliar

Tab.2.2 Compoziția chimică a materialului de adaos pentru stratul de radacină, ER70S-G

ER 70S-G	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Cu%	V%	Ti%
Valori efective	0.07	0.74	1.57	0.013	0.008	0.04	0.01	0.04	0.11	0.01	0.05

Nota: ASME Sect.II Part C nu specifică compoziția chimică [92]

Tab 2.3 Com	pozitia chimică a	materialului de adaos	nentru straturile de umple	ere ER70S-6
1 au. 2.5 Com	poziția chimica e	materialului de adaos	pennu snaturne de umpre	10, EK/03-0

Tab.2.5 Compoziția chimica a materialulul de adaos pentra straturne de ampiere, EK705-0											
ER 70S-6	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Cu%	V%	Ti%
Valori efective	0.07	0.95	1.69	0.011	0.010	0.03	0.01	0.05	0.10	0.01	< 0.01
Prescripții compoziție	0.06- 0.15	0.8- 1.15	1.4- 1.85	0.025	0.035	0.15	0.15	0.15	0.50	0.03	-

Nota: Compoziția chimică este conform ASME Sect.II Part C [92]

Nota generală: Valorile singulare reprezintă valorile maxime ale fiecărui element component La sudarea MAG în rost îngust a materialului API 5L X65 atât pentru sudarea interioară a țevii cât și cea exterioară s-a folosit amestecul de gaze: 80% Ar + 20% CO₂.

STRUCTURA ȘI PROPRIETĂȚILE MECANICE ALE ÎMBINĂRILOR SUDATE MAG CU ROST ÎNGUST

3.1. Macrografia îmbinărilor sudate

În fig.3.3 se prezintă imaginea macroscopică a unei secțiuni transversale prin îmbinarea sudată, remarcându-se faptul că atât cusătura cât și ZIT-ul au o geometrie corespunzătoare și că sunt lipsite de defecte de tipul porozităților, fisurilor, lipsei de topire, etc. Lățimea ZIT-ului este uniformă pe întreaga secțiune, iar direcția de cristalizare în sudură este cea firească, adică coincide cu cea de evacuare a căldurii.



Fig.3.3 Imaginea macroscopică a secțiunii transversale prin îmbinarea sudată. Reactiv chimic: NITAL (10 cm³ HNO₃, 100 cm³ alcool etilic)

3.2. Examinări micrografice

Investigațiile microscopice asupra zonelor îmbinării sudate demonstrează că în sudură se formează o structură dendritică, creșterea grăunților producându-se de o manieră columnară fig.3.6, iar în ZIT apare o structură ferito-bainitică cu precipitări fine de faze secundare, fig.3.7. Metalul de bază are o microstructură ferito-bainitică, fig.3.8.



Fig.3.6 Microstructura sudurii, x 200



Fig.3.7 Microstructura ZIT, x 200



Fig.3.8 Microstructura MB, x 200

3.3. Încercări de duritate

Măsurătorile de duritate Vickers pe secțiunea transversală a îmbinării sudate au fost efectuate la o distanță de 2 mm față de partea interioară, fig.3.13, respectiv superioară, fig.3.14 a țevii. Gradul de împrăștiere a acestora confirmă eterogenitățile de structură ale sudurii și ZIT. Valorile ușor mai ridicate ale durității sudurii sunt explicate prin conținutul ceva mai mare de carbon echivalent al metalului depus, comparativ cu metalul de bază.



Fig.3.13 Variația durității pe secțiunea îmbinării sudate în zona interioară a conductei



Fig.3.14 Variația durității pe secțiunea îmbinării sudate în zona exterioară a conductei

3.4. Încercări dinamice de încovoiere prin șoc

Pentru fiecare temperatură de încercare și fiecare locație a crestăturii au fost utilizate minimum 3 epruvete. Rezultatele obținute sunt redate în tab.3.1 si 3.2 și reprezentate grafic în fig.3.21 si 3.22. **Tab. 3.1** Valorile energiei de rupere KV în îmbinarea sudată

I ocatia crestăturii	Mărimea	Temp °C	Energia Absorbită, Joules				
Locația crestaturii	epruvetei, mm	remp. C	А	В	С	Media	
Centrul sudurii, superior	10 x 10 x 55	+20°	178	176	190	181	
Centrul sudurii, rădăcină	10 x 10 x 55	+20°	220	220	208	216	
Centrul sudurii, superior	10 x 10 x 55	0°	150	138	150	146	
Centrul sudurii, rădăcină	10 x 10 x 55	0°	198	188	226	204	
Centrul sudurii, superior	10 x 10 x 55	-30°	102	110	116	109	
Centrul sudurii, rădăcină	10 x 10 x 55	-30°	130	150	138	139	
Centrul sudurii, superior	10 x 10 x 55	-50°	80	50	62	64	
Centrul sudurii, rădăcină	10 x 10 x 55	-50°	44	56	50	50	



Fig.3.21 Variația energiei de rupere KV cu temperatura de încercare în îmbinarea sudată, IS

Looptin crestăturii	Mărimea	Temp °C	Energia Absorbită, Joules				
Locația crestaturii	epruvetei, mm	Temp. C	А	В	C	Media	
ZIT superior	10 x 10 x 55	+20°	Ν	Ν	Ν	>300	
ZIT rădăcină	10 x 10 x 55	+20°	Ν	Ν	Ν	>300	
ZIT superior	10 x 10 x 55	0°	Ν	Ν	Ν	>300	
ZIT rădăcină	10 x 10 x 55	0°	Ν	Ν	Ν	>300	
ZIT superior	10 x 10 x 55	-30°	Ν	Ν	Ν	>300	
ZIT rădăcină	10 x 10 x 55	-30°	Ν	Ν	Ν	>300	
ZIT superior	10 x 10 x 55	-50°	162	185	175	174	
ZIT rădăcină	10 x 10 x 55	-50°	144	180	210	178	

Tab. 3.2 Valorile energiei de rupere KV în ZIT

Notă: N – Epruveta nu s-a rupt



Fig.3.22 Variația energiei de rupere KV cu temperature de încercare în ZIT

Analizând modul de variație a energiei de rupere KV în funcție de temperatura de încercare fig.3.21 și 3.22, se poate observa că îmbinarea sudată și ZIT prezintă o rezistență mare la rupere fragilă, comportarea lor fiind ductilă într-un domeniu larg de temperaturi ($-50^{\circ}C - +20^{\circ}C$).

3.5. Încercări la tracțiune statice

Rezultatele încercărilor la tracțiune sunt prezentate în tabelul 3.3, iar aspectul unei epruvete testate se arată în fig.3.28.

ab.3.3 Rezultatele determinarilor experimentale							
Nr. epruvetă	So (mm ²)	Fmax (N)	Rm (N/mm ²)	Loc rupere			
TT1	800.87	476226	595	Metal de bază			
TT2	796.45	476126	598	Metal de bază			
TT3	801.24	469729	586	Metal de bază			
TT4	799.22	460440	576	Metal de bază			



Fig.3.28 Localizarea ruperii în urma încercării la tractiune a probelor sudate

Analiza datelor obținute demonstrează că, de fiecare dată, ruperea s-a produs în materialul de

bază (MB) și că valorile rezistenței la rupere pentru toate cele 4 seturi de epruvete sudate sunt superioare celei minime impuse pentru materialul de bază (conform normei API 104, 2013), care este de 535 N/mm².

3.6. Încercări de îndoire la rece

Rezultatele încercărilor la îndoire laterală sunt prezentate in tab.3.4, remarcându-se faptul că până la atingerea unghiului de 180° nu s-a semnalat apariția vreunei fisuri. **Tab. 3.4** Conditii de încercare si rezultate obtinute.

Epruvete ID	Diametrul dornului (mm)	Unghiul de îndoire(°)	Rezultate
SB1	90	180	Acceptat
SB2	90	180	Acceptat
SB3	90	180	Acceptat
SB4	90	180	Accepta
SB5	90	180	Acceptat
SB6	90	180	Acceptat
SB7	90	180	Acceptat
SB8	90	180	Acceptat

Aspectul epruvetei sudate și testate la îndoire laterală este prezentat în fig. 3.34.



Fig.3.34 Imaginea epruvetei testate la îndoire laterală

3.7. Încercări de îndoire a epruvetelor cu crestătură

Imaginile macroscopice ale epruvetelor cu crestătură după testul de îndoire la rece sunt exemplificate în fig.3.38.

Se remarcă faptul că ruperea epruvetelor este precedată de deformații plasice importante și că nu s-au semnalat defecte de continuitate metalică.



Fig.3.38 Macrografia epruvetelor cu crestătură, API 5L X65M, 42"(1066.8 mm) x 31.75 mm după testare

3.8. Tenacitatea la rupere a îmbinărilor sudate

Predicția unei fracturi instabile sau creșterea unei fisuri preexistente reprezintă problema fundamentală în mecanica ruperii (fracturilor) [2],[7],[12],[31],[47],[49],[54],[57],[85]. Măsurarea experimentală a forței de propagare (conducere) a unei prefisuri obținută prin oboseală joacă un rol important în această predicție. Factorul de intensitate a tensiunii la vârful fisurii, (K_{IC}), deplasarea la deschiderea vârfului fisurii, (CTOD) și unghiul de deschidere la vârful fisurii (CTOA) sunt cei mai recunoscuți parametri utilizați în mecanica ruperii [17],[29],[65],[75],[99],[100] [105],[106],[107],[108],[113].

Valoriile critice ale deplasării la deschiderea vârfului fisurii (δ_m) sau CTOD sunt prezentate în tab.3.11, ele demonstrând că îmbinările sudate MAG din oțel X65M tratat termomecanic au o mare rezistență la rupere fragilă. Imaginile microfractografice din fig. 3.56 reliefează prezența unor striuri paralele mai mult sau mai puțin rectilinii, alături de zonele de clivaj ductil corespunzătoare planelor de alunecare.

Locația	12 O'clock		3 O'	clock	6 O'clock		
	WCL	FL/HAZ	WCL	FL/HAZ	WCL	FL/HAZ	
Valoarea critică δ (mm)	0.56	1.08	0.67	1.06	0.59	1.07	

Tab. 3.11 Valorile critice ale parametrului CTOD în sudură și pe interfața FL/HAZ



-a-



Fig. 3.56 Fractografia suprafețelor de rupere: a – în vecinătatea inițierii fisurii artificiale de oboseală; b – în vecinătatea sfârșitului deplasării la deschiderea vârfului fisurii

Rezultatele încercărilor de mecanica ruperii au demonstrat că zonele testate ale îmbinării sudate (sudură și interfața dintre linia de fuziune și ZIT), prezintă o rezervă semnificativă de plasticitate, ruperea lor fiind ductilă, iar extinderea stabilă a fisurii are loc dincolo de încărcarea maximă (Fm). Nu s-a observat ruperea fragilă sau discontinuități abrupte.

REZISTENȚA LA COROZIUNE TENSO-FISURANTĂ A ÎMBINĂRILOR SUDATE

4.1. Standul experimental

Coroziunea tenso-fisurantă apare prin acțiunea simultană a unui mediu chimic și a unui regim de solicitări statice cu cel puțin un efort de tracțiune și care conduce la fisurarea intergranulară sau transgranulară a materialului supus simultan celor două tipuri de solicitări [11],[39],[46],[48],[50],[60],[72],[101].Declanșarea acestui fenomen în mediu de hidrogen sulfurat provoacă fragilizarea materialului metalic de către atomii de hidrogen produși de coroziunea acidă în zona de suprafață. Hidrogenul absorbit este accelerat de prezența sulfurilor, de unde și faptul că, conținutul în sulf al materialelor trebuie să fie controlat riguros[44],[76],[83]. Atomii de hidrogen pot difuza în materialul metalic, reducând caracteristicile de ductilitate și de tenacitate și mărind susceptibilitatea la fisurare [3],[9],[13],[16],[21],[28],[32],[43],[45].

Mediul coroziv folosit fiind hidrogenul sulfurat (H_2S) find cel mai frecvent mediu coroziv care se întalneste la transportul produselor petroliere și al gazelor naturale.

Încercările de coroziune tenso-fisurantă au fost efectuate în conditii de deformare totală constantă, materializată cu ajutorul unor dispozitive de presolicitare la îndoire sub un anumit unghi. Epruvetele sunt de tip fâșie cu sudura dispusă în plan perpendicular pe sistemul de forțe care le acționează. Combinația de solicitare tensiune – deformație se afla în domeniul elastic.

4.2. Rezultate experimentale

Dimensiunile epruvetei sunt prezentate în fig.4.4, iar în fig.4.5 este arătat aspectul epruvetei înaintea deformării.



Fig.4.4 Forma și dimensiunile epruvetei



Fig.4.5 Imaginea epruvetei înainte de deformare

Valorile PH și concentrația de H₂S înregistrate la sfârșitul testului sunt prezentate în tab.1. **Tab.1** Mărimi înregistrate

pH/H ₂ S	valori sfârșit test
pH	3.62
H_2S	3202 ppm

Conform NACE TM 0177:2016, valoarea maximă a pH-lui la finalizarea testului este 4. Durata testului a fost de 720 ore, iar temperatura a fost menținută constantă, la $24^{\circ}C \pm 3^{\circ}C$.

4.3. Examinări metalografice

În fig.4.9 a, b si c sunt prezentate imaginile epruvetelor (rădăcină, zona de mijloc și partea superioară) la terminarea testului de coroziune



Fig.4.9 Aspectul epruvetelor la finalizarea testului de coroziune: a – rădăcină; b – mijlocul îmbinării sudate; c- partea superioară a îmbinării sudate

Epruvetele supuse coroziunii tenso-fisurante în mediu de hidrogen sulfurat au o valoare a pH –ului de 3,62, o concentrație de H_2S egală cu 3202 ppm și nu prezintă fisuri în cele trei zone ale îmbinărilor sudate.

DEFECTOLOGIA ÎMBINĂRILOR SUDATE MAG CU ROST ÎNGUST DIN OTEL API5LX65M TRATAT TERMOMECANIC

5.1. Introducere

La realizarea îmbinărilor sudate ale conductelor magistrale, controlul nedistructiv reprezintă una din fazele esențiale ale fabricației acestora. Stabilirea naturii defectelor este deosebit de utilă în identificarea cauzelor și definirea măsurilor de corectare a execuției sau a tehnologiei.

Controlul nedistructiv nu conduce la deterioararea îmbinărilor sudate și nu influențează în mod negativ comportarea în exploatare a acestora.

În schimb, controlul distructiv al îmbinărilor sudate se bazează pe încercări efectuate cu distrugerea probelor special confecționate. Dacă prin metodele de control nedistructiv pot fi determinate anumite categorii de defecte, valorile caracteristicilor mecanice pot fi stabilite numai prin încercări distructive [22],[59],[81].

Metodele de control nedistructiv folosite la îmbinările sudate din oțelul API 5L X65M tratat termomecanic, destinat execuției conductelor magistrale subterane și submarine având diametrul de 42"(1066,8 mm) și grosimea peretelui de 31.75 mm au fost:

- controlul vizual de suprafață;

- controlul cu pulberi magnetice;

- controlul cu radiații X.

5.2. Controlul vizual de suprafață

Aspectul exterior al îmbinărilor sudate realizate la parametrii tehnologici indicați în lucrările[68],[69],[70] este prezentat în fig.5.4, iar aspectul rădăcinii îmbinării sudate, în fig.5.5.



Fig. 5.4 Aspectul exterior al îmbinării sudate



Fig. 5.5 Aspectul rădăcinii al îmbinării sudate

5.3. Controlul cu particule magnetice

Controlul cu particule magnetice este o metodă de localizare a discontinuităților de suprafață sau a celor care se află în imediata vecinătate a suprafeței și poate fi aplicată numai materialelor feromagnetice. În principiu, aceasta metodă de control nedistructivă constă în magnetizarea piesei supusa controlului și depunerea pe suprafața acesteia a unei pulberi feromagnetice fine. În zonele unde există discontinuități se va forma un câmp magnetic de dispersie sau de scăpări datorită faptului că liniile de câmp magnetic vor ocoli discontinuitatea, fiind nevoite să iasă în afară materialului piesei [93]. Fenomenul fizic care permite punerea în evidența a defectului este apariția câmpului de dispersie în zona în care se află discontinuitatea. Examinarea cu pulberi magnetice, metoda umedă, cu ajutorul jugului magnetic al sudurii externe a conductelor magistrale este arătată în fig. 5.14.



Fig. 5.14 Examinarea cu pulberi magnetice a conductelor cu diametrul 42" si grosimea peretelui de 31.75mm

5.4. Controlul cu radiații penetrante RX

Generatorul portabil de raze X, C3003, este transportat și comandat în interiorul conductelor de către transportorul IRIS 10 X-Ray Crawler. Ansamblul transportator și generatorul de raze X este prezentat în fig. 5.19.



Fig. 5.19 Ansamblul transportator și generator de raze X tipul IRIS 10 În tabelul 5.2 sunt prezentate datele tehnice ale radiografiei efectuate iar in fig. 5.24 este arătată un film radiografic al examinării cu raze X a conductei de 42"x 31.75 mm. **Tab. 5.2** Informații oferite de radiografie

, Da	ate tehnice			
Sursa	Raze X			
Generatorul de raze X	ICM, tipul Sitex C3003			
Pata focală	Ø5mm x 0.8mm			
Materialul radiografiat	API 5L X65			
Grosime	31.75mm			
Diametru conductă	42" ((1066,8 mm)			
Tehnica	SWSI			
Distanța sursă –film	533mm			
Timpul de expunere	3min.			
Tensiunea de accelerare	300KV			
Curentul catodic	3mA			
Densitatea filmului	2.2 - 2.6			
Tipul Filmului	Kodak AA400			
Sensibilitatea	1%			
ICI	6 ISO 12			
Poziția ICI	Partea filmului			
Neclaritatea geometrică	0.31mm			
Expunerea	Panoramică			
Norma de interpretare	API 1104:2018			



Fig. 5.24 Radiografie a examinării cu raze X a conductei 42"x 31.75 mm

CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. NOI DIRECȚII DE CERCETARE

Lucrarea de doctorat "Contribuții privind procesul de sudare MAG în rost îngust a oțelurilor destinate execuției conductelor magistrale de gaz" își propune găsirea unei modalități de limitare a transformărilor microstructurale nedorite în zonele îmbinărilor sudate, concomitent cu mărirea productivității, prin implementarea unui proces special de sudare a unui oțel tratat termomecanic. Stratul de rădăcină a fost executat în varianta MAG cu spray arc & hot pass, iar straturile de umplere, în curent pulsat, realizandu-se o creștere substanțială a productivității prin folosirea atât a sudării automate interne a rădăcinii cât și prin folosirea a două capete de sudare pentru umplerea rostului. Concomitent, se obține o reducere a consumului de materiale de adaos, datorită rostului îngust.

Principalele concluzii și contribuții originale ale lucrării pot fi sintetizate astfel:

1.Varianta tehnologică de sudare MAG cu rost îngust folosind un echipament automat de sudare permite folosirea unei energii liniare reduse (2.97 - 5.67 kJ/cm) și viteze de sudare ce ating valori de 48 - 128 cm/min.

2.Execuția stratului de rădăcină și hot pass în spray arc este oportună întrucât datorită puterii mari de topire a arcului electric se evită defectele de tip lipsa de topire la rădăcină și între rădăcină și hot pass, defecte care ar putea apare datorită configurației rostului de sudare (prezența unui umăr de 1.27 mm cu deschiderea rostului "0,"mm).

3.Folosirea curentului pulsat sinergic pentru straturile de umplere permite sudarea în poziții dificile (vertical coborâtoare, peste cap) ca efect al controlului băii metalice, prin reducerea volumului acesteia.

4.Materialul de bază selectat, API 5L X65, este un oțel tratat termomecanic de înaltă rezistență mecanică, cu un grad de aliere mai scăzut comparativ cu alte oțeluri aflate în stare normalizată, având aceleași caracteristici de rezistență mecanică. Acest fapt este extrem de benefic pentru comportarea metalurgică și tehnologică la sudare a acestui oțel.

5.Sârmele de sudare selectate au o bună compatibilitate cu materialul de bază considerat (API 5LX65) și pentru satisfacerea condiției de rezistență mecanică, ele au o concentrație mai mare în elemente cu efect de durificare (C, Mn).

6.Stabilirea prin experiment a parametrilor optimi ai procesului de sudare MAG cu rost îngust, a condus la obținerea unor îmbinări sudate fără defecte de continuitate metalică (de tipul fisurilor, retasurilor de contracție, incluziunilor de zgură și porozităților) și a unei zone influențate termic (ZIT) puțin extinse.

7.Microstructura cusăturii sudate are un aspect dendritic cu orientare columnară a grăunților cristalinimi, iar ZIT –ul este constituită dintr-o matrice feritică cu mici cantități de bainită și carbonitruri ale elementelor de aliere.

8.Gradientul de duritate pe secțiunea transverală a îmbinărilor sudatedemonstrează că parametrii de regim termic stabiliți experimental preîntâmpină înmuierea zonei influențate termic (ZIT) și asigură bune proprietăți mecanice.

9. Rezultatele încercărilor dinamice de încovoiere prin șoc atestă că la cea mai coborâtă

temperatură de încercare, (-50°C), energia de rupere KV a porțiunii superioare și inferioare a metalului depus depășește valoarea minimă, de 38 J, impusă de norma specifică acestui material de bază.

10.Suprafața de rupere a epruvetelor de măsurare a tenacității are un aspect mat-fibros, iar caracterul acesteia este ductil, caracterizându-se printr-o viteză mică de deplasare a fisurii, respectiv prin valori mari ale energiei absorbite pentru propagarea acesteia.

11.Pentru condițiile experimentale folosite, rezistența la rupere prin tracțiune statică a îmbinărilor sudate prezintă valori, $Rm = 576....598 \text{ N/mm}^2$, superioare celor impuse pentru materialul de bază, $Rm \ge 535 \text{ N/mm}^2$.

12.Îmbinările sudate MAG în curent pulsat cu rost îngust și straturi multiple, realizate din oțel tratat termomecanic, X65M, au o capacitate ridicată de deformare plastică, dovedită prin lipsa fisurilor în cusătură până la atingerea unghiului de îndoire de 180°.

13.Rezultatele încercărilor de mecanica ruperii au demonstrat că zonele testate ale îmbinării sudate (sudură și interfața dintre linia de fuziune și ZIT), prezintă o rezervă semnificativă de plasticitate, ruperea lor fiind ductilă, iar extinderea stabilă a fisurii are loc dincolo de încarcarea maximă (Fm). Nu s-a observat apariția unei ruperi fragile sau a unor discontinuități abrupte, iar valorile deplasării la deschiderea vârfului fisurii sunt mult mai mari decât cele specificate în normele folosite la fabricația conductelor pentru petrol și gaze subterane și submarine.

14.Încercările de coroziune tenso-fisurantă în mediu de hidrogen sulfurat au pus în evidența o valoare a pH –ului de 3.62, o concentrație de H_2S egală cu 3202 ppm și inexistența fisurilor în cele trei zone ale îmbinărilor sudate.

15.Controlul vizual și cu particule magnetice, alături de examinările radiografice cu raze X, pe întreaga grosime a îmbinărilor sudate nu au identificat defecte specificate în normele impuse internațional acestor produse.

În încheiere, se poate arăta că abordarea și rezolvarea în limitele propuse a temei de cercetare ce face obiectul tezei de doctorat, prin urmărirea sistematică, punerea în evidență și fundamentarea științifică a transformărilor care intervin în îmbinările sudate MAG cu rost ingust, la care stratul de rădăcină a fost executat în varianta MAG cu spray arc & hot pass, iar straturile de umplere, în curent pulsat, reprezintă o contribuție originală.

Îmbinarea cercetării laturii aplicative a acestor investigații din punctul de vedere al nivelului proprietăților mecanice obținute cu latura fenomenologică, a determinării și explicării științifice a particularităților care definesc comportarea metalurgică și tehnologică la sudare a oțelurilor tratate termomecanic și care justifică îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate, face ca lucrarea să se înscrie în tendințele și metodologia modernă utilizată în cercetarea științifică.

Direcții viitoare de cercetare:

• oportunitatea sudării cu fascicul laser a oțelurilor tratate termomecanic;

• îmbinarea prin brazare cu laser, care va minimiza amestecul materialelor, procesul având la bază difuzia interfețelor dintre materialul de adaos topit și materialul de bază.

Bibliografie:

- 1. Adonyi Y. 2006, Heat affected zone characterization by physical simulations, Welding Journal, Vol.85, Issue 10, pp 27-42.
- 2. Anderson, T L: Fracture Mechanics Fundamentals and Applications. Second Edition, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 1995, pp.1-680.
- Arzola S., Mendoza-Flores J., Duran-Romero R., Genesca J. 2006, Electrochemical Bahavior of APIX70 Steel in Hydrogen Sulfide-Containing Solutions. Corrosion 62 (2006) 433-443.
- 4. Babkin and Gladkov 2016 Identification of Welding Parameters for Quality Welds in GMAW,Welding Journal 95, 37-46.
- 5. Banerjee K. Improving weldability of an advanced high strength steel by design of base metal microstructure. Journal of Materials Processing Technology 229 (2016) 596–608.
- 6. Bang K.S., Kim W.Y., Estimation and prediction of HAZ soft-ening in thermomechanically controlled rolled and accelerated cooled steel. Welding Journal 81, 8, 2002, 174-179.
- 7. Bao Y.and Wierzbicki T. On fracture locus in the equivalent strain and strain triaxiality space, International Journal of Mechanical Science, 46, 2004,81-98.
- 8. Barthel C., Klusemann B., Denzer R., Svendsen B. . Modeling of a thermomechanical process chain for sheet steels. International Journal of Mechanical Sciences 74 (2013) 46–54.
- Bordeasu I., Popoviciu M.O., Mitelea I., Balasoiu V., Ghiban B., Tucu D., Chemical and mechanical aspects of the cavitation phenomena, Rev.Chim. (Bucharest), 58, no.12, 2007, pp.1300-1304.
- 10. Burca M., Negoitescu S., Sudarea MIG-MAG, Editura Sudura Timisoara 2004, pp.1-224.
- Burduhos-Nergis D.P, Carmen Nejneru C., Burduhos-Nergis D.D, Savin C., Sandu V.S., Toma S.L., Bejinariu C., The Galvanic Corrosion Behavior of Phosphated Carbon Steel Used at Carabiners Manufacturing, Rev.Chim (Bucharest),70,no.1, 2019,pp.215-219.
- 12. Burgold A., Henkel S., Roth S., and Kuna M., Bierman H.: Fracture mechanics testing and crack growth simulation of highly ductile austenitic steel, Materials Testing 60 (2018) No.4 pp.341-348.
- 13. Cendales E.D., Orjuela F.A. and Chamarravi O., Computational modeling of the mechanism of hydrogen embrittlement (HE) and stress corrosion cracking (SCC) in metals, Journal of Physics,2016, 687.
- 14. Coelho SR et al 2013 Journal Materials Science & Engineering A 578, 125.
- Coelhoa R.S., Corpas M., Moreto J.A., Jahnc A., Standfußc J., Kaysser-Pyzalla, Pinto A.H. Induction-assisted laser beam welding of a thermomechanically rolled HSLA S500MC steel: A microstructure and residual stress assessment. Materials Science & Engineering A 578 (2013) 125–133.
- 16. Costa Mattos H., Bastos I. and Gomes C. 2014 Corrosion Science 80, 143.
- 17. Dawes, M G.: Elastic-Plastic Fracture Toughness based on COD and J-contour Integral Concepts in Elastic-Plastic Fracture. ASTM STP 668, American Society for Testing and Materials, 1979. pp 307-333.
- 18. Deheleanu D., Sudarea prin topire, Editura Sudura Timisoara 1997, pp.198.
- 19. Ding W.H., Research and Development into Low Temp Toughness of Heavy Wall X80 at Shougang. 9th International Conference on Pipeline. Calgary 2012, 117-121.
- 20. Dobrota D., Corrosion of Welded Metal Structures of Mining Equipment, Rev.Chim (Bucharest), 69, no.9, 2018, pp.2563-2566.
- 21. Domizzi G., Anteri G. and Ovejero Garcia J., Corrosion Science 43, 2001, 325-339.

- 22. Dong Su Bae, Sang Pill Lee, Joon Hyun Lee : Evaluation on defect in the weld of stainless steel materials using nondestructive technique. Fusion Engineering and Design, Vol. 89, Issue 7 8, October 2014, pp. 1739 1745.
- 23. Faiz F., Mustafa I. Rao, Automatic Welding Machine for Pipeline Using MIG Welding Process, International Research Journal of Engineering and Technology, Vol.3, Dec.2016.
- 24. Garcia K.E., Morales A.L., Barrero C.A., Greneche J.M.: New contributions to the understanding of rust layer formation in steels exposed to a total immersion test. Corrosion Science Vol.48, 2006, pp. 2813 2830.
- 25. Gholamreza K., Hesam P., Mohammad R. J., Abbas G., Microalloyed steel welds by HF-ERW technique: Novel PWHT cycles, microstructure evolution and mechanical properties enhancement International. Journal of Pressure Vessels and Piping 152 (2017) 15-26.
- Ghosha S., Singha A.K., Mulaa S., Chandab P., Mahashabdeb V.V., Royb T.K. Mechanical properties, formability and corrosion resistance of thermomechanically controlled processed Ti-Nb stabilized IF steel. Materials Science & Engineering A 684 (2017) 22–36.
- 27. Gong P., Palmiere E.J, Rainforth W.M. Dissolution and precipitation behavior in steels micro alloyed with niobium during thermo mechanical processing. Acta Materialia 97 (2015) 392–403.
- Guo H. and He X., Electrochemical Study on Corrosion Behavior of X70 Steel in Weakly Acidic Solutions Containing H₂S, 2006, Journal Corrosion & Protection, (05):232:236.
- 29. Hedia H.S., Shabara M.A., Fattah A.A and Helal M.M. 2005, Effect of Crack Configuration and Pre-Crack Length on Stress Intensity Factors, Journal of material prufung 47 10 2-7.
- Hildebrand J., Werner F., Change of structural condition of welded joints between highstrength fine-grained and structural steels, Journal of civil engineering and management, 2, 2004,87-95.
- 31. Irwin G.: Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. Journal of Applied Mechanics 24 (1957), pp.361–364.
- Jafari, S., Harandi S.E., Singh Raman R.K.: A Review of stress-corrosion cracking and corrosion fatigue of magnesium alloys for biodegradable implant applications. J. Mater. Vol. 67, 2015, pp. 1143–1153.
- Jeong S., Park G., Kim B., Moon J., Park J. and Lee C. Precipitation behavior and its effect on mechanical properties in weld heat affected zone in age hardened FeMnAlC lightweight steels. Journal Materials Science and Engineering A. 2019 Vol. 742, pp. 621 68.
- 34. Kannan M.B., Dietzel W.: Pitting-induced hydrogen embrittlement of magnesiumaluminum alloy. Mater. Des. 2012, Vol. 42, pp. 321–326.
- 35. Kang Zhou, Ping Yao: Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 1241, June 2019, pp. 170-198.
- 36. Karadeniz E., Ozsarac U. and Yildiz C., The effect of process parameters on penetration in gas metal arc welding processes, Journal of materials and design 28, 2005.
- 37. Kim H., Ki H., Moon, In J., Kim W. Ki, Park G. B. and Lee S. K. Influence of carbon equivalent value on the weld bead bending properties of high strength low alloy steel plates. Journal of Materials Science & Technology.2017.Vol. 33, Issue 4, pp. 321 329.
- 38. Kim W.K., Koh S.U., Yang B.Y. and Kim K.Y., Corrosion Science and Technology Vol.6, No.3, 2007, 96-102.

- 39. Kisaka Y. and Gerlich A. 2016 Review and critical assessment of hardness criterion to avoid sulfide stress cracking in pipeline welds, ASME Pressure Vessels and Piping Conference 6B, Vancouver, Canada.
- 40. Krampit A.G., Krampit N.U., Krampit M.A. Mechanical properties of welded joint in welding with pulsed arcs, Applied Mechanics and Materials, Vol.379 (2013) 195-198.
- 41. Laitinen R., Porter D.A., Karjalainen L.P., Leiviska P. and Komi J., 2013 Physical Simulation for Evaluating Heat Affected Zone Toughness of High and Ultra High Strength Steels, Materials Science Forum Vol.762, 711-716.
- 42. Liangyun L., Konga X., Hua Z., Qiub C., Zhao D., Dub L.. Hydrogen permeation behavior in relation to microstructural evolution of low carbon bainitic steel weldments. Corrosion Science 112 (2016) 180–193.
- 43. Lupescu S., Corneliu Munteanu C., Istrate Earar K., The Influence of Zr on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance in Mg-Y-Zr Biodegradable Alloys, Rev.Chim (Bucharest),69, no.12, 2018, pp.3382-3385.
- 44. Ma H., Cheng X., Li G., Chen S., Quan Z., Zhao S., Niu L. 2000 The Influence of Hydrogen Sulfide on Corrosion of Iron Under Different Conditions. Pergamon. Corrosion Science 42, 1669-1683.
- 45. Melchers E.R., Paik K.J.: Effect of tensile strain on the rate of marine corrosion of steel plates. Corrosion Science, Vol. 52, Issue 10, 2009, pp. 2298 2303.
- 46. Mitelea I., Bordeasu I., Popoviciu M.O., Hadar A., Corrosion of stainless steels with "soft"martensitic structure, Rev.Chim (Bucharest), ,58,no.2,2007,pp.254-57.
- 47. Mitelea I., Simionescu D., Craciunescu M.C. and Utu I.D. : Fracture toughness of MAG welds in pulsed current of API5L X65M thermomechanical treated steel Material Testing 62 (2020) 3, pp.304-310.
- 48. Mitelea I., Simionescu D., Bordeasu I., Susceptibility to Stress Corrosion Cracking in Hydrogen Sulfide Environment of MAG Welded Joints of API 5L X65M Thermomechanical Treated Steel, Rev.Chim (Bucharest), 70 no.12, 2019, pp.4405-4410.
- 49. Moore P., Pisarski H.: Validation of methods to determine CTOD from SENT specimens, Proceedings ISOPE-2012,of the 22nd International Offshore (Ocean) and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece,(2012), pp.1-8.
- 50. Nazarova M.N., Akhmetov R.R., Krainov S.A. Temperature factors effect on occurrence of stress corrosion cracking of main gas pipeline. Earth and Environmental Science 87, 2017.
- 51. Nie Y., Shang C., Song X, etal. Properties and homogeneity of 55oMPa grade TMCP steel for ship hull (J).Metallurgy and Materials, 2010, 17(2): 179-184.
- 52. Nishioka K. Market requirements of thermomechanically processed steel for the 21st century, Steel World 2000, vol.5, no.1, pp. 61-67.
- 53. Nishioka K.and Ichikawa K. Progress in thermomechanical control of steel plates and their commercialization. Science and Technology of Advanced Materials, 13, 2012.
- 54. Oh C.K, Kim Y.J., Park J.M., Baek J.H. and Kim W.S.2007, Development of stress modified fracture strain for ductile failure of API X65 steel, International Journal Fracture, 143, 119-33.
- Opiela M., Elaboration of thermomechanical treatment conditions of Ti-V and Ti-Nb-V microalloyed forging steels, Archives of Metallurgy and Materials 2014, vol.59, issue 3, pp. 1181-1188.
- 56. Paul A.and Mark C., CRC Evans Automatic Welding USA, World of pipelines, Vol. 14, 2014.
- Perez N. Fracture Mechanics 1st Ed. (Boston: Kluwer Academic Publishers), 2004,47-96.

- 58. Poznyakov V., Jdanov S., & Maksimenko A. (2012). Structure and properties of welds made from S355J2 steel. Automat Weld, 8, 7-11.
- 59. Raju D.T. and Shanthi K., Analysis on x-ray parameters of exposure by measuring x0ray tube voltage and time of exposure ,The International Journal of Engineering and Science, Volume 3, Issue 6, 2014, pp 69-73.
- 60. Ralston K.D., Williams G., Birbilis N.: Effect of pH on the grain size dependence of magnesium corrosion. Corrosion, Vol. 68, 2012 pp. 507–517.
- 61. Robert Andrews, Harry Kamping, Henk de Haan, Otto Jan Huising and Neil Milwood. Guidance for mechanized GMAW of onshore pipelines. The Journal of Pipeline Engineering, Vol. I 2, No.4, 2013
- 62. Safta V. Defectoscopie Nedistructiva Industriala. Editura Sudura, 2001.
- 63. Safta V.I and Safta V.I, Incercarile tehnologice si de rezistenta ale imbinarilor sudate sau lipite. Editura Sudura Timisoara, 2006, pp.1-339.
- 64. Scotti A., Ponomarev V., Lucas W. 2012, A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding, Journal of Materials Processing Technology 212(6), 1406.
- 65. Shen G. and Tyson W. R. Evaluation of CTOD from J-integral for SE(T) specimens, Proceedings of the Pipeline Technology Conference, Ostend, Belgium (2009), pp.1-6.
- 66. Shin S.Y., Hwang B., Lee S., Kim N. J., Ahn S.S.2007 Correlation of microstructure and charpy impact properties in APIX70 and X80 line pipe steels. Materials Science and Engineering: A458 281-9.
- 67. Siciliano F., Modern High Strength Steels for Oil and Gas Transmission Pipelines. 7th International Conference on Pipeline, Calgary 2008, 29-35.
- Simionescu D., Mitelea I., Burcă M.: Opportunities of narrow gap MAG welding of API 5L X65M steel pipeline, Proceedings of the 26th International Conference on Metallurgy and materials, METAL 2017, Brno, Czech Republic, pp.699-704. DOI:10.1088/1757-899X/416/1/012008.
- 69. Simionescu, D., Mitelea I., Burca M., Utu I.D. Mechanical behavior of narrow gap MAG welding of API 5L X65M steel pipeline. IOP Conference Series: Materials Science Engineering 416 (2018) pp.1-8.

DOI: 10.1088/1757-899X/416/1/012008.

- Simionescu D., Mitelea I. and Burca M., Utu I.D.: Cold bending characteristics of MAG pulse welding of API 5LX65 thermomechanical treated steel. Metal 2019, International Conference on Metallurgy and Materials, published 2019, pp.532-539
- 71. Srinivasa R., Gupta O.P., Murty S.S. and Rao A. 2009, Effect of process parameters and mathematical model for the prediction of bead geometry in pulsed GMA welding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology , 45 (5-6), 496-505.
- 72. Strobl Sau: Stress Corrosion Cracking. Pract. Metallogr. Vol.54, Issue.3, 2017, pp. 153 162.
- 73. Viggo T. and Needleman A., Analysis of the Charpy V-notch test for welds. Engineering Fracture Mechanics 65, no.6, 2000, 627-643.
- 74. Wang W., Shan Y.Y., Yang K. Study of High Strength Pipeline Steels with Different Microstructures. Materials Science and Engineering A, 2009, 502:38-44.
- 75. Wells, A. A.: Unstable crack propagation in metals: cleavage and fast fracture. Proceedings of the crack propagation symposium, Vol.2, Cranfield, UK (1961) pp.210-230.
- Winzer N., Atrens A., Song G., Ghali E., Dietzel W., Kainer K.U., Hort N., Blawert C.
 : A critical review of the stress corrosion cracking (SCC) of magnesium alloys. Adv. Eng. Mater. 2005, Iss.7, pp. 659–693.

- 77. Xin Q. 2007, The Study of Microstructure and Mechanical Properties for Pipeline-Steel X65 (Liaoning: University of Science and Technology).
- 78. Xu W.H., Lin S., Fan C.L., Ynag C.L. Predictionand optimization of weld bead geometry in oscillating arc narrow gap all-position GMAW welding. International Journal Advance Manufacturing Technology, 2014, 72, 1705-1716.
- Yajima, 'Extensive Application of TMCP-manufactured High Tensile Steel Plates to Ship Hulls and Offshore Structures' Mitsubishi Heavy Industries Technical Review vol. 24, no. 1, February 1987.
- 80. Yapp D.and Blackman S.A., Recent Developments in High productivity Pipeline Welding, 2004, Vol.XXVI, No.1/89.
- 81. Yiming Huang, Dejin Zhao, Huabin Chen, Lijun Yang, Shanben Chen : Porosity detection in pulsed GTA welding of 5A06 Al alloy through spectral analys. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 259, September 2018, pp. 332-340.
- 82. Zhang M.C., Yang K., Shan Y.Y. The Effect of Thermo-mechanical Control process in Microstructures and Mechanical Properties of a Commercial Pipeline Steel. Materials Science and Engineering A., 2002, 225:14-20.
- 83. Zhang T. et al 2017 International Journal of Hydrogen Energy 42(39) 25 102.
- 84. Zhou M, Du L, Liu X 2011 Journal of Iron and Steel Research, International **18(3)** 59.
- 85. Zhu X. and Joyce J.A. Engineering Fracture Mechanics 2012, 85:1-46.
- 86. Ziad M., Frédéric R., Ngoc T. T. Theoretical and numerical modeling of the thermomechanical and metallurgical behavior of steel. International Journal of Plasticity 27 (2011) 414–439.
- 87. XXX ANSI/NACE MR0175/ISO 15156:2015, Petroleum, petrochemical and natural gas industries Materials for use in H₂S containing environments in oil and gas productions.
- 88. XXX ANSI/NACE TM-0177: 2016. Laboratory Testing of Metals for Resistance to Sulfide Stress Cracking and Stress Corrosion Cracking in H₂S Environments.
- 89. XXX API 1104, Welding of Piplines and Related Facilities, Twenty-First Edition, 2013.
- 90. XXX API Specification 5L, Specification for Line-Pipe, Forty-Sixth Edition, 2018.
- 91. XXX ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sect.V. Nondestructive Examination, 2017.
- 92. XXX ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sect.II Part C. Specifications for Welding Rods, Electrodes and Filler Metals, 2017.
- 93. XXX ASM Metals Handbook Vol.17 1989. Nondestructive Evaluation and Quality Control
- 94. XXX ASTM A370-13, Standard Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products.
- 95. XXX ASTM E8-16, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
- 96. XXX ASTM E23-12, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.
- 97. XXX ASTM E190-14, Standard Test Method for Guided Bend Test for Ductility of Welds.
- 98. XXX ASTM E384-11, Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials.
- 99. XXX ASTM E1290-08: Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement (Withdrawn 2013). American Society for Testing and Materials, 2008.
- 100. XXX ASTM E1820 11: Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. American Society for Testing and Materials, 2011.
- 101. XXX ASTM G30-97(2016), Standard Practice for Making and Using U-Bend Stress-Corrosion Test Specimen.

- 102. XXX ASTM G39:2011. Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens.
- 103. XXX American Welding Society, Welding Handbook, Volume 2, Welding processes, Part 1,Ninth Edidition,p.159.
- 104. XXX American Welding Society, Welding Handbook, Volume 4, Materials and Applications, Part 1, Ninth Edition, p.41.
- 105. XXX BS 5762:1979: Methods for crack opening displacement (COD) testing. British Standards Institution, 1979.
- 106. XXX BS 7448-1:1991: Fracture mechanics toughness tests: Part 1: Method for determination of Kic, critical CTOD and critical J values of metallic materials. British Standards Institution, 1991.
- 107. XXX BS 7910:2005: Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. British Standards Institution, 2005, pp.1-306.
- 108. XXX BS EN ISO 15653-2010: Metallic materials Method of test for the determination of quasistatic fracture toughness of welds. British Standards Institution, 2010.
- 109. XXX DNVGL-ST-F101:2017. Submarine Pipeline Systems. Det Norske Veritas Germanisher Lloyd, pp.1-521.
- XXX EN10208:2009: Steel pipes for pipelines for combustible fluids. Technical 110. delivery conditions.
- 111. XXX Instron da/dN Crack Propagation Software for Instron 8800 Systems (version 32).
- 112. XXX Instron K1C Fracture Toughness Software for Instron 8800 Systems (version 32).
- 113. XXX ISO 12135:2002: Metallic materials Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness. International Standards Organization, Geneva, Switzerland (2008), pp.1-7.
- 114. XXX TWI Are TMCP steels readily weldable?, Material preluat de pe internet de la adresa <u>www.twi-global.com.</u>