

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF WELDING REGIME PARAMETERS ON THE QUALITY OF WELDED PARTS MADE OF CARBON AND LOW-ALLOY STEELS

Doctoral Thesis – Summary

for the award of the scientific title of Doctor
at the Politehnica University of Timișoara
in the doctoral field of Materials Engineering

Author: Eng. Cioroagă Bogdan-Dorel

scientific supervisor: Prof. Univ. Dr. Eng. **Socalici Ana Virginia**

September, 2025

PREFACE

This doctoral thesis is the result of sustained research and documentation efforts carried out within the Faculty of Engineering in Hunedoara, Politehnica University of Timișoara.

The topic of the thesis — the influence of submerged arc welding parameters on welded joints made of P355 steel intended for the manufacture of pressure vessels — addresses a current subject with direct applicability in the industry of technological equipment subjected to extreme stresses.

This research was motivated by the need to optimize the manufacturing processes of pressurized vessels, with the aim of improving reliability, increasing service life, and reducing operational risks. By combining experimental analyses with mathematical modeling, the study seeks to identify welding regimes that provide the best mechanical and structural performance.

I would like to express my gratitude to Professor Dr. Eng. Ana Virginia Socalici, my scientific supervisor, for her overall coordination of the research activities and for the support offered throughout the stages of the thesis.

Special thanks are extended to Professor Dr. Eng. Emanoil Linul for his support in conducting mechanical testing within the Department of Strength of Materials at the Faculty of Mechanical Engineering, Politehnica University of Timișoara, as well as to Dr. Eng. Iosif Hulka from the Research Institute for Renewable Energies (ICER) – UPT, for his assistance with scanning electron microscopy (SEM) analyses.

I am grateful to the members of the advisory committee — Associate Professor Dr. Eng. Vasile George Cioată, Lecturer Dr. Eng. Amalia Ana Dascăl, and Associate Professor Dr. Eng.

Marius Ardelean — for their insightful comments, constructive suggestions, and professional support throughout the research process.

I also thank the company Reva S.A. from Simeria for their technical support during the applied phases of the thesis, through access to equipment, the provision of materials, and valuable experimental contributions.

This work reflects a collaboration between the academic and industrial sectors, aiming to apply scientific knowledge to the improvement of technological processes. I hope the results obtained will contribute to the advancement of the field of industrial welding and serve as a foundation for future research.

Part I

THEORETICAL APPROACHES

CHAPTER 1:

MATERIALS USED FOR PRESSURE VESSELS

A detailed overview is presented of the technological and engineering requirements related to the materials used in the construction of pressure vessels, highlighting the interdependence between mechanical properties, operational behavior, and compliance with safety standards. The correct choice of manufacturing material directly influences the safety, reliability, and durability of the technological installations in which these vessels are used [1/1].

The discussion begins with a functional description of pressure vessels and the industrial contexts in which they operate — such as the chemical, petrochemical, food, and energy industries — emphasizing that these vessels must withstand high internal pressures, thermal variations, and corrosive conditions. The main operating conditions that influence material selection are analyzed: working pressure, temperature, the nature of the internal environment (corrosive or inert), load cycles, and regime variations [2/5]. Figure 1/1 shows examples of different types of pressure vessels.

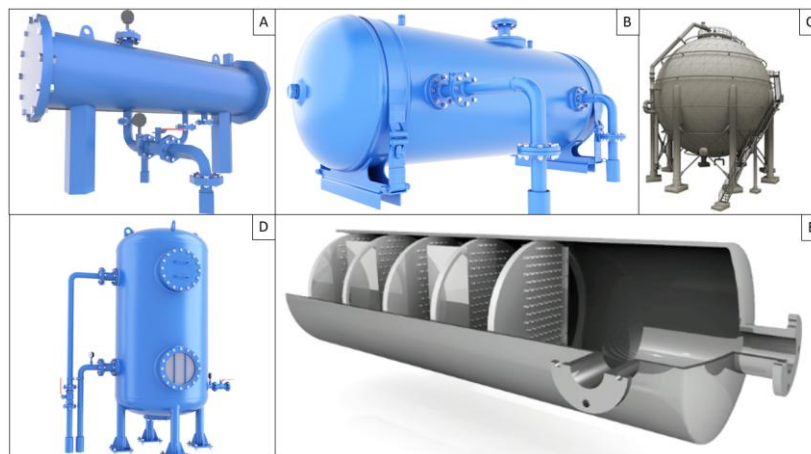


Fig. 1 / 1.1 – Types of Pressure Vessels:

A - Horizontal Pressure Separator, B - Horizontal Pressure Vessel, C - Spherical Pressure Tank, D - Vertical Pressure Separator, E - Pressure Vessel with Internal Compartments [1/1, 3/7]

Special attention is given to the classification of pressure vessels based on their geometric shape and mounting position (horizontal, vertical, spherical). Concepts related to the distribution of mechanical stresses in the vessel walls — longitudinal, circumferential, and radial stresses — are presented, along with the associated thin-wall calculation equations used to determine the minimum required wall thickness based on operating parameters [1/1].

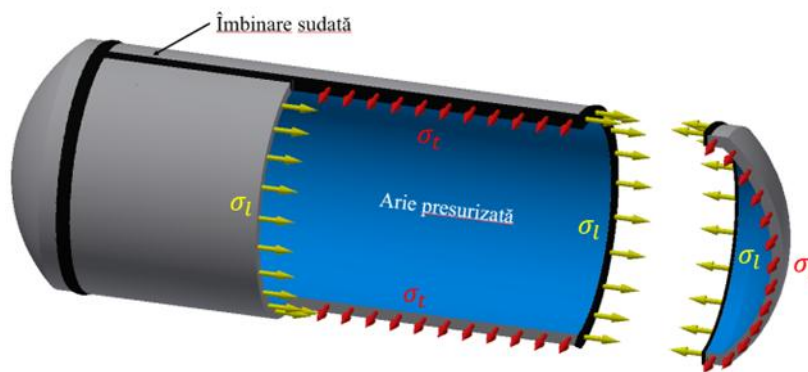


Fig. 2 / 1.2 – Representation of Stresses in Thin-Walled Pressure Vessels

The sizing criteria for wall thickness, the applied safety factors, and the influence of the joining method—particularly welding—on structural behavior are discussed. It is emphasized that the circumferential (hoop) stress is generally the determining factor in wall thickness design, and welded joints must be carefully designed and controlled to avoid stress concentrations and defect initiation [2/5].

The classification and selection of materials are then detailed: carbon steels (with varying carbon content), low- and medium-alloy steels, as well as austenitic and ferritic stainless steels. These materials are analyzed from the perspective of mechanical properties (strength, ductility, hardness, fatigue), corrosion behavior, and weldability [1/1].

The chapter presents degradation phenomena caused by corrosion, such as general oxidation, pitting (localized corrosion), exfoliation, and intergranular corrosion. It explains how anti-corrosion protection treatments—galvanizing, metal spraying, organic coatings—contribute to extending the service life of components exposed to aggressive environments [2/2].

Finally, a comparison is made between national standards (STAS) and modern international standards (EN, ASTM), noting the transition toward the application of EN 10028-3 for weldable plates used in pressure vessels [4/8, 5/29, 6/30], and ASTM A516 for steel plates intended for moderate or low-temperature applications [7/31]. The advantages of using internationally certified materials are highlighted in terms of traceability, reliability, and compatibility with European regulations.

The content of the chapter reinforces the importance of correct material selection for the operational performance of pressurized vessels, emphasizing the role of protective treatments, welded joints, and compliance with current standards to ensure a long and safe service life.

CHAPTER 2:

ASPECTS REGARDING SUBMERGED ARC WELDING TECHNOLOGY

The submerged arc welding (SAW) technology is widely used in large-scale industrial applications, particularly in the manufacturing of pressure vessels. The method stands out for its efficiency and adaptability in welding large joints, performed in a protected environment where the molten weld pool is completely covered by a layer of flux.

The process begins with a series of essential preparatory operations: selection of the semi-finished product (typically steel plates), cutting, preparation of standardized weld joints (beveling), mechanical and chemical cleaning of the joint areas, followed by positioning and securing the components using suitable fixtures. The correct choice and geometry of the joint are critical for minimizing internal stresses and distortions [8/33].

Welding parameters are adjusted via a digital control panel that communicates with the power source and the mobile welding assembly. The system uses three-phase power sources, either transformer or inverter-based, control panels, mobile carts with single or multiple torches, beam-mounted consoles, and supports for tubular components [9/35]. These systems allow for both longitudinal and circular contour welding, depending on the application.

The consumable materials include the electrode wire (copper-coated for increased conductivity) and the protective flux. The flux can be fused, agglomerated, or mixed, and serves several functions: protection, alloying, and degassing. The type and granulation of the flux directly influence weld quality and susceptibility to moisture [10/34].

Welding regimes require careful coordination of parameters: arc voltage, current intensity, welding speed, electrode angle, and current type (direct or alternating). These factors affect

dilution, penetration, and weld bead homogeneity. Incorrect parameter settings can lead to defects such as cracks, porosity, inclusions, lack of penetration, or contamination of the weld pool [8/33].

Welding methods include straight-line welding (for longitudinal joints) and circular contour welding (for tubes), with variations such as conventional single-electrode welding, twin-arc welding, tandem welding, and tandem twin-arc welding. Each method offers specific advantages in terms of speed, penetration, and productivity.

To clearly illustrate the organization of the process, figure 3/2.7 presents a schematic of the submerged arc welding equipment, highlighting the main components: power source, wire feed mechanism, guidance system, and flux hopper. This diagram aids in understanding the operation of the automated system and how welding parameters are controlled.

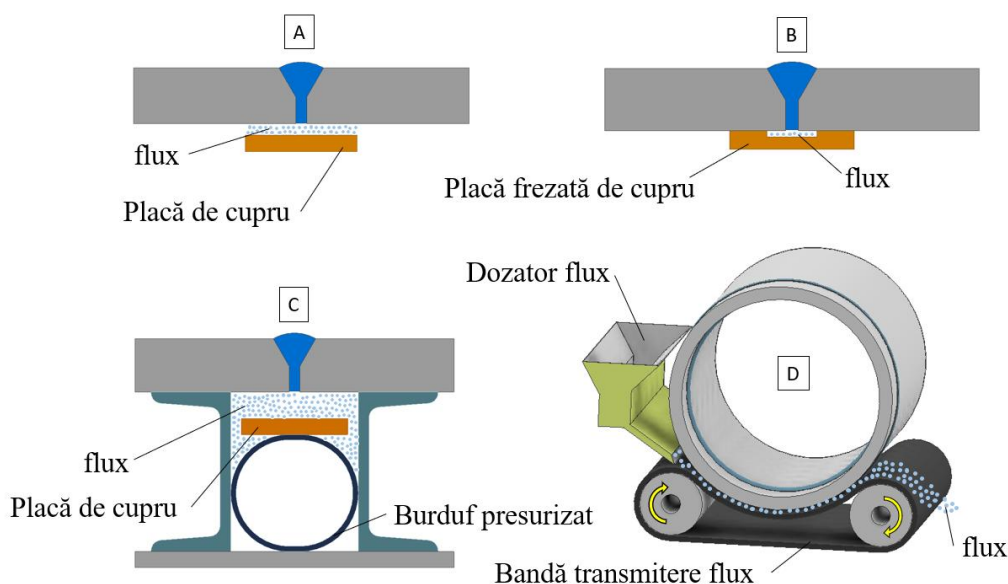


Figure 3/2.7 – Diagram of the Submerged Arc Welding Equipment [8/33]

During the welding process, a range of defects may occur due to improper parameter settings, contamination, or unsuitable filler materials. The most common issues include porosity, lack of penetration, longitudinal or transverse cracks, and slag inclusions. These types of nonconformities are illustrated in figure 4/2.12, which systematizes the main possible defects in the weld seam. This visual tool is valuable for identifying and preventing such defects in industrial practice.

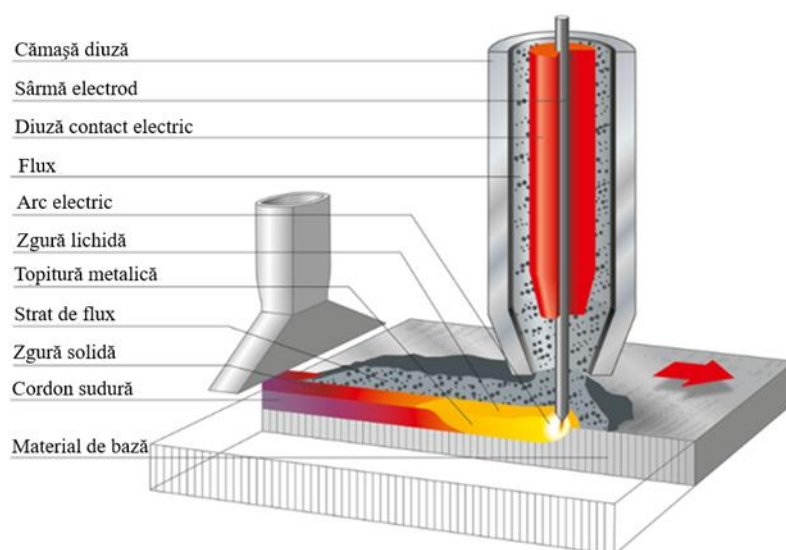


Figure 4/2.12 – Types of Possible Defects in Weld Seams [11/43]

The advantages of the technology include superior protection of the molten weld pool, absence of spatter, the possibility of alloying through flux or filler material, full penetration in a single pass, high efficiency, and reduced human intervention through automation.

The limitations are related to the exclusive use in horizontal positions, high equipment costs, sensitivity to moisture, and inefficiency when welding small joints or special materials [10/34].

Part II

EXPERIMENTAL RESEARCH

CHAPTER 3:

PREPARATION AND INSPECTION OF WELDED SAMPLES

The research focused on producing welded samples from P355N steel in the form of rolled plate, a material commonly used in the construction of tank wagons. The samples were welded under varying regimes using the submerged arc welding (SAW) process, under real production conditions at the company Reva SA Simeria.

Reva SA Simeria, a company with a long-standing tradition in Romania's railway industry, specializes in the manufacturing and reconditioning of freight wagons, including modern tank wagons with capacities of 60 and 85 m³. The experimental activity took place within this industrial facility, with an applied character aimed at improving the quality of welded joints—critical for the safety and durability of the wagons.

Weld quality was rigorously inspected through non-destructive testing methods such as ultrasonic testing (UT), magnetic particle inspection (MT), and X-ray radiography, the latter performed in a special irradiation chamber capable of analyzing the entire wagon.

The study particularly focused on the weld joint of the tank wagon shell made of P355N steel—a critical longitudinal joint approximately 10 meters long—produced by submerged arc welding using a semi-automatic installation. This joint must ensure high mechanical strength and tightness for the transport of liquid or gaseous substances.

The results showed that the arc voltage directly influences the weld bead geometry, causing an increase in bead width and a decrease in bead height as voltage increases, while also potentially leading to defects such as lack of root penetration [12/44].

Welding current intensity proved to be a key factor in penetration depth and the extent of the heat-affected zones (HAZ); higher current levels encouraged surface defects like porosity or excessive penetration. Regarding welding speed, it was associated with reduced bead width and height, also influencing the size of the HAZ. Additionally, the electrode angle had a significant effect on the uniformity and penetration of the weld; smaller angles tended to cause excessive penetration, while larger angles were linked to incomplete fusion.

To investigate the influence of varying SAW parameters, constant working conditions were defined and are detailed in Table 1/3.1:

Table 1/3.1 – Conditions for Producing the Welded Samples [13/46]

Condiții de sudare	Descriere	Codificare	Standard
Procesului de sudare	Sudare sub strat de flux cu electrod – sârmă	121	EN ISO 4063
	Îmbinare cap la cap	BW	SR EN 287–1
	Sudare pe o singură parte	bs	
	Suport la rădăcină	mb	
	Sudare dintr-o trecere	sl	
	Poziție de sudare orizontală	PA	SR EN ISO 6947
	Dimensiune rost de sudare 1 mm	I	EN ISO 4063
Material de bază	Oțel carbon de granulație fină	P355 N	EN10023-3
	Tablă laminată de grosime 6 mm	-	
Mediu protector	Praf de flux	OK flux 10.47	-
	Înălțime strat depus 25 mm	-	-
Material de adaos	Sârmă de cupru $\Phi 3,2$ mm, aliată cu molibden, pentru sudarea cu arc scufundat a	OK Autrod 12.24	-

	oțelurilor nealiat și slabe aliat		
--	--------------------------------------	--	--

Pentru realizarea experimentărilor au fost definite patru categorii principale de regimuri de sudare, fiecare asociată cu un parametru caracteristic variabil în cinci trepte. Regimurile au fost codificate pentru o gestionare clară, utilizând formatul Px-Ty, unde „P” indică categoria și „T” treapta de variație. Regimul P4-T4 corespunde regimului standard industrial, folosit ca referință. Toate regimurile sunt prezentate în tabelul 2/3.2.

Tabelul 2/3.2. Regimuri de sudare specifice parametrilor supuși studiului

Parametrul caracteristic	Regim de sudare	Valoare parametru caracteristic	Unitate de măsură
Tensiunea curentului de sudare	P1-T1	22	V
	P1-T2	26	
	P1-T3	30	
	P1-T4	34	
	P1-T5	38	
Intensitatea curentului de sudare	P2-T1	300	A
	P2-T2	400	
	P2-T3	500	
	P2-T4	600	
	P2-T5	700	
Viteza de sudare	P3-T1	25	cm/min
	P3-T2	50	
	P3-T3	75	
	P3-T4	100	
	P3-T5	125	
Unghiul de înclinare al electrodului	P4-T1	60	grade
	P4-T2	45	
	P4-T3	75	
	P4-T4	90	

Probele sudate, constând din două plăci de 6×125×600 mm, au fost realizate cu o instalație semiautomată de sudare sub strat de flux, aflată în dotarea Reva SA. Această instalație este utilizată în mod uzual pentru sudarea longitudinală a învelitoarelor vagoanelor cisternă, formate din tablă roluită și închisă prin sudură pentru a obține corpul cilindric al vasului.

Instalația de sudare utilizată este compusă dintr-o grindă mobilă cu torță, sistem de depunere și colectare a fluxului, asigurând avans constant și poziționare stabilă a torței în timpul sudării. Pregătirea materialului de bază a implicat debitarea plăcilor pe mașină de tăiat cu plasmă, urmată de curățarea marginilor prin șlefuire pentru eliminarea oxizilor și fixarea cap la cap cu puncte de sudură, menținând un rost de 1 mm.

Pentru susținerea materialului topit în timpul sudării, s-a utilizat o bandă ceramică, care are rolul de a etanșa rostul și de a conferi cordonului o formă profilată. Sudarea propriu-zisă s-a realizat prin orientarea torței pe rostul îmbinării, amorsarea arcului având loc sub stratul de flux, topind progresiv materialul de adaos, materialul de bază și parțial fluxul.

Un fascicul laser asigură ghidarea exactă a sârmei electrod pe direcția rostului. Fluxul este alimentat direct lângă electrod, iar după solidificare, stratul de flux este aspirat, lăsând un cordon de sudură acoperit de zgură. Aceasta este ușor de îndepărtat, dezvăluind un cordon cu geometrie influențată de regimul de sudare utilizat.

Pentru regimurile cu tensiune variabilă, s-a constatat o tendință clară de creștere a lățimii cordonului (L) odată cu creșterea tensiunii de sudare, în timp ce înălțimea (H) a prezentat o ușoară scădere. Lățimea cordonului a putut fi modelată printr-o ecuație de regresie cu un coeficient de determinare ridicat ($R^2 = 0,93$), în timp ce corelația pentru H a fost mai slabă, nefiind suficient de precisă pentru extrapolare.

În cazul regimurilor cu variația intensității curentului de sudare, s-a observat o pătrundere progresivă a materialului de adaos, de la insuficientă (la 300–400 A) la excesivă (peste 600 A), precum și o zonă termică afectată extinsă pentru curenți mari. Lățimea cordonului a urmat un trend parabolic bine conturat ($R^2 = 0,96$), iar înălțimea a variat cu o evoluție neregulată, indicând o posibilă modelare doar cu o rafinare a treptelor de variație.

Pentru regimurile cu viteze de sudare diferite, s-a remarcat reducerea ZAT odată cu creșterea vitezei, iar pătrunderea materialului de adaos a fost mai slabă la viteze reduse. Lățimea cordonului a scăzut treptat, modelul de regresie având o acuratețe ridicată ($R^2 = 0,93$), în timp ce evoluția înălțimii H a fost caracterizată de o curbă parabolică cu o fidelitate moderată ($R^2 = 0,88$).

Pentru regimurile care au urmărit efectul unghiului de înclinare al electrodului, s-a observat că un unghi de 60° a asigurat o pătrundere completă, în timp ce celelalte unghiuri au condus la pătrunderi parțiale. Totuși, nu s-au evidențiat variații semnificative ale lățimii sau înălțimii cordonului în funcție de acest parametru, iar curbele de regresie obținute nu au oferit o bază solidă pentru modelare matematică.

Analiza comparativă a rezultatelor indică faptul că majoritatea regimurilor experimentale au condus la o pătrundere incompletă, cu excepția celor cu intensitate de curent ridicată ($P2 > 500$ A). Lățimea cordonului (L) s-a dovedit a fi cel mai predictibil parametru, modelabil cu acuratețe în categoriile P1, P2 și P3. În schimb, înălțimea (H) a avut o predictibilitate limitată, mai clară doar în cazul regimurilor cu variație de viteză (P3).

Defectele de suprafață precum cavitățile sau porozitățile au fost mai frecvent întâlnite în setul de probe P4, iar aspectele legate de ZAT au urmat un comportament specific: extinsă în regimuri cu tensiuni sau curenți mari și diminuată la viteze de sudare crescute.

Studiul parametrilor dimensionali și structurali ai îmbinărilor sudate confirmă influența semnificativă a regimului tehnologic asupra calității și caracteristicilor geometrice ale cordonului, oferind premise clare pentru optimizarea procesului de sudare aplicabil structurilor din oțel P355N.

Pentru identificarea defectelor interne ale probelor sudate, a fost utilizat controlul cu raze penetrante (raze X), realizat cu ajutorul instalației disponibile în cadrul companiei Reva SA. Această metodă de investigare a permis evidențierea calității îmbinărilor sudate, prin reliefarea gradului de pătrundere a materialului de adaos, uniformitatea cordonului de sudură și prezența eventualelor defecte, precum cavitații sau porozități.

Figura 5/3.18 redă rezultatele obținute în urma controlului radiografic al probelor realizate prin variația unghiului de înclinare al electrodului, încadrate în grupa de regimuri P4, în cadrul căreia se regăsește și proba standard de sudare. Această reprezentare permite observarea modului de pătrundere a materialului de adaos în rosturile de sudare, precum și identificarea eventualelor defecte interne, cum sunt cavitațiile sau depunerile neuniforme, în funcție de regimul tehnologic aplicat.

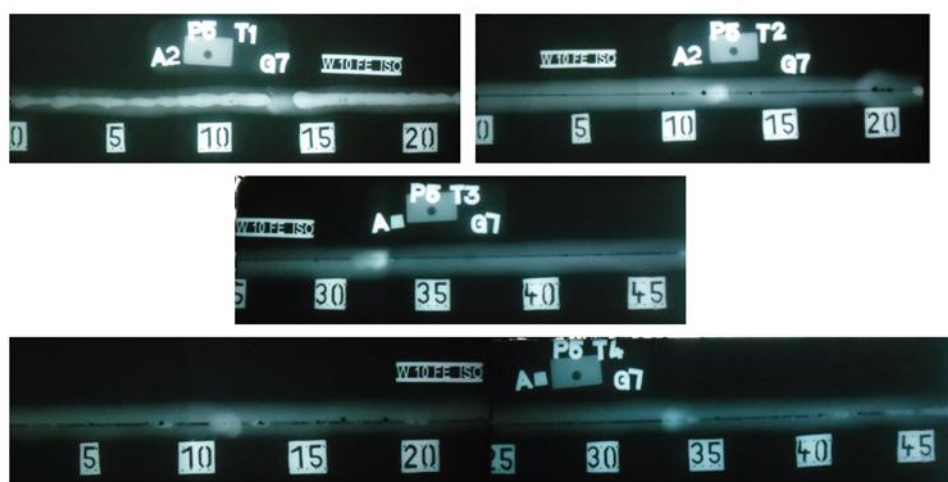


Figura 5/3.18. Controlul cu raze X pentru setul de probe din categoria P4 [12/44, 14/45]

Analiza a fost aplicată tuturor celor patru categorii de regimuri tehnologice experimentale (P1–P4), fiecare vizând un parametru diferit al procesului de sudare: tensiunea arcului electric, intensitatea curentului, viteza de sudare și unghiul de înclinare al electrodului.

În cazul regimurilor din categoria P1, în care s-a variat tensiunea de sudare, s-a constatat o tendință generală de lipsă a pătrunderii, semnalată printr-o linie închisă la culoare în centrul cordonului de sudură. Probele P1-T1 și P1-T2 au prezentat depuneri slabe și neomogene, în timp ce P1-T3, T4 și T5 au indicat o îmbunătățire a uniformității depunerii. Totuși, chiar și în aceste cazuri, pătrunderea a fost adesea discontinuă, însoțită de cavitații interne.

Pentru regimurile din categoria P2, în care a fost variată intensitatea curentului de sudare, s-a observat o corelație clară între creșterea intensității și calitatea îmbinării. Probele sudate cu intensități de până la 400 A (P2-T1, P2-T2) au arătat pătrunderi incomplete și prezența cavitațiilor. Începând cu intensitatea de 500 A (P2-T3), pătrunderea devine mai pronunțată, deși încă discontinuă. Cele mai bune rezultate au fost obținute la intensități de peste 600 A (P2-T4 și P2-T5), unde s-a constatat pătrunderea completă și o depunere uniformă și consistentă a materialului de adaos.

La categoria P3, care a urmărit efectul vitezei de sudare, s-a evidențiat o tendință descrescătoare a calității cordonului pe măsura creșterii vitezei. Probele realizate la viteze mici (25–50 cm/min) au prezentat o pătrundere mai bună, dar adesea discontinuă. În schimb, vitezele de peste 75 cm/min au generat cordoane cu depuneri asimetrice, slab conturate și o lipsă accentuată de pătrundere.

Ultima categorie, P4, a urmărit influența unghiului de înclinare al electrodului. Proba P4-T1, realizată cu un unghi de 60°, a oferit cele mai bune rezultate din această serie: pătrundere completă, depunere consistentă, deși cu mici neuniformități. Restul probelor (P4-T2, T3 și T4) au prezentat defecte variate, de la cavități și pătrundere incompletă până la depuneri slabe. Proba P4-T4, corespunzătoare regimului standard din industrie, a indicat o calitate redusă, fiind caracterizată de o pătrundere necorespunzătoare, porozități și un volum mic de material de adaos depus.

Concluziile trase din analiza radiografică evidențiază faptul că doar anumite regimuri tehnologice conduc la realizarea unor îmbinări sudate de calitate superioară. Cele mai bune rezultate au fost obținute pentru intensități ale curentului de peste 600 A și pentru unghiul de înclinare al electrodului de 60°, parametri care au condus la o pătrundere completă și o depunere uniformă. În contrast, regimul standard (P4-T4) s-a dovedit a fi ineficient, acumulând toate tipurile de defecte: lipsă de pătrundere, cavități și cantitate redusă de material de adaos. Aceste defecte afectează grav performanțele mecanice ale îmbinării, reducând rezistența la întindere, încovoiere și oboseală, precum și etanșeitatea necesară în aplicațiile critice. Astfel, analiza radiografică a validat importanța alegerii corecte a regimurilor de sudare, cu accent pe optimizarea intensității curentului și a unghiului electrodului.

CAPITOLUL 4:

INVESTIGAȚII ASUPRA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE ÎMBINĂRILOR SUDATE SUB STRAT DE FLUX A OȚELURILOR P355

Epruvetele pentru testarea la întindere și încovoiere au fost prelevate din același set de probe analizate anterior radiografic. Pentru fiecare regim de sudare au fost extrase câte 4 epruvete pentru întindere și 4 pentru încovoiere, respectând standardele BS EN 895:1995 și BS EN 910:1996.

Testarea la întindere s-a realizat utilizând o mașină de încercat A009 (TC100), având capacitate de 100 kN, iar epruvetele au fost fixate în bacurile acestora conform configurației ilustrate în figura 6/4.2, care prezintă dispozitivul de încercare utilizat.



Figura 6/4.2. Mașina de încercat la tracțiune

Pe durata testării au fost colectate date pentru trasarea curbelor tensiune-deformație și au fost determinați parametri esențiali precum forța maximă (F_{max}), rezistența la tracțiune (R_m), deformațiile și energia absorbită până la rupere.

Testarea la încovoiere a fost efectuată pe epruvete având dimensiunile specificate în standard. Montajul epruvetei în dispozitivul de testare este descris în figura 7/4.5, care ilustrează schema aplicării forței de încovoiere între cele două puncte de sprijin.

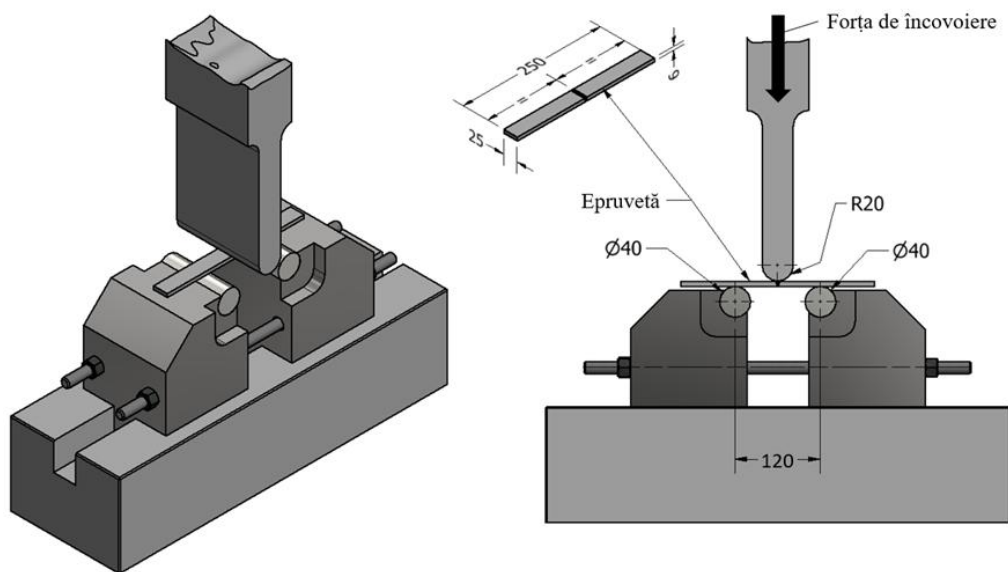


Figura 7/4.5. Schema dispozitivului de fixare a epruvetei de testare la încovoiere

Acest tip de test urmărește comportamentul materialului în regim de deformare plastică, oferind date utile privind ductilitatea îmbinării și calitatea execuției sudurii.

Probele pentru determinarea durității Vickers (HV) au fost tăiate din zona îmbinării sudate, șlefuite și atacate chimic. Măsurătorile au fost realizate cu un dispozitiv 402 MVD, echipat cu penetrator de diamant, așa cum este prezentat în figura 8/4.6.



Figura 8/4.6. Aparatul de testare a durității Vickers (HV) 402 MVD.

Rezultatele obținute au fost corelate cu poziționarea punctelor de măsurare, ilustrată în figura 9/4.7, care arată clar distribuția pe cele trei zone: cordonul de sudură, zona afectată termic și materialul de bază. Alături de specimenul prelucrat pentru efectuarea măsurătorilor de duritate HV, este ilustrată, tot în figura 9/4.7, schema de sondare a durității, unde sunt prevăzute 6 puncte de sondare, dispuse pe două axe: una verticală (Y) și una orizontală (X).

Zona indicată cu punctul 1 reprezintă partea inferioară a sudurii (rădăcina), fiind în același timp și cea mai îngustă din punct de vedere al materialului de adaos.

Punctul 2 reprezintă punctul central al sudurii, fiind zona care a beneficiat de cea mai lentă răcire, fiind alcătuită în întregime din material de adaos.

Punctul 3 se află la nivelul superior al îmbinării sudate, aceasta fiind cea mai largă zonă a secțiunii cordonului.

În zona de tranziție dintre sudură și materialul de bază se află punctul 4, amplasat la același nivel pe axa Y cu punctul central 2. Punctele 5 și 6 sunt localizate în secțiunea transversală a materialului de bază. Punctul 5 se află în zona afectată termic, iar punctul 6 prezintă proprietăți comune pentru toate situațiile analizate, acesta fiind materialul de bază pur.

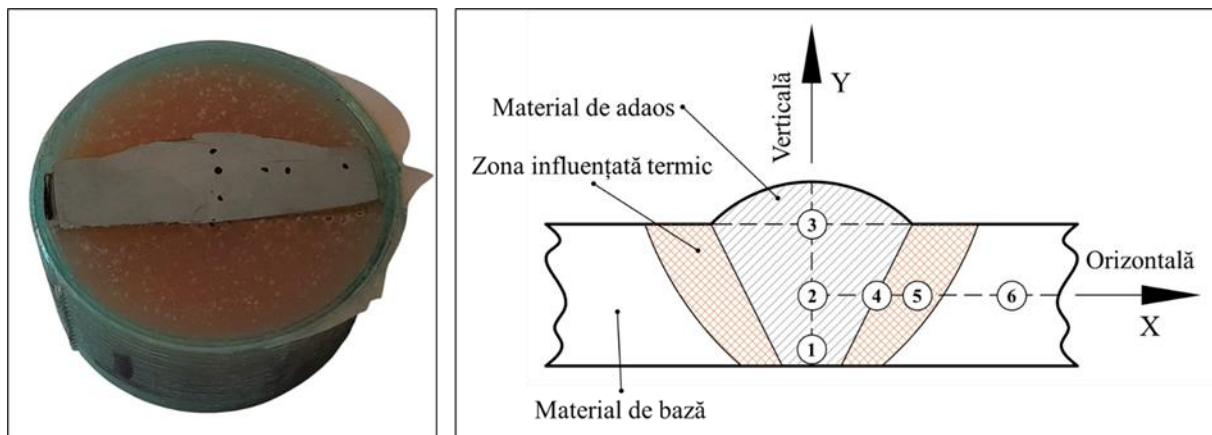


Figura 9/4.7. Proba prelevată pentru testarea durtății Vickers (HV) și poziția punctelor în care au fost realizate măsurătorile.

Evaluarea comportamentului mecanic al îmbinărilor sudate din oțel P355N s-a realizat pe baza curbelor tensiune-deformație obținute în urma încercărilor la întindere. Aceste curbe permit o înțelegere detaliată a modului în care materialul răspunde la solicitări, evidențiind atât domeniul elastic, cât și cel plastic, până la rupere. Parametrii extrași din aceste curbe includ:

- rezistența maximă la tracțiune (R_m);
- rezistența la rupere (σ_u);
- limita de curgere ($R_{p0.2}$);
- deformarea corespunzătoare punctului de curgere (ϵ_c);
- deformarea la rupere (ϵ_u);
- energia absorbită până la rupere (U).

Diferențele între curbele obținute pentru regimurile de sudare testate reflectă influența directă a parametrilor regimului de sudare asupra performanței mecanice a îmbinării sudate.

Figura 10/4.8 prezintă comparativ curbele tensiune-deformație corespunzătoare probelor testate în regimuri de sudare variate. Regimul standard este poziționat central, reprezentând un punct de referință pentru celelalte configurații.

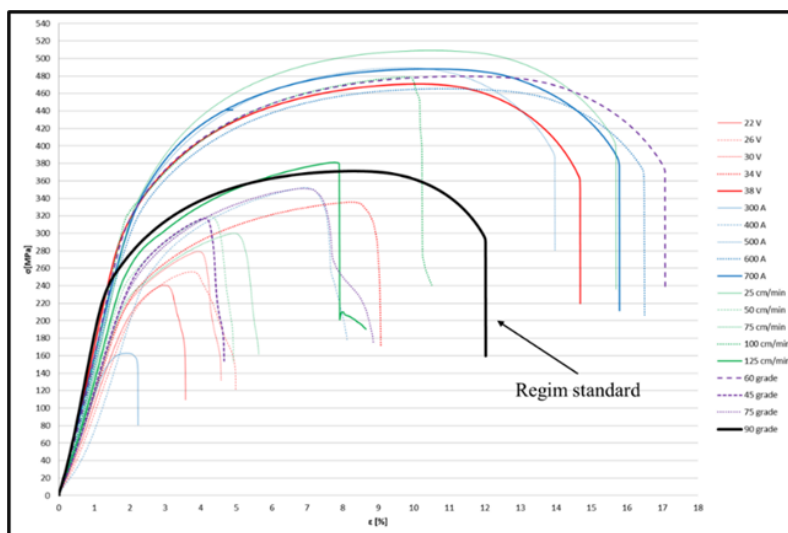


Figura 10/4.8. Situația globală a curbelor de tensiune-deformație obținute în urma testării la întindere a îmbinărilor sudate, utilizând diferite regimuri de sudare.

În tabelul 3/4.2 este prezentată situația parametrilor extrași din analiza curbelor de tensiune-deformație, pe baza cărora se evaluează performanțele mecanice la întindere ale îmbinărilor sudate.

Tabelul 3/4.2. Situația proprietăților mecanice la întindere cu valori superioare celor oferite de către regimul standard de sudare.

Proprietăți mecanice	Unitate de măsură	Regimuri de sudare superioare celui standard						Regim Standard
		38 V	500 A	600 A	700 A	25 cm/min	60 grade	
F_{max}	[kN]	85.18	84.99	79.02	85.87	88.59	86.80	83.24
R_m	[MPa]	468.41	490.93	409.92	488.88	494.04	476.18	358.83
ϵ_{max}	[%]	10.02	9.70	8.22	10.10	10.25	11.26	9.64
σ_u	[MPa]	226.11	256.26	252.77	236.25	272.47	235.19	170.96
ϵ_u	[%]	14.46	13.92	11.92	15.23	15.25	16.93	13.45
$R_{p0.2}$	[MPa]	313.47	320.77	272.69	338.87	240.91	303.53	241.73
ϵ_c	[%]	1.88	2.01	1.94	2.14	1.59	1.86	1.79
E	[MPa]	134388	229800	242240	127680	358228	206605	148117
U	[kJ]	5750	5736	4463	6354	6339	6418	4109

Regimurile de sudare care includ o tensiune de 38 V sau intensități de curent de 500 A și 700 A generează curbe cu gabarit superior, atât pe axa tensiunii cât și pe axa deformației.

Aceste curbe indică o rezistență sporită la întindere, dar și o capacitate mai mare de deformare, sugerând o combinație favorabilă de rigiditate și ductilitate.

În schimb, curbele asociate regimurilor cu tensiuni de 22 V sau 26 V prezintă deformabilitate și rezistență reduse, ceea ce reflectă o execuție necorespunzătoare a sudurii din punct de vedere mecanic.

Această analiză vizuală confirmă că regimurile optimizate pot depăși cu peste 30% performanțele mecanice ale regimului standard, în special în ceea ce privește R_m , σ_u și U .

Sunt prezentate rezultatele testării mecanice la încovoiere a epruvetelor prelevate din îmbinări sudate, pentru fiecare regim de sudare fiind efectuate câte patru încercări. Din fiecare set de probe a fost selectată o curbă reprezentativă de tensiune-deformație, iar valorile indicatorilor analizați au fost calculate ca medii aritmetice ale celor patru epruvete testate.

Pentru caracterizarea comportamentului la încovoiere au fost urmăriți trei parametri esențiali:

- Forța maximă măsurată (F_{max}) – exprimată în kN, indică valoarea maximă a forței aplicate asupra epruvetei;
- Rezistența la încovoiere (R_b) – exprimă tensiunea maximă la fibra exterioară înainte de cedare, fiind un indicator important al calității îmbinării;
- Deformația maximă (ϵ_{max}) – exprimă capacitatea epruvetei de a se deforma fără a se rupe, fiind un indiciu al ductilității materialului.

Au fost selectați doar acești indicatori, considerați relevanți pentru scopul lucrării, având în vedere că solicitările predominante în exploatarea recipientelor sub presiune sunt cele la întindere. Încercările la încovoiere au fost utilizate ca instrument suplimentar de evaluare comparativă între regimurile de sudare.

Analiza curbelor de tensiune-deformație obținute, inclusiv cele prezentate în figura 11/4.33, arată că regimul standard de sudare se plasează într-o poziție intermediară, existând atât regimuri care oferă proprietăți mecanice mai bune la încovoiere, cât și regimuri mai puțin performante în acest sens.

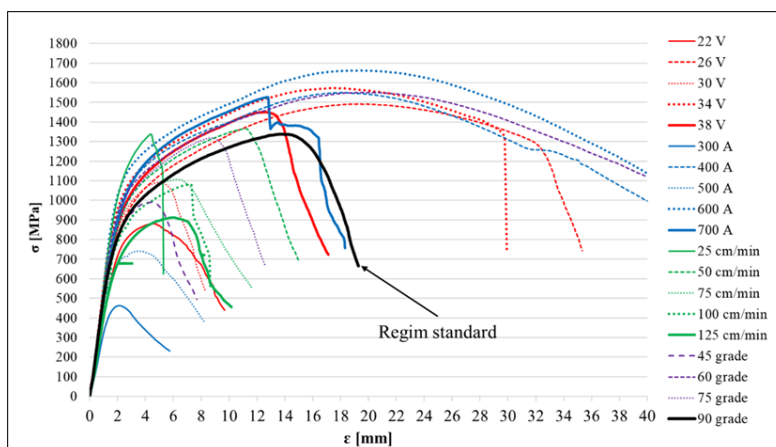


Figura 11/4.33. Situația globală a curbelor de tensiune-deformație obținute în urma testării la încovoiere a îmbinărilor sudate, utilizând diferite regimuri de sudare.

O primă comparație între figura 11/4.33 și figura 10/4.8 relevă faptul că regimul standard de sudare își păstrează o poziție similară pe graficul curbelor de tensiune-deformație și în cazul solicitărilor la întindere. Totuși, este posibil ca anumite regimuri de sudare să nu-și mențină aceeași poziționare în clasamentul regimurilor optime, atât din punct de vedere al rezistenței la întindere, cât și al rezistenței la încovoiere. Acest lucru este explicabil prin natura diferită a comportamentelor mecanice ale îmbinărilor sudate în funcție de modul de solicitare.

Pentru evaluarea comportării mecanice la încovoiere a îmbinărilor sudate, au fost analizați parametrii extrași din curbele tensiune-deformație, ale căror valori sunt centralizate în Tabelul 4/4.3.

Tabelul 4/4.3. Regimurile de sudare și proprietățile mecanice la întindere în raport cu cele ale regimului standard

Proprietăți mecanice	Unitate de masură	38 V [%]	500 A [%]	600 A [%]	700 A [%]	25 cm/min [%]	60 grade [%]
F_{max}	kN	2.33	2.10	-5.06	3.16	6.43	4.28
R_m	MPa	30.54	36.81	14.24	36.24	37.68	32.70
ϵ_{max}	%	3.91	0.56	-14.80	4.77	6.30	16.78
σ_u	MPa	32.26	49.89	47.85	38.19	59.37	37.57
ϵ_u	%	7.58	3.51	-11.32	13.26	13.41	25.90
$R_{p0.2}$	MPa	29.68	32.70	12.81	40.19	-0.34	25.57
ϵ_c	%	5.02	12.13	7.95	19.53	-11.58	3.77
E	MPa	-9.27	55.15	63.55	-13.80	141.85	39.49
U	kJ	39.92	39.57	8.61	54.62	54.25	56.19

Se observă că anumite regimuri de sudare determină îmbunătățiri semnificative ale proprietăților mecanice la întindere ale îmbinărilor sudate, comparativ cu regimul standard.

Parametrii care au condus la cele mai consistente creșteri sunt:

- Tensiunea de 38 V, care a generat creșteri de peste 30% pentru R_m și 32% pentru σ_u , cu un aport semnificativ și la ϵ_u (+7,58%) și U (+39,92%).
- Intensitățile mari ale curentului (500 A și 700 A) au dus la îmbunătățiri notabile ale rezistenței mecanice: σ_u a crescut cu până la 49,89% la 500 A, iar $R_{p0.2}$ cu 40,19% la 700 A.
- Unghiul de 60° a avut un efect pozitiv complex, oferind cea mai mare creștere a deformabilității ϵ_u (+25,90%), precum și a energiei absorbite U (+56,19%).
- Viteza de sudare de 25 cm/min a produs cele mai mari creșteri pentru R_m (+37,68%) și σ_u (+59,37%), dar cu o ușoară scădere a limitei de curgere ($R_{p0.2}$: -0,34%).

Se remarcă faptul că regimurile cu tensiune ridicată, intensități de curent între 500–700 A, unghi de 60° și viteză mică de avans (25 cm/min) oferă în general cea mai favorabilă combinație între rezistență, ductilitate și capacitate de absorbție a energiei. Aceste regimuri depășesc

semnificativ performanțele regimului standard, demonstrând eficiența optimizării parametrilor tehnologici în sudarea sub strat de flux.

Analiza rezultatelor testărilor de duritate Vickers, prezentate în Figura 12/4.54-4.59, relevă o imagine completă asupra comportamentului materialului sudat în diferite regimuri de lucru. Distribuția valorilor de duritate pe secțiunea transversală a îmbinărilor sudate evidențiază clar diferențierea între cele trei zone majore: zona de sudură propriu-zisă (materialul de adaos), zona afectată termic (ZAT) și materialul de bază.

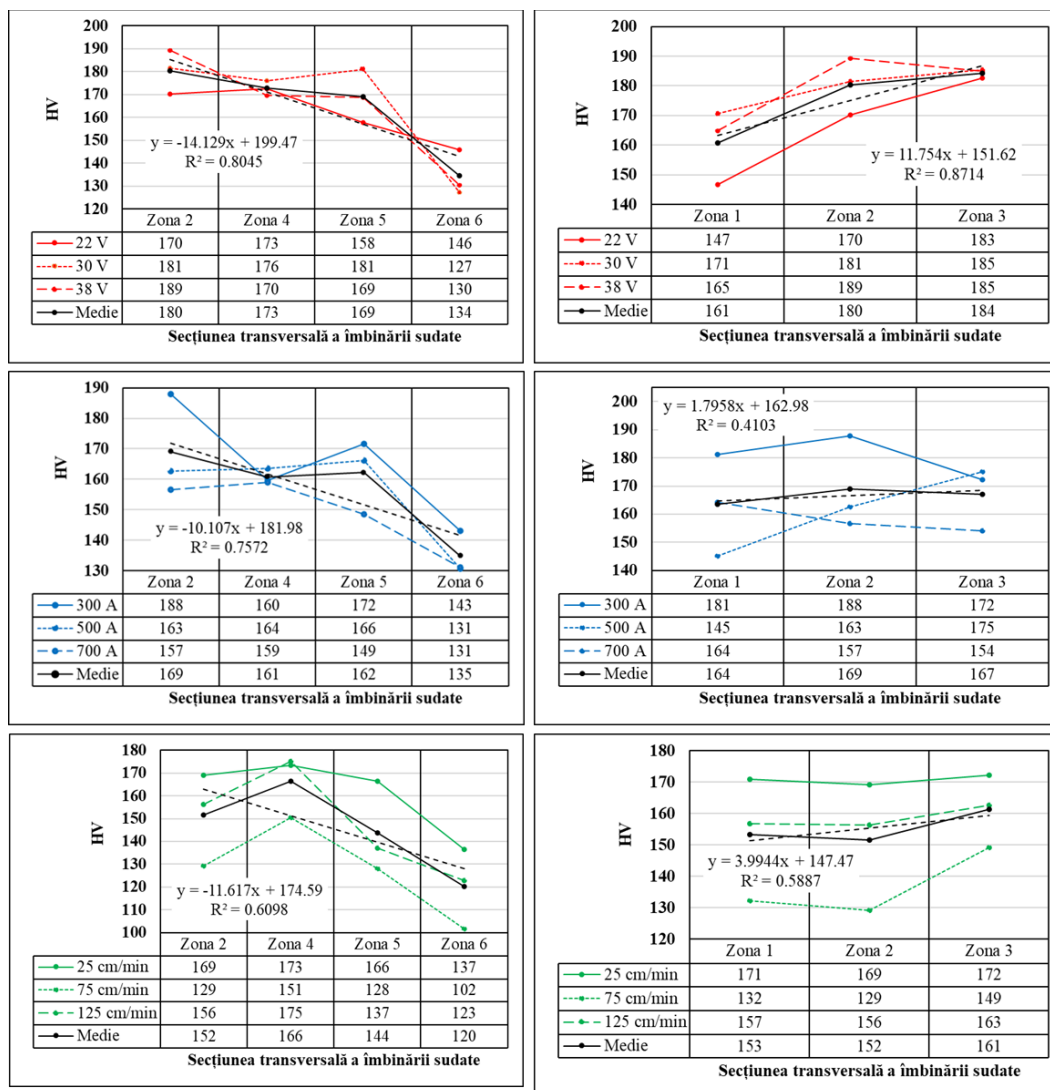


Figura 12/4.54-4.59. Distribuția valorilor de duritate Vickers (HV) pe secțiunea transversală a îmbinărilor sudate pentru diferite regimuri de sudare.

În toate cazurile analizate, s-a observat o creștere a durității în centrul sudurii, acolo unde materialul de adaos domină microstructura. Această zonă atinge, în general, valorile cele mai ridicate ale durității, ca rezultat al microstructurilor dure formate în urma solidificării rapide și a efectelor termice intense. În schimb, în zona afectată termic, duritatea scade semnificativ. Această

reducere este explicabilă prin transformările structurale locale, cauzate de temperaturile intermediare care nu ating pragurile critice pentru tratamente termice, dar sunt suficiente pentru a modifica compoziția structurală a oțelului. Astfel, ZAT devine zona cea mai vulnerabilă a îmbinării, susceptibilă la apariția de defecte, fisuri sau deformări plastice sub sarcină.

Figura 12/4.54-4.59 mai arată că regimul de sudare are un impact decisiv asupra distribuției acestor valori. De exemplu, la regimurile caracterizate prin curent de sudare de 500 A și 700 A, duritatea în zona sudurii este relativ uniformă și prezintă valori medii, ceea ce sugerează o structură echilibrată, favorabilă din punct de vedere mecanic. În schimb, regimurile cu curent de doar 300 A sau cu tensiuni de sudare scăzute duc la variații mari între zona fuzionată și ZAT, ceea ce indică un control termic deficitar și o răcire neuniformă a îmbinării.

Un alt aspect important evidențiat de figura 12/4.54-4.59 este caracterul simetric al profilului de duritate în unele regimuri, în special cele bine calibrate. Aceste simetrii față de axa de sudură indică o disipare termică uniformă în timpul procesului, ceea ce este esențial pentru menținerea unui comportament mecanic echilibrat. Pe de altă parte, profilurile obținute în urma sudării la viteze foarte mari sau foarte mici prezintă asimetrii semnificative, semn că aportul de căldură nu a fost distribuit egal, rezultând în structuri inegale pe cele două părți ale îmbinării.

Se demonstrează că profilul de duritate este un indicator extrem de sensibil și util pentru evaluarea calității unei suduri. Regimurile de sudare bine optimizate duc la o tranziție lină între zona sudată și materialul de bază, cu valori de duritate echilibrate și diferențe minime. Aceste condiții asigură o îmbinare rezistentă, capabilă să facă față solicitărilor mecanice fără a genera puncte slabe. În schimb, devierile de la parametrii optimi se traduc imediat în diferențe de duritate semnificative, care compromit integritatea și fiabilitatea îmbinării. Astfel, controlul precis al regimului de sudare devine esențial pentru asigurarea calității structurale și funcționale a îmbinărilor sudate.

CAPITOLUL 5:

MODELARE MATEMATICĂ A EFECTULUI VARIAȚIEI SIMULTANE A DOI PARAMETRI TEHNOLOGICI ASUPRA REZISTENȚEI MECANICE

Capitolul descrie analiza detaliată a datelor experimentale obținute din testele de întindere și încovoiere aplicate pe îmbinări sudate din oțel P355N. Aceste date au fost procesate în Matlab pentru a genera modele matematice și reprezentări grafice care evidențiază relațiile dintre parametri tehnologici și rezistența mecanică. Codurile utilizate au fost dezvoltate pe baza unor lucrări de specialitate, precum Modelare și simulare în MATLAB & Simulink cu aplicații în inginerie electrică de Lucian Mihet-Popa [15/53], Modelarea matematică prin MATLAB de Nicoleta Breaz și colaboratorii [16/54], și documentația oficială MathWorks [55]. Această abordare permite atât analiza detaliată, cât și extinderea aplicabilității datelor experimentale, oferind o înțelegere aprofundată a comportamentului mecanic al îmbinărilor sudate.

Datele experimentale obținute pentru variația individuală a parametrilor tehnologici au fost utilizate pentru a modela matematic influența simultană a doi parametri asupra indicilor de

rezistență mecanică ai îmbinărilor sudate din oțel P355N. Modelarea oferă o perspectivă teoretică esențială atunci când nu există date experimentale pentru variația combinată a parametrilor.

Această metodă permite:

- estimarea relațiilor dintre parametrii tehnologici și indicii mecanici;
- identificarea combinațiilor optime pentru îmbunătățirea caracteristicilor îmbinărilor;
- conturarea unei baze pentru viitoare cercetări și validări experimentale.

Modelele dezvoltate prezintă însă limitări, determinate în principal de:

- utilizarea exclusivă a datelor experimentale pentru variații individuale;
- ipoteze simplificatoare care pot omite interacțiunile complexe dintre parametri;
- lipsa validării directe din cauza absenței datelor pentru variații simultane.

Pentru eficiență, analiza s-a concentrat doar pe indicii critici: rezistența maximă la întindere și la încovoiere. Pe baza acestor date, au fost generate suprafețe de regresie cu ajutorul unor modele polinomiale de ordin 3 sau 4, în funcție de numărul de valori disponibile pentru fiecare parametru.

Rezultatele sunt prezentate sub formă grafică: norul de date experimentale (puncte negre), suprafețele de regresie, curbele de nivel și ecuațiile corespunzătoare. Evaluarea performanței modelelor s-a realizat folosind coeficientul de determinare R^2 și eroarea medie pătratică RMSE. Valori ridicate ale R^2 și scăzute ale RMSE indică o bună capacitate predictivă a modelelor matematice, care pot fi utilizate pentru optimizarea proceselor de sudare sub strat de flux aplicate oțelului P355N.

Modelele matematice analizate descriu comportamentul indicilor de rezistență mecanică în funcție de parametrii tehnologici ai procesului de sudare, evidențiind relațiile esențiale dintre aceștia și proprietățile mecanice ale îmbinărilor sudate. Prin regresii polinomiale, aceste modele oferă suport pentru înțelegerea fenomenelor mecanice și pentru optimizarea parametrilor tehnologici.

Graficele bidimensionale permit vizualizarea tendințelor de variație a rezistenței la tracțiune și încovoiere în funcție de tensiunea curentului de sudare. Ele sintetizează datele experimentale și oferă o bază pentru validarea modelelor, dar și pentru identificarea eventualelor abateri față de comportamentul teoretic.

În figura 13/5.1-5.4. analiza acestor grafice arată evoluția valorilor maxime ale rezistenței în raport cu parametrii regimului de sudare, prezentând atât punctele experimentale, cât și curbele de regresie de ordin 3 și 4. Regresia de ordin 4, fiind construită să treacă prin toate punctele, are întotdeauna coeficientul de determinare $R^2=1$, ceea ce reflectă o potrivire perfectă cu datele introduse, însă nu garantează neapărat o capacitate predictivă ridicată pentru alte seturi de date.

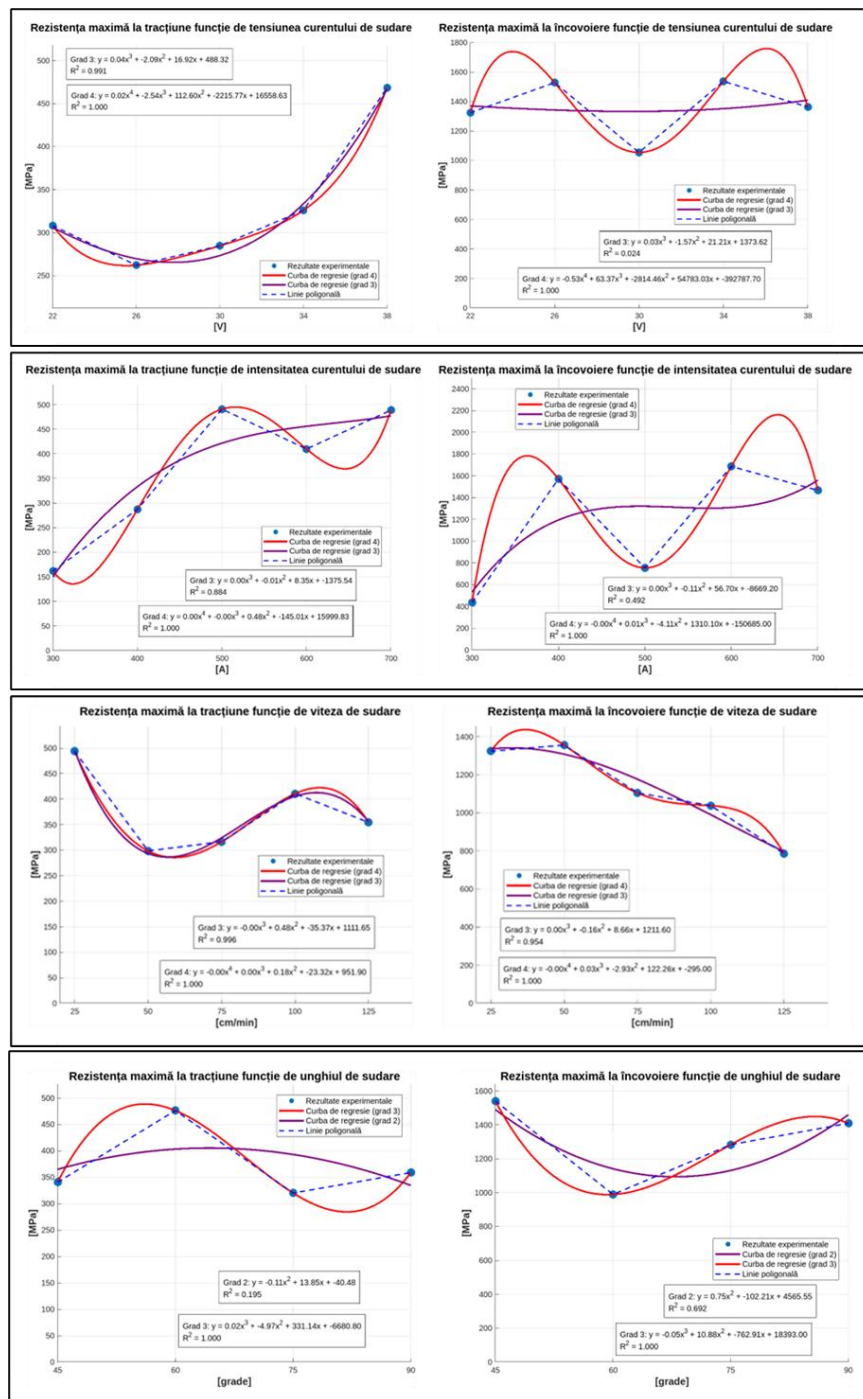


Figura 13/5.1-5.4. - Graficele rezistenței maxime la tracțiune și încovoiere în funcție de parametrii regimului de sudare

Interpretarea rezultatelor experimentale continuă prin utilizarea suprafețelor de regresie tridimensionale, care oferă o imagine detaliată a influenței simultane a doi parametri de sudare asupra indicilor de rezistență mecanică. Aceste reprezentări grafice combină datele experimentale

cu funcții matematice derivate și permit evidențierea zonelor optime și suboptimale, susținând atât analiza, cât și predicția comportamentului îmbinărilor sudate în regimuri netestate.

În primul caz analizat (figura 14/5.5), se investighează influența tensiunii (V) și a intensității curentului de sudare (A) asupra rezistenței maxime la tracțiune (R_m). Suprafața de regresie tridimensională indică o variație semnificativă a R_m , cu un maxim global de 547.56 MPa atins la $V = 38.00$ V și $A = 397.96$ A, localizat pe o creastă a suprafeței – indicând condiții tehnologice optime pentru obținerea unei suduri performante. În contrast, minimul global de 181.73 MPa, înregistrat la $V = 22.65$ V și $A = 700.00$ A, este asociat cu o regiune joasă, corespunzătoare unui regim de sudare nefavorabil.

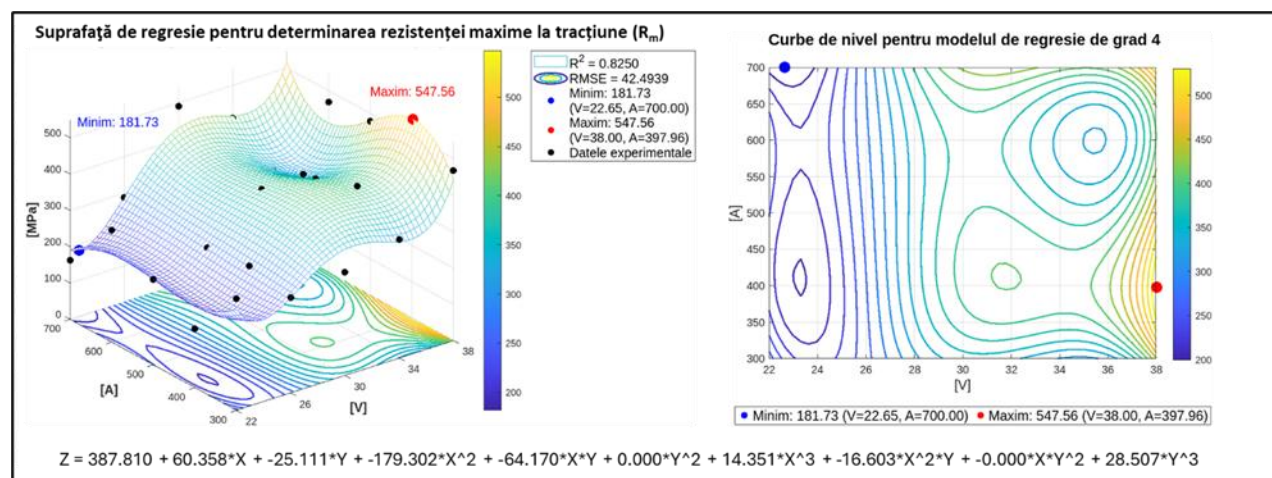


Figura 14/5.5. Suprafață de regresie și curbe de nivel pentru modelarea matematică a rezistenței maxime la tracțiune (R_m) în funcție de parametrii regimului de sudare (V, A)

Graficul asociat curbilor de nivel proiectează această suprafață într-un plan bidimensional și permite identificarea mai ușoară a intervalelor critice. Zonele în care rezistența depășește 400 MPa sunt evidențiate în paletă cromatică roșu și galben și se situează în intervalele $V = 30\text{--}38$ V și $A = 300\text{--}450$ A. Regiunile suboptimale, în care R_m scade sub 250 MPa, apar la $V < 25$ V și $A > 600$ A, fiind marcate în albastru pe hartă.

Evaluarea modelului de regresie este realizată prin coeficientul de determinare $R^2 = 0.825$, care indică o potrivire bună între datele experimentale și suprafața de regresie, și prin eroarea medie pătratică RMSE = 42.4939, care semnalează o abatere moderată. Aceste valori confirmă o capacitate predictivă rezonabilă a modelului, deși există un potențial de îmbunătățire prin perfecționarea algoritmului sau extinderea bazei de date experimentale.

Interpretarea suprafețelor de regresie tridimensionale continuă prin explorarea influenței altor combinații de parametri de sudare asupra rezistenței maxime la tracțiune (R_m), oferind o perspectivă complexă și aprofundată asupra comportamentului îmbinărilor sudate din oțel P355N.

În figura 15/5.6, analiza se concentrează asupra relației dintre R_m și doi parametri esențiali: tensiunea curentului de sudare (V) și viteza de sudare (cm/min). Suprafața de regresie tridimensională evidențiază variații notabile ale rezistenței, cu un punct de maxim global de **485.46**

MPa, obținut la $V = 22.00$ V și viteza = 125 cm/min – o combinație care indică condiții optime de sudare. În schimb, minimul global de 222.62 MPa, corespunzător $V = 26.24$ V și viteza = 100.51 cm/min, definește un regim suboptimal.

Curbele de nivel asociate permit o vizualizare bidimensională clară, identificând zonele:

- optime: $R_m > 450$ MPa, pentru $V = 21\text{--}23$ V și viteze de 120–125 cm/min (regiuni roșii/galbene);
- tangibile: R_m între 350–450 MPa, pentru $V = 22\text{--}28$ V și viteze între 100–120 cm/min;
- suboptimale: $R_m < 250$ MPa, la $V > 26$ V și viteze moderate (~100 cm/min), marcate în albastru.

Modelul este susținut de un coeficient de determinare $R^2 = 0.8821$, care reflectă o potrivire bună cu datele experimentale, și o abatere RMSE = 24.4692, ce indică o precizie acceptabilă în estimarea valorilor.

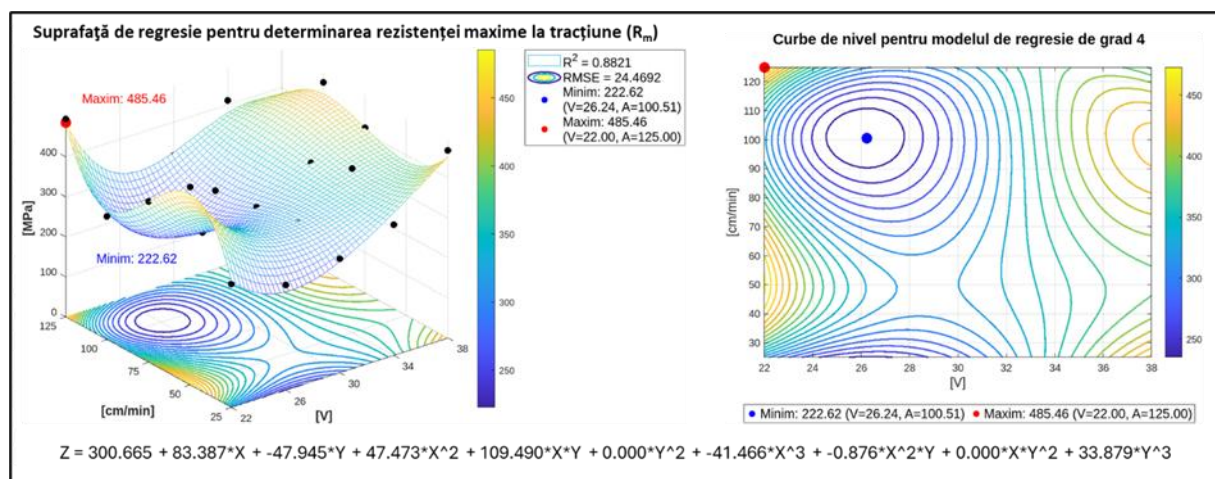


Figura 15/5.6. Suprafață de regresie și curbe de nivel pentru modelarea matematică a rezistenței maxime la tracțiune (R_m) în funcție de parametrii regimului de sudare (V , cm/min)

Figura 16/5.7 explorează influența tensiunii curentului de sudare (V) și a unghiului de sudare (grade) asupra R_m . Suprafața de regresie și curbele de nivel asociate oferă o imagine detaliată asupra interacțiunii dintre acești factori.

Modelul indică un punct de maxim global de 489.96 MPa, atins la $V = 22.00$ V și unghi = 67.04°, poziționat pe o creastă a suprafeței. Minimul global de 252.37 MPa apare la $V = 26.57$ V și unghi = 90°, într-o zonă joasă, sugerând un regim de sudare nefavorabil.

Analiza curbelor de nivel relevă:

- zone optime ($R_m > 450$ MPa): $V = 21\text{--}23$ V și unghiuri între 65–70°;
- zone tangibile (R_m între 350–450 MPa): $V = 22\text{--}27$ V și unghiuri între 60–80°;

- zone suboptimale ($R_m < 300$ MPa): $V > 26$ V și unghiuri mari ($85-90^\circ$).

Modelul prezintă o performanță ridicată, susținută de un $R^2 = 0.961$, ceea ce indică o potrivire excelentă între datele experimentale și suprafața de regresie. RMSE = 13.38 confirmă o abatere medie redusă, ceea ce reflectă robustețea și acuratețea estimărilor.

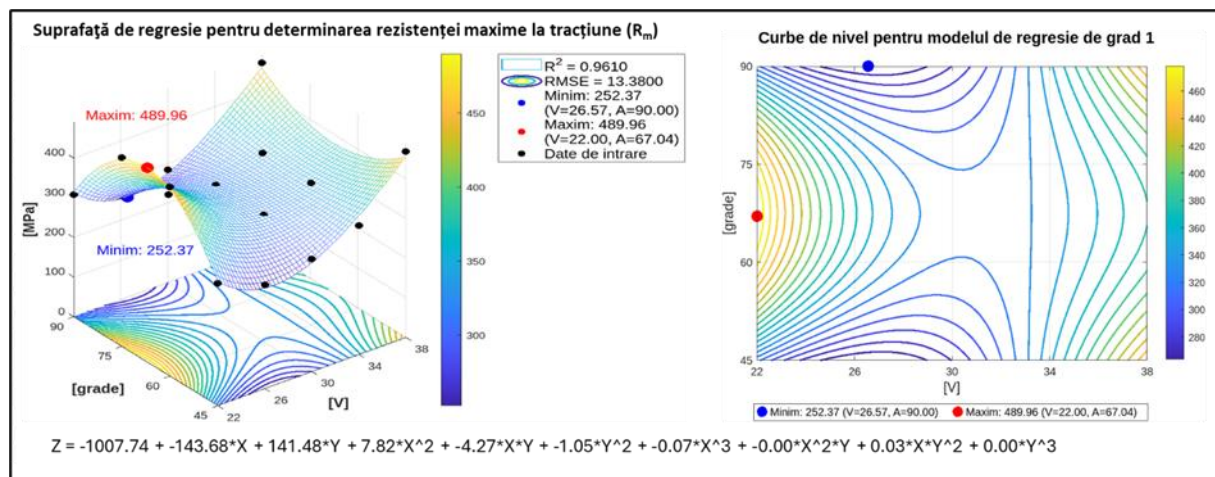


Figura 16/5.7. Suprafață de regresie și curbe de nivel pentru modelarea matematică a rezistenței maxime la tracțiune (R_m) în funcție de parametrii regimului de sudare (V, grade)

Analiza detaliată a suprafețelor de regresie, completată de interpretarea graficelor tridimensionale și bidimensionale, evidențiază cu claritate combinațiile de parametri tehnologici care influențează cel mai favorabil comportamentul mecanic al îmbinărilor sudate din oțel P355N.

1. Combinații relevante de parametri pentru rezistențe maxime

Rezistența la tracțiune (R_m) se remarcă prin valori ridicate în următoarele situații:

- Pentru tensiune și intensitate a curentului, maximul global atinge 547.56 MPa la 38 V și 398 A, cu zone favorabile între 30–38 V și 300–450 A ($R^2 = 0.825$).
- În combinația tensiune – viteză de sudare, maximul este de 485.46 MPa la 22 V și 125 cm/min, cu interval optim între 21–23 V și 120–125 cm/min ($R^2 = 0.8821$).
- Pentru unghi și viteză de sudare, maximul înregistrat este 487.79 MPa la 67° și 125 cm/min, cu zone eficiente între $65-70^\circ$ și 100–125 cm/min ($R^2 = 0.9331$).

Rezistența la încovoiere (R_b), mult mai sensibilă la regimul de sudare, atinge valori ridicate în următoarele configurații:

- Tensiune – intensitate a curentului: maxim de 2044.38 MPa la 36.37 V și 398 A, cu intervale favorabile între 35–38 V și 380–400 A ($R^2 = 0.9116$).
- Tensiune – viteză de sudare: maxim de 1610.37 MPa la 36.04 V și 25 cm/min, cu zone ideale între 35–38 V și 20–30 cm/min ($R^2 = 0.9070$).

- Intensitate – unghi de sudare: maxim de 519.05 MPa la 700 A și 90°, cu performanțe bune între 650–700 A și 85–90° ($R^2 = 0.6724$).

2. Tendințe generale ale comportamentului mecanic:

Rezistența la tracțiune prezintă o creștere constantă odată cu majorarea tensiunii și vitezei de sudare, dar reacționează diferit în funcție de intensitate și unghi, necesitând reglaje fine pentru optimizare.

Rezistența la încovoiere are o evoluție mai complexă, adesea nelineară sau oscilatorie, sugerând o sensibilitate ridicată la distribuția termică și la microstructura generată în urma procesului de sudare.

CAPITOLUL 6:

INVESTIGAȚII ASUPRA MICROSTRUCTURII ÎMBINĂRILOR SUDATE SUB STRAT DE FLUX A OȚELURILOR P355

Microstructura îmbinărilor sudate sub strat de flux din oțel P355N este analizată în detaliu, cu accent pe influența parametrilor de sudare asupra structurii interne a materialului. Investigațiile realizate sunt susținute de studii publicate anterior, care confirmă relevanța și validitatea rezultatelor experimentale.

Influența intensității curentului de sudare este detaliată în [17/50], unde s-a demonstrat că variația curentului afectează direct dimensiunile și omogenitatea cordonului de sudură. Prin reglarea intensității, se pot obține îmbinări cu proprietăți mecanice optimizate.

Totodată, se discută influența tensiunii de sudare, conform datelor din [18/51], unde se arată că această variabilă afectează microstructura rezultată și, implicit, comportamentul mecanic al îmbinărilor. Adaptarea tensiunii în funcție de necesitățile aplicative permite obținerea unor structuri echilibrate din punct de vedere termic și mecanic.

Analiza microstructurală realizată aici extinde concluziile anterioare, oferind o perspectivă detaliată asupra zonelor afectate de procesul de sudare și a transformărilor structurale specifice. Lucrarea contribuie astfel la înțelegerea profundă a efectului regimului tehnologic asupra calității sudurilor și oferă un cadru util pentru optimizarea procesului în aplicații industriale.

Analiza microstructurii îmbinărilor sudate sub strat de flux reprezintă o etapă esențială în evaluarea calității îmbinărilor și în înțelegerea comportamentului acestora în condiții de solicitare mecanică, în special în aplicații industriale critice precum recipientele sub presiune. Scopul acestei investigații este de a corela structura internă a materialului cu proprietățile mecanice determinate anterior, precum rezistența la tracțiune, comportamentul la încovoiere și duritatea HV, toate dependente direct de microstructura generată prin sudare.

Utilizarea microscopiei electronice de baleiaj (SEM) a permis observarea în detaliu a structurii interne a probelor, oferind informații privind defectele, fazele formate și morfologia specifică fiecărei zone analizate. Această abordare detaliată a oferit o perspectivă clară asupra modului în care parametrii de sudare influențează dezvoltarea microstructurii și, implicit, performanța mecanică a îmbinărilor.

Probele metalografice au fost pregătite conform unui protocol riguros, începând cu tăierea atentă pentru a evita alterarea microstructurii, urmată de încapsulare în rășină, lustruire progresivă până la granulații foarte fine și atacare chimică cu reactiv Nital pentru evidențierea detaliilor structurale. Examinarea SEM s-a realizat conform standardului ASTM E3-11, utilizând echipamente specializate, iar selecția probelor a acoperit trei niveluri de variație pentru fiecare parametru tehnologic studiat: tensiune (22V, 30V, 38V), curent (300A, 500A, 700A) și viteză de sudare (25, 75, 125 cm/min).

Probele au fost analizate în mai multe zone specifice ale îmbinării (conform schemei din figura 6.3): de la rădăcină, centru și partea superioară a cordonului de sudură, până la zona de tranziție, zona afectată termic și materialul de bază propriu-zis. Fiecare zonă a fost investigată la mărimi succesive, de la x500 până la x20000, pentru a evidenția detalii relevante la diferite scări.

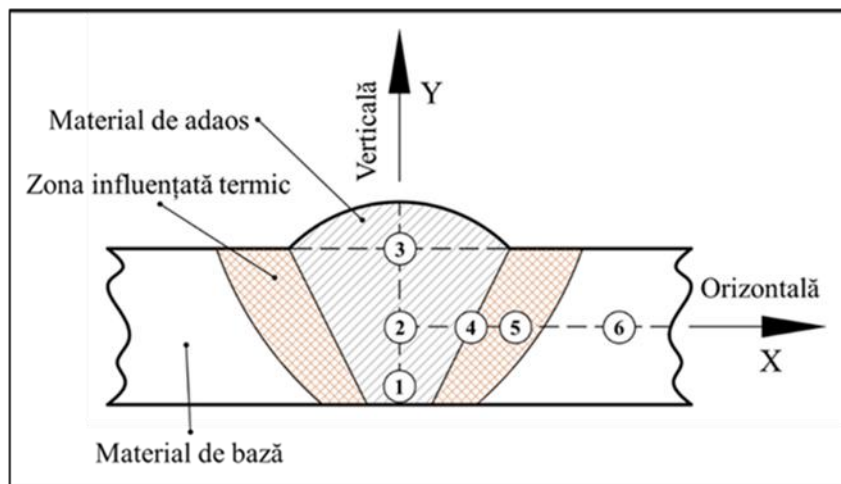


Figura 17/6.3. Schema zonelor investigate ale îmbinării sudate

Analiza s-a concentrat pe cinci direcții principale:

1. Defectele structurale – identificarea porilor, fisurilor și incluziunilor care pot compromite integritatea mecanică;
2. Fazele structurale – determinarea compoziției structurale rezultate în urma regimurilor termice aplicate;
3. Morfologia microstructurală – analiza formei și dimensiunii granulației în zonele critice (HAZ, metal de adaos, zona fuzionată);

4. Evoluția și tranziția microstructurii – urmărirea modificărilor structurale generate de combinațiile de parametri;
5. Corelarea cu datele mecanice – compararea observațiilor microscopice cu măsurătorile de duritate, tracțiune și încovoiere, pentru o înțelegere completă a influenței fiecărui parametru de sudare.

Prin această analiză detaliată, investigația microstructurală SEM oferă un cadru solid pentru înțelegerea impactului regimurilor de sudare asupra performanței îmbinărilor sudate și sprijină direct optimizarea tehnologică. Rezultatele detaliate și imaginile asociate fiecărei zone investigate sunt prezentate în Anexa 4, constituind un suport complet pentru interpretarea fenomenelor observate.

Materialul de bază analizat, P355N, este un oțel de granulație fină destinat utilizărilor industriale critice, în special pentru fabricarea recipientelor sub presiune. Clasificat conform standardelor europene EN 10027-1:2005 și EN 10216-3:2003, acest oțel este caracterizat printr-o bună sudabilitate, rezistență mecanică ridicată și o microstructură uniformă, esențială pentru integritatea structurală în condiții de solicitare intensă.

Compoziția chimică a P355N și a materialului de adaos OK Autrod 12.24 este prezentată în Tabelul 5/6.1, evidențiind un echilibru între elementele de aliere. P355N conține până la 0,2% carbon, asigurând rezistență fără a compromite sudabilitatea, în timp ce materialul de adaos are un conținut mai redus de carbon, reducând riscul de fisuri. Diferențele de compoziție în mangan și molibden între cele două materiale asigură compatibilitate și performanță ridicată, inclusiv rezistență la coroziune și stabilitate termică.

Tabel 5/6.1. Compoziția chimică a materialului de bază (P355N) și a materialului de adaos (OK Autrod 12.24)

Alloying element	Material de bază		Material de adaos	
	P355 N		OK Autrod 12.24	
	Minim	Maxim	Minim	Maxim
	(%)	(%)	(%)	(%)
Carbon [C]	-	0.2	0.08	0.12
Siliciu [Si]	-	0.5	0.05	0.2
Mangan [Mn]	0.9	1.7	0.95	1.2
Fosfor [P]	-	0.025	-	0.02
Sulf [S]	-	0.02	-	0.02
Aluminiu [Al]	-	0.02	-	-
Crom [Cr]	-	0.3	-	-
Cupru [Cu]	-	0.3	-	-
Molibden [Mo]	-	0.08	0.45	0.6
Niobiu [Nb]	-	0.05	-	-
Nichel [Ni]	-	0.5	-	-
Titan [Ti]	-	0.04	-	-
Vanadiu [V]	-	0.1	-	-

Analiza microstructurii prin microscopie electronică de baleiaj (SEM), la diferite mărimi, a oferit o imagine detaliată a caracteristicilor interne ale materialului P355N. Această analiză este ilustrată prin figurile 18/6.4 – 22/6.8, fiecare reprezentând niveluri de mărire diferite și evidențiind aspecte structurale specifice.

Figura 18/6.4 (mărire x500) oferă o imagine de ansamblu a texturii materialului, relevând orientarea alungită a grăunților, specifică laminării. Lipsa defectelor macroscopice confirmă calitatea excelentă a prelucrării.

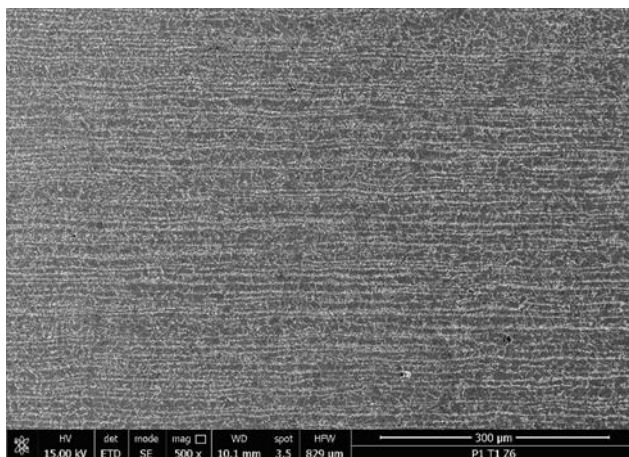


Figura 18/6.4. Imagine SEM a materialului P355N la mărire x500, evidențiind textura globală și orientarea grăunților.

Figura 19/6.5 (x1000) detaliază mai clar grăunții și limitele intergranulare. Structura feritică-perlitică este bine distribuită, ceea ce indică eficiența tratamentelor termice. În plus, incluziunile sunt rare și uniform dispersate, reducând riscul de inițiere a fisurilor.

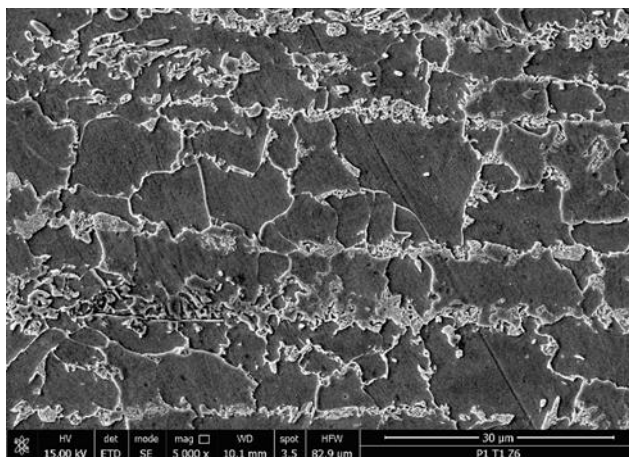


Figura 19/6.5. Imagine SEM a materialului P355N la mărire x1000, evidențiind textura globală și orientarea grăunților.

Figura 20/6.6 (x5000) aduce în evidență fazele structurale constituente – perlită și ferită – într-o integrare echilibrată. Limitele grăunților ușor ondulate sunt rezultatul deformării plastice, iar absența segregățiilor confirmă o structură stabilă.

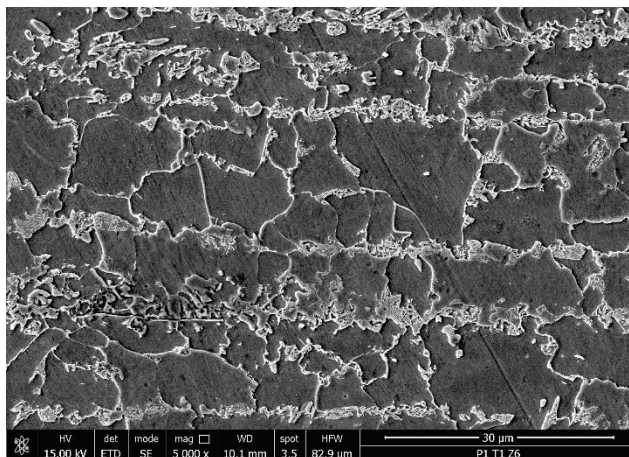


Figura 20/6.6. Microstructura detaliată a materialului P355N analizată la mărirea x5000

Figura 21/6.7 (x10000) arată o distribuție clară a fazelor, cu perlită dispersată uniform în matricea feritică. Lipsa defectelor intergranulare subliniază prelucrarea de înaltă calitate și contribuie la durabilitatea în condiții de solicitare ciclică.

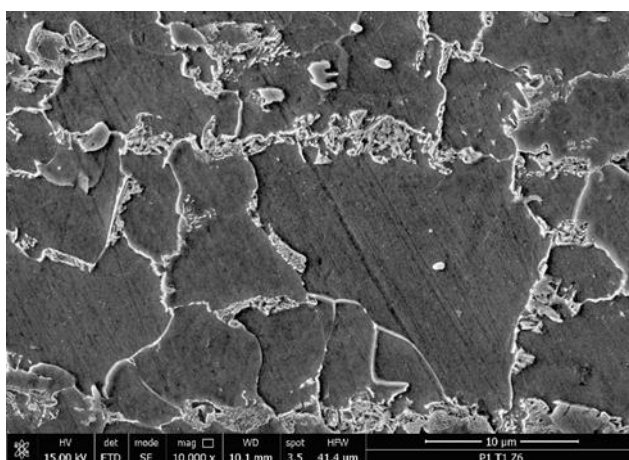


Figura 21/6.7. Microstructura detaliată a materialului P355N analizată la mărirea x10000

Figura 22/6.8 (x20000) dezvăluie detalii extrem de fine ale microstructurii. Structura granulară este uniformă, iar incluziunile sunt rare și slab concentrate. Aceste caracteristici sunt esențiale pentru aplicații în care siguranța este prioritară.

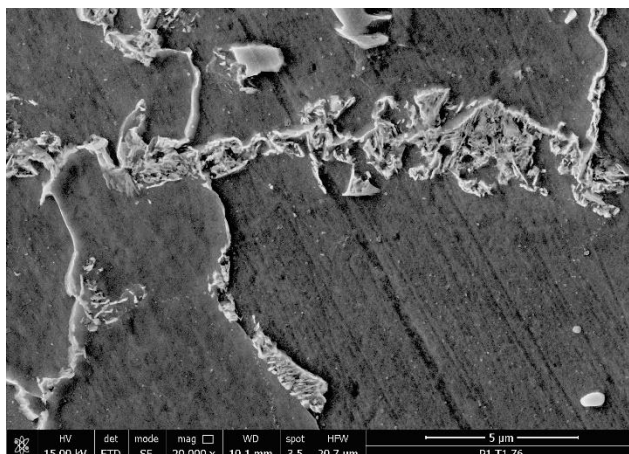


Figura 22/6.8. Structura granulară detaliată a materialului P355N observată la mărirea x20000

Rezultatele obținute confirmă că P355N are o microstructură omogenă și bine organizată, influențată de procesul de laminare și tratamentele aplicate. Această structură, împreună cu compoziția chimică echilibrată, explică performanțele mecanice excelente ale materialului și îl recomandă pentru aplicații industriale solicitante.

Din datele experimentale obținute în urma analizei microstructurale prin microscopie electronică de baleiaj (SEM), s-a evidențiat influența puternică a parametrilor de sudare asupra calității structurale a îmbinărilor sudate. Variabile precum tensiunea, intensitatea curentului și viteza de sudare determină diferențe semnificative în morfologia granulară, distribuția fazelor, apariția defectelor și comportamentul zonei afectate termic.

Rezultatele obținute arată că regimurile moderate de sudare — în special combinația de 30 V, 500 A și 75 cm/min — conduc la o microstructură echilibrată, cu granule bine conturate, faze feritice și perlitice uniform distribuite, precum și o porozitate redusă. Această structură este asociată cu o bună coeziune intergranulară, solidificare controlată și absența segregărilor majore, contribuind la o rezistență mecanică superioară și stabilitate în exploatare.

În schimb, regimurile extreme — caracterizate de tensiuni înalte (38 V), curenți mari (700 A) și viteze ridicate de sudare (125 cm/min) — generează o granularitate accentuată, faze martensitice predominante și defecte structurale frecvente, cum ar fi fisurile intergranulare și incluziunile oxidice. Aceste caracteristici reduc coeziunea structurală, fragilizează sudura și afectează negativ performanța mecanică a îmbinării.

S-a observat că zonele inferioare ale sudurii, precum rădăcina, prezintă o structură mai omogenă și mai puțin afectată de variațiile parametrilor, datorită unui proces de răcire mai lent. Pe măsură ce se înaintează către centrul și partea superioară a cordonului, structura devine mai dezordonată, cu o prezență tot mai vizibilă a defectelor, în special în zona afectată termic. Zona de tranziție dintre sudură și materialul de bază este deosebit de sensibilă la schimbările de regim și poate reprezenta un punct critic în comportamentul global al îmbinării.

Prin comparație, regimurile cu tensiuni scăzute (22 V) au produs structuri perlitice fine, favorabile ductilității, dar cu o duritate mai redusă, în timp ce tensiunile mari au dus la formarea martensitei și la creșterea riscului de fisuri. De asemenea, vitezele mari de sudare au limitat timpul de răcire, favorizând segregările și compromițând uniformitatea microstructurală.

Astfel, din analiza structurii obținute în diverse condiții de sudare, se conturează clar că regimurile moderate permit formarea unor îmbinări echilibrate din punct de vedere microstructural, în timp ce abaterile extreme cresc riscul de defecte și reduc calitatea generală a sudurii.

CAPITOLUL 7:

CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE

DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

7.1. Concluzii finale

- 1) **Fabricarea recipientelor sub presiune de înaltă calitate** implică o abordare complexă și integrată, în care sunt esențiale:
 - Proiectarea precisă bazată pe analiza stărilor de efort.
 - Selecția materialelor adecvate, precum oțelurile carbon și aliajele lor, care oferă un echilibru optim între rezistență mecanică și comportament la coroziune.
 - Aplicarea unor tratamente și acoperiri anticorozive eficiente.
 - Alinierea permanentă la standardele internaționale moderne, ceea ce permite obținerea de produse fiabile, durabile și competitive pe piața globală.
- 2) **Tehnologia sudării sub strat de flux** s-a dovedit a fi o soluție industrială performantă, oferind:
 - Îmbinări sudate cu caracteristici mecanice superioare: pătrundere completă, omogenitate structurală și rezistență crescută.
 - Eficiență ridicată prin automatizare și utilizarea de materiale consumabile specializate.
 - Totuși, aplicabilitatea acestei tehnologii este limitată de necesitatea sudării în poziție orizontală, de costurile ridicate și de specificul său destinat aplicațiilor de mare amploare.
- 3) **Controlul parametrilor de sudare** este decisiv pentru calitatea îmbinărilor realizate:
 - Reglarea adecvată a tensiunii (minim 30 V), intensității curentului (500–700 A), vitezei de avans și unghiului electrodului determină formarea de cordoane sudate uniforme și robuste.

- Defectele identificate, precum lipsa de pătrundere, cavitățile și porozitățile, au fost corelate cu regimuri de sudare suboptime, în special la viteze mici și curenți insuficienți.
 - Unghiurile de înclinare necorespunzătoare ale electrodului au generat neuniformități ale cordonului, în timp ce valorile excesive ale intensității au condus la formarea unor zone influențate termic extinse.
- 4) **Inspecțiile realizate (dimensională și radiografică)** au evidențiat necesitatea unui echilibru precis între parametrii de sudare pentru:
- Prevenirea defectelor structurale.
 - Asigurarea pătrunderii complete.
 - Optimizarea costurilor și maximizarea durabilității în condiții industriale critice.
- 5) **Testările mecanice au evidențiat că:**
- Regimul standard utilizat în industrie oferă rezultate medii.
 - Regimuri superioare au fost identificate pentru solicitări specifice:
 - ✓ La tracțiune: 38 V, 500–700 A, viteză 25 cm/min.
 - ✓ La încovoiere: unghi 60°, curent 400–600 A, tensiune 26–34 V.
- 6) **Distribuția durității HV în secțiunea transversală** a îmbinărilor sudate a relevat:
- Diferențe de până la 87 HV între zona miezului sudurii (189 HV) și materialul de bază (102 HV).
 - Zonele afectate termic și rădăcina sudurii ca puncte de maximă sensibilitate mecanică.
 - Granița materialului de adaos cu cel de bază s-a remarcat prin variații minime de duritate.
- 7) **Modul de cedare a îmbinărilor** depinde direct de pătrunderea sudurii:
- Cu pătrundere completă, fractura se produce în materialul de bază.
 - În absența pătrunderii la rădăcină, cedarea are loc prin zona de sudură, indicând un regim tehnologic inadecvat.
- 8) **Analiza matematică a corelat parametrii de sudare cu performanțele mecanice:**
- Tensiuni de 35–38 V, curenți de 380–400 A și viteze de 90–125 cm/min au demonstrat capacitatea de a optimiza rezistența îmbinărilor.
 - Regimurile cu tensiuni mici sau curenți excesivi au dus la scăderea semnificativă a performanței.

9) **Investigațiile prin microscopie electronică de baleiaj (SEM)** au arătat:

- Regimurile extreme determină apariția defectelor grave precum fisuri intergranulare, incluziuni oxidice și segregări structurale.
- Regimurile moderate (ex. 30 V) au favorizat o microstructură echilibrată, cu granularitate optimă și distribuție omogenă a fazelor feritice și perlitice.

10) **Materialul de bază P355N** s-a dovedit adecvat pentru aplicații critice, datorită:

- Microstructurii uniforme.
- Comportamentului mecanic echilibrat și stabilității la solicitări intense.

11) **Parametrii optimi diferă în funcție de tipul solicitării:**

- Pentru rezistența la tracțiune: 38 V, 500–700 A, 25 cm/min.
- Pentru încovoiere: unghi 60°, curenți 400–600 A, tensiuni 26–34 V.

12) **Corelarea datelor experimentale cu modelarea matematică** a confirmat:

- Parametrii moderați (34–38 V, 500–600 A, 25–50 cm/min, unghi 60°) oferă rezultate superioare.
- Regimurile optimizate reduc semnificativ defectele și cresc fiabilitatea sudurilor.

13) **Unghiul de 60° al electrodului** a fost validat ca element esențial pentru realizarea îmbinărilor de calitate:

- Asigură pătrundere completă.
- Favorizează distribuția uniformă a materialului de adaos.
- Contribuie la obținerea unei microstructuri stabile și a unor caracteristici mecanice superioare.

7.2. Contribuții personale

În cadrul cercetărilor realizate pentru această teză de doctorat, contribuțiile personale se concretizează prin următoarele activități:

1) **Colaborare cu mediul industrial**

- Investigarea procesului tehnologic de fabricare a vagoanelor cisternă.
- Identificarea aspectelor critice pentru optimizarea calității procesului de sudare.

- Analiza posibilităților tehnologice oferite de echipamentele de sudare sub strat de flux, în vederea definirii unui cadru experimental relevant pentru condițiile industriale.

2) Planificarea și coordonarea activităților experimentale

- Coordonarea realizării schemei de obținere a probelor sudate, utilizând instalațiile existente în fluxul tehnologic curent al companiei.
- Gestionarea procesului de colectare și analiză a datelor experimentale, în colaborare cu specialiști din industrie și membrii comisiei de îndrumare.

3) Analiza și interpretarea rezultatelor

- Interpretarea rezultatelor experimentale privind influența parametrilor de sudare asupra proprietăților mecanice și microstructurale.
- Contribuții directe la formularea concluziilor prin corelarea datelor obținute cu cerințele industriale și teoretice.

4) Diseminarea rezultatelor cercetării

- Prezentarea rezultatelor în cadrul unor conferințe științifice de specialitate.
- Publicarea articolelor în jurnale de prestigiu din domeniul ingineriei, materialelor și disciplinelor conexe.
- Integrarea feedback-ului din partea comunității academice pentru validarea și consolidarea concluziilor.

5) Contribuții științifice directe în cadrul tezei

- Redactarea și fundamentarea capitolelor privind:
 - a) Tehnologia sudării sub strat de flux.
 - b) Modelarea matematică a proceselor de sudare.
 - c) Analiza proprietăților mecanice și microstructurale ale îmbinărilor sudate.
- Conceperea și integrarea elementelor grafice de tip schematic pentru susținerea descrierilor tehnologice și experimentale.

7.3. Direcții viitoare de cercetare

1) Optimizarea microstructurii și proprietăților mecanice prin tratamente termice

Investigarea efectului tratamentelor termice aplicate îmbinărilor sudate, urmată de reluarea experimentărilor utilizând aceiași parametri tehnologici. Această abordare va permite evaluarea

îmbunătățirilor microstructurii și proprietăților mecanice, oferind date relevante pentru optimizarea proceselor de sudare.

2) Extinderea domeniului de aplicabilitate prin studii pe eșantioane variate

Realizarea experimentărilor pe materiale de bază cu grosimi diferite, cu scopul de a optimiza regimurile tehnologice pentru o gamă extinsă de semifabricate. Această direcție va contribui la creșterea versatilității procesului de sudare.

3) Analiza geometriilor variate ale rosturilor de sudare

Investigarea diferitelor tipuri de geometrie a rosturilor de sudare, cu scopul de a identifica configurația optimă pentru regimurile tehnologice utilizate. Rezultatele vor permite adaptarea procesului la cerințele specifice ale aplicațiilor industriale.

4) Studiul comportamentului pe termen lung al îmbinărilor sudate

Analiza rezistenței îmbinărilor sudate la oboseală și comportamentul acestora sub cicluri repetate de sarcină. Această cercetare va oferi informații valoroase despre durabilitatea și performanța structurală a îmbinărilor în condiții reale de exploatare.

5) Validarea modelării matematice prin variația simultană a doi parametri ai regimului de sudare

Reluarea experimentărilor utilizând variația simultană a doi parametri ai regimului de sudare, conform metodologiei prezentate în capitolul dedicat modelării matematice. Această abordare are scopul de a determina combinații de parametri care generează proprietăți mecanice superioare ale îmbinărilor sudate. În același timp, rezultatele experimentale vor permite validarea practică a modelului matematic propus, contribuind la integrarea cunoștințelor teoretice și experimentale.

BIBLIOGRAFIE

- [1/1] <https://www.iqsdirectory.com/articles/pressure-vessel.html>, accesat la 14.01.2022.
- [2/5] Ghanbari, G., Liaghat, M. A., & Sadeghian, A., Pressure Vessel Design, Guides & Procedures, Navid Shiraz Publication, ISBN 6001921377, 2011.
- [3/7] <https://www.turbosquid.com/3d-models/>, accesat la 14.01.2022.
- [4/8] Palade, V., & Ștefănescu, I., Recipiente și aparate tubulare, Editura Semne, ISBN 973-654-069-3, București, 2000.
- [5/29] Ordinul nr. 463/2004 privind prescripțiile tehnice PT C 1-2003, Monitorul Oficial al României, nr. 730/12.08.2004.
- [6/30] Ordinul nr. 470/2004 privind materialele pentru recipiente sub presiune, Monitorul Oficial

al României, nr. 731/13.08.2004.

[7/31] Directiva 2014/68/EU (PED), Jurnalul Oficial al Uniunii Europene.

[8/33] Bodea, M., Sudare și Procedee Conexe, Editura UTPRESS, ISBN 978-606-737-143-7, Cluj-Napoca, 2016.

[9/35] ESAB, Catalog Echipamente Auxiliare – Welding Automation Submerged Arc, TIG, MIG/MAG.

[10/34] Tűsz, F., Tratat de Sudură, Editura Sudura, ISBN 973-8359-19-8, Timișoara, 2003.

[11/43] <https://www.kjellberg.de/submerged-arc-welding-2.html>, accesat la 05.03.2023.

[12/44] Cioroagă, B.-D., & Cioată, V. G., X-ray analysis of welding parameters influence on pressure vessel steel P355N, Journal of Physics: Conference Series, vol. 2540, ICAS 2022, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina, DOI: 10.1088/1742-6596/2540/1/012040. (în curs de indexare Scopus)

[13/46] Cioroagă, B.-D., Linul, E., & Cioată, V. G., Effect of welding speed on tensile strength of pressure vessel steel submerged welded joints, Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering, vol. 21, no. 1, pp. 93–96, 2023. (indexat ProQuest, Google Scholar, EBSCO)

[14/45] Cioroagă, B.-D., Socalici, A. V., Cioată, V., Dascăl, A., & Ardelean, M., Analysis of electric flux arc welding parameters influence using visual X-ray inspection, Materials Today: Proceedings, vol. 78, part 2, pp. 214–220, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.10.107. (indexat Scopus)

[15/53] Mihet-Popa, L., Modelare și simulare în MATLAB & Simulink cu aplicații în inginerie electrică, Editura Politehnica, Timișoara, 2014.

[16/54] Mihet-Popa, L., Modelare și simulare în MATLAB & Simulink cu aplicații în inginerie electrică, Editura Politehnica, Timișoara, 2014.

[17/50] Cioroagă, B.-D., Socalici, A. V., Cioată, V. G., Linul, E., Hulka, I., & Anghel, I.-M., Influence of submerged arc welding current intensity on the mechanical properties and microstructure of pressure vessel P355N steel, Materials, vol. 17, p. 3520, 2024. DOI: 10.3390/ma17143520

[17/51] Cioroagă, B.-D., Cioată, V. G., Socalici, A. V., Linul, E., Hulka, I., & Anghel, I.-M., Optimization of submerged arc welding through voltage variation to achieve superior mechanical properties using P355N base material, Journal of Engineering Sciences (Ukraine), vol. 11, no. 2, pp. C42–C56, 2024. DOI: 10.21272/jes.2024.11(2).c4