



MINISTERUL EDUCAȚIEI
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București

Școala Doctorală de
Inginerie Industrială și Robotică



Adrian F. FLOREA

TEZĂ DE DOCTORAT

CERCETĂRI PRIVIND SUDAREA OȚELURILOR DE ÎNALTĂ
REZISTENȚĂ

Conducător științific,
Prof. univ.dr.ing. Corneliu RONTESCU
(POLITEHNICA București)

- 2025 -

Cuprins

<i>Cuvânt înainte</i>	5
Introducere	7
Legendă	9
<i>Partea I.</i>	15
Capitolul 1. Stadiul actual al utilizării oțelurilor de înaltă rezistență în domeniul construcțiilor sudate	15
1.1 Introducere	16
1.2 Clasificarea oțelurilor de înaltă rezistență	17
1.3 Particularitățile oțelurilor de înaltă rezistență	23
1.4 Concluzii privind utilizarea oțelurilor de înaltă rezistență în domeniul construcțiilor sudate	26
Capitolul 2.	27
Stadiul actual privind sudarea oțelurilor de înaltă rezistență	27
2.1 Comportarea la sudare a oțelurilor de înaltă rezistență	28
2.2 Elementele tehnologice la sudarea oțelurilor de înaltă rezistență	32
2.3 Procedee de sudare prin topire utilizate la realizarea îmbinărilor oțelurilor de înaltă rezistență	36
2.4 Concluzii privind sudarea oțelurilor de înaltă rezistență	40
Capitolul 3.	41
Obiectivele și structura tezei de doctorat. Echipamentele de cercetare.	41
3.1. Obiectivele tezei de doctorat	42
3.2. Structura tezei de doctorat	43
3.3. Echipamentele de cercetare utilizate în cadrul programului experimental	46
<i>Partea II.</i>	51
Capitolul 4.	51
Cercetări experimentale privind sudarea oțelurilor de înaltă rezistență	51
4.1. Date de intrare	52
4.2. Materialul de bază	54
4.3. Alegerea procedurii de sudare	56
4.4. Alegerea materialului de adaos	56
4.5. Stabilirea valorilor parametrilor tehnologici ai regimului de sudare	57
4.6. Descrierea standului experimental utilizat pentru realizarea probelor sudate	60
4.7. Procedura experimentală [136]	61
4.8. Concluzii	64
Capitolul 5.	67
Cercetări experimentale privind analiza probelor sudate	67
5.1. Estimarea valorilor parametrului $t_{8/5}$ și analiza câmpului termic la sudare	68
5.2. Estimarea valorilor parametrului $t_{8/5}$ cu ajutorul termocuplelor de contact	68
5.3. Estimarea valorilor parametrului $t_{8/5}$ și analiza câmpului termic la sudare cu ajutorul termografierii în infraroșu [149]	73
5.4. Examinarea nedistructivă a îmbinărilor sudate	78
5.5. Examinarea distructivă a îmbinărilor sudate	81
5.6. Încercarea la tracțiune	89

5.7.	Încercarea la încovoiere prin șoc.....	92
5.8.	Analizele macrografice și micrografice ale îmbinărilor sudate	94
5.9.	Realizarea proceselor verbale de calificare a procedurilor de sudare	109
5.10.	Concluzii privind sudarea oțelurilor de înaltă rezistență.....	109
Capitolul 6.....		111
Cercetări teoretice și experimentale privind modelarea CFD-MEF în cazul sudării oțelurilor de înaltă rezistență		111
6.1.	Simularea CFD a timpului de răcire $t_{8/5}$	114
6.2.	Influența modificării materialului de bază asupra caracteristicilor ansamblului șasiu	117
6.3.	Simularea cu ajutorul MEF a șasiului instalației de sudare	120
6.4.	Concluzii:	133
Capitolul 7.....		135
Concluzii finale, contribuții originale și direcții ulterioare de cercetare.....		135
7.1	Concluzii rezultate în urma realizării cercetărilor teoretice.....	136
7.2.	Concluzii rezultate în urma realizării cercetărilor teoretice	136
7.3.	Contribuții personale.....	138
7.4.	Direcții ulterioare de cercetare	139
Bibliografie.....		144

Cuvinte cheie:

Sudare, O eluri de înaltă rezistență (HSS), S890QL, Sudabilitate, Celulă robotizată, Sudare în mediu de gaz protector (GMAW), Timp răcire între 800°C și 500°C ($t_{8/5}$), Temperatură preîncălzire, Microduritate, Analiza microscopică, Proprietăți mecanice, Câmp termic, Validare experimentală, Computational Fluid Dynamics (CFD), Modelarea cu elemente finite (MEF).

Capitolul 1. Stadiul actual al utilizării oțelurilor de înaltă rezistență în domeniul construcțiilor sudate

1.1 Introducere

Oțelurile de înaltă rezistență au fost utilizate în diverse sectoare industriale încă din anii 1950, însă caracteristicile acestora au evoluat semnificativ de-a lungul timpului. În anii 1960, valoarea rezistenței maxime la curgere a oțelurilor de înaltă rezistență sudabile era de aproximativ 400...500 MPa, în timp ce în prezent, oțelurile de înaltă rezistență (HSS) moderne pot atinge valori ale rezistenței la curgere de peste 1300 MPa. În ultimii ani, cererea pentru oțelurile de înaltă rezistență moderne a crescut datorită avantajelor lor importante din punct de vedere al masei [1], acestea având atât o rezistență ridicată, cât și o masă redusă, ceea ce permite reducerea grosimii structurilor și îmbunătățirea eficienței energetice în aplicațiile respective. Oțelurile de înaltă rezistență sunt utilizate într-o gamă variată de domenii industriale și diverse aplicații, inclusiv în industria auto, construcții navale, centrale hidro și nucleare, aplicații forestiere și agricole, platforme de extracție a petrolului, conducte, camioane, macarale pentru transportul lemnului și alte echipamente de ridicare. Exemple de utilizare a oțelurilor de înaltă rezistență în cadrul industriei auto sunt prezentate în figura 1.1.

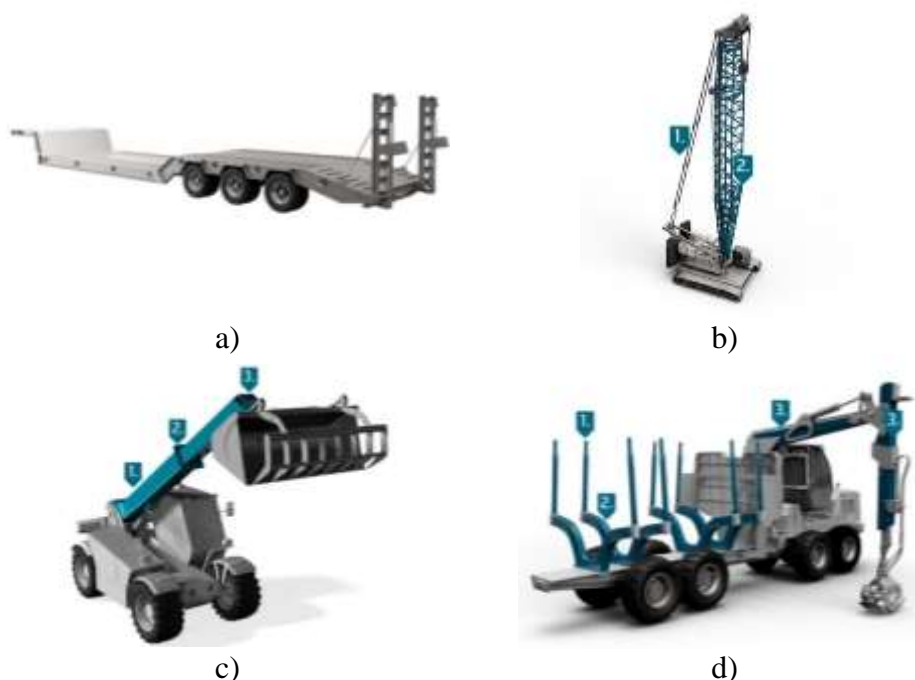


Fig.1.1 Exemple de utilizare a oțelurilor de înaltă rezistență în industria auto: a – platforme auto, b – sisteme de ridicat, c – sisteme de încărcat/transport, d - echipamente de transport forestier, 1,2,3 – elemente realizate din oțeluri de înaltă rezistență.[2]

Metoda predominantă de îmbinare a structurilor din oțel este îmbinarea prin sudare, iar sudarea oțelurilor de înaltă rezistență reprezintă subiectul unor cercetări extinse în ultimii ani. Pentru a asigura îmbinări sudate de înaltă calitate, este esențială înțelegerea factorilor care influențează sudabilitatea respectivelor oțeluri, inclusiv metoda de fabricație și compoziția chimică. Relația dintre parametrii de sudare, cum ar fi energia liniară (definită prin intensitatea curentului de sudare, tensiunea arcului electric și viteza de sudare), timpul de răcire și temperatura de preîncălzire, reprezintă o problemă clasică în vederea identificării valorilor optime, deoarece acești parametri influențează procesul de sudare, iar modificarea unui parametru poate avea efecte semnificative asupra calității îmbinării sudate, dar și a proprietăților materialelor utilizate.

Sudarea oțelurilor de înaltă rezistență necesită un control strict al parametrilor de sudare, care depind de metoda de fabricație a oțelului și de compoziția chimică a acestuia. Deși cercetările privind

sudarea oțelurilor sunt în curs de desfășurare, nu există încă suficiente date care să ofere informații cu privire la alegerea parametrilor optimi de sudare pentru diverse tipuri de oțeluri de înaltă rezistență și pentru diferite procese de sudare. Astfel, apare întrebarea privind modul în care parametrii de sudare pentru diferite tipuri de oțeluri și procese pot fi standardizați pentru a prezice proprietățile îmbinărilor sudate realizate. În ciuda existenței unor recomandări tehnice oferite de diferiți producători de oțeluri de înaltă rezistență, cum ar fi ESAB (Washington DC, SUA), SSAB (Stockholm, Suedia), Dillinger (Stuttgart, Germania), ThyssenKrupp (Essen, Germania) etc [2, 14, 15, 16] pentru sudarea acestor oțeluri, nu există o metodologie științifică unitară aplicabilă tuturor proceselor de sudare. Acest lucru evidențiază necesitatea de a înțelege mai bine caracteristicile sudării oțelurilor de înaltă rezistență și de a dezvolta practici care să conducă la obținerea unor îmbinări sudate de calitate superioară.

1.2 Clasificarea oțelurilor de înaltă rezistență

Dezvoltarea continuă a proceselor de fabricație a permis obținerea unor oțeluri nu numai cu o rezistență mai mare, ci și cu o tenacitate ridicată, o sudabilitate mai bună, o mai bună prelucrabilitate la rece și o rezistență crescută la coroziune, transformând astfel oțelurile de înaltă rezistență într-un material atractiv pentru aplicațiile structurale, mai ales atunci când sunt luate în considerare costurile de fabricație, economiile de energie, costurile materialelor și reducerea emisiilor de CO₂ pe parcursul întregului ciclu de viață în proiectele critice din punct de vedere al masei construcției sudate [17].

Evoluția dezvoltării oțelurilor de înaltă rezistență este prezentată în figura 1.2.

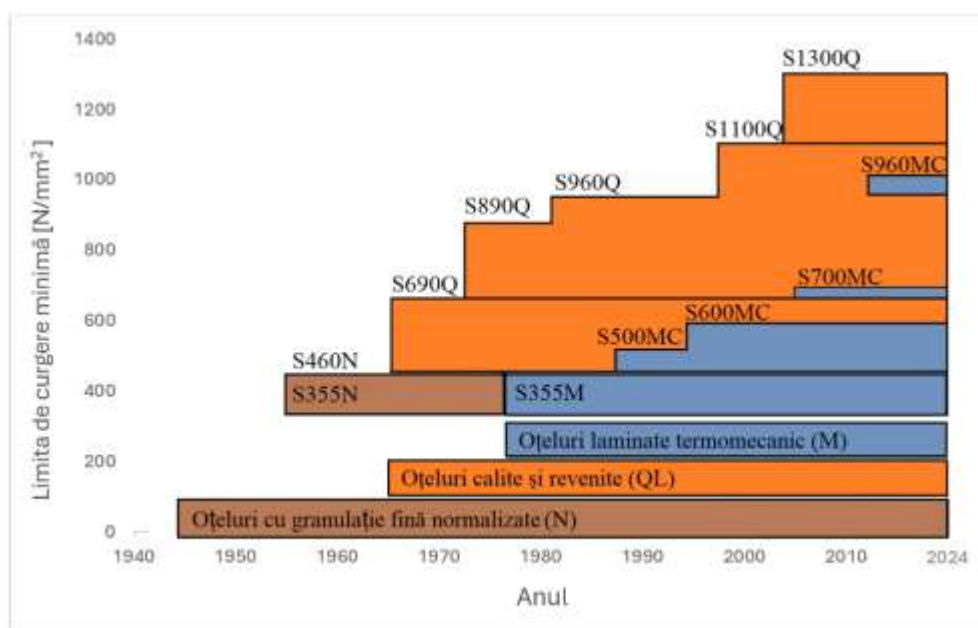


Fig.1.2 Evoluția dezvoltării oțelurilor de înaltă rezistență: ■ - oțeluri normalizate; ■ oțeluri laminate termomecanic; ■ - oțeluri călite. [10]

Principalele tratamente termice aplicate pentru dezvoltarea oțelurilor de înaltă rezistență sunt: normalizarea (N), procesul de laminare controlată termomecanic (M) și călirea și revenirea (Q) [13].

Unele oțeluri cu granulație fină normalizate prezintă o rezistență moderată de până la 460 N/mm^2 , iar anumite oțeluri laminate termomecanic pot avea o limită de curgere de până la 690 N/mm^2 , în timp ce oțelurile călite și revenite pot atinge valori ale rezistenței la rupere foarte ridicate, de până la 1300 N/mm^2 [22].

1.3 Particularitățile oțelurilor de înaltă rezistență

Caracteristicile principale ale oțelurilor de înaltă rezistență, sunt: rezistența mecanică și nivelul ridicat al tenacității. Este important de subliniat că, în funcție de condițiile specifice de utilizare, trebuie

evaluate cu atenție efectele tensiunilor mecanice ale temperaturii și ale timpului asupra acestor proprietăți. Totodată, o importanță deosebită o are cunoașterea comportării oțelurilor la sudare.

1.4 Concluzii privind utilizarea oțelurilor de înaltă rezistență în domeniul construcțiilor sudate

- Dezvoltarea continuă a proceselor industriale de fabricație, având cerințe tot mai mari cu privire la solicitările din timpul fabricării, a dus la necesitatea elaborării unor materiale care să asigure proprietăți mecanice ridicate, concomitent cu asigurarea valorii energiei de rupere la temperaturi scăzute.
- Dezvoltarea oțelurilor de înaltă rezistență (HSS) a început la jumătatea secolului XX, odată cu apariția oțelurilor normalizate cu o valoare a rezistenței la rupere de 400...500 MPa (S355N/NL, S460NL/ML), ajungând în prezent la valori de 1400 MPa, pentru oțelurile cu rezistență ultra-înaltă (S1300Q – v. § figura.1.2) sau 1700...2000 MPa pentru oțelurile avansate de înaltă rezistență (MS 1250/1500) [37]
- Oțelurile de înaltă rezistență sunt utilizate pentru proprietățile mecanice ridicate, proprietățile anticorozive, dar și pentru valorile energiei de rupere la temperaturi scăzute, asigurând astfel reducerea semnificativă a masei structurii, dar și utilizarea acestora în diferite condiții de mediu.
- Oțelurile de înaltă rezistență sunt utilizate în diferite domenii industriale. La jumătatea secolului XX, oțelurile normalizate au început să fie utilizate pentru fabricarea prin sudare sau reparare prin sudare a rezervoarelor și a containerelor de depozitare și transport. Odată cu dezvoltarea acestei categorii de oțeluri, ele și-au găsit aplicabilitatea în diferite domenii industriale: auto (structura de rezistență), transport feroviar (rezervoare pentru transport, infrastructură), platforme de foraj offshore, construcții navale, energetic (turbine eoliene, turnuri de transmisie și alte structuri legate de energie), construcții și infrastructură (clădiri, poduri), fabricarea de echipamente grele (echipamente de ridicat, excavatoare, buldozere și alte echipamente de excavare).

Capitolul 2. Stadiul actual privind sudarea oțelurilor de înaltă rezistență

2.1 Comportarea la sudare a oțelurilor de înaltă rezistență

Oțelurilor de înaltă rezistență, supuse unor tratamente termice de îmbunătățire a caracteristicilor mecanice, prezintă o bună sudabilitate, fiind sudabile prin majoritatea procedeele disponibile. Cu toate acestea, în timpul sudării pot apărea anumite probleme tehnologice, dintre care se remarcă următoarele:

- *Fisurarea la rece*, generată de transformările structurale (apariția structurilor dure de tip bainită sau martensită) în combinație cu prezența hidrogenului difuzibil în material, dar și a tensiunilor apărute în timpul proceselor de sudare.

- *Degradarea proprietăților de tenacitate*, manifestată prin reducerea energiei de rupere la solicitări dinamice și creșterea temperaturii de tranziție ductil-fragil, factori puternic influențați de microstructura oțelului, în special de tipul și distribuția precipitațiilor formate în timpul procesului de răcire.

Comportarea la sudare este strâns legată de valoarea limitei de curgere a materialului. În procesul de sudare, trebuie acordată o atenție deosebită susceptibilității oțelului la fisurarea la rece, fenomen influențat de tensiunile interne apărute în timpul proceselor de sudare, de prezența hidrogenului difuzibil (provenit din materialul de bază, materialul de adaos, mediul înconjurător etc.), dar și de structura dură și fragilă. Indiferent de tipul de oțel utilizat, un control riguros al aportului de căldură în timpul sudării este

esențial. În mod special, trebuie gestionată corespunzător temperatura de preîncălzire pentru a minimiza riscurile de fisurare și a asigura integritatea îmbinării sudate [25].

2.1.1 Comportarea la sudare a oțelurilor normalizate

Oțelurile normalizate cu granulație fină au o sudabilitate bună dacă se respectă recomandările din standardele EN 1011-2:2002/A1:2004 și SEW 088:2017 [38.40]. Oțelurile cu granulație fină sunt oțeluri calmate, care se caracterizează prin prezența în rețeaua cristalină a unor precipitate de nitruri și carburi formate la temperaturi ridicate. Aceste precipitate fine împiedică creșterea granulației în domeniul austenitic și determină formarea unei granulații fine.

Pentru aceste oțeluri, în anumite condiții, este necesară preîncălzirea la o temperatură specifică pentru a preveni fisurarea la rece [41]. Un parametru important în acest proces este durata de răcire a sudurii, indicată de valoarea mărimii $t_{8/5}$, care reprezintă intervalul de timp necesar pentru răcirea sudurii între 800°C și 500°C. Oțelurile cu granulație fină normalizate prezintă o comportare la sudare corespunzătoare, fiind sudabile practic prin orice procedeu, dar pot apărea unele probleme, precum fisurarea la rece sau deteriorarea caracteristicilor tenacității din cauza scăderii energiei de rupere prin șoc și creșterea temperaturii de tranziție. Aceste fenomene sunt influențate în principal de structura metalografică și de distribuția precipitatelor.

2.1.2 Comportarea la sudare a oțelurilor laminate termomecanic

Oțelurile tratate termomecanic sunt recunoscute pentru sudabilitatea lor datorită conținutului redus de carbon (carbon echivalent). Aceste oțeluri oferă performanțe superioare la sudare în comparație cu oțelurile normalizate, având o reducere semnificativă a elementelor care contribuie la durificare.

Această reducere a echivalentului de carbon face ca oțelurile laminate termomecanic (TM) și cu răcire accelerată (AC) să prezinte un risc mai mic de fisurare la rece comparativ cu oțelurile convenționale, iar temperaturile de preîncălzire necesare pentru sudare sunt mai mici. Condițiile de sudare pentru aceste oțeluri sunt similare cu cele pentru oțelurile normalizate.

Sudarea oțelurilor tratate termomecanic poate fi realizată cu majoritatea metodelor de sudare. Alegerea materialului de adaos este importantă pentru asigurarea calității îmbinărilor sudate. De obicei, rezistența materialului de adaos este similară cu cea a materialului de bază, deși în anumite cazuri se preferă materiale de adaos cu rezistență mai scăzută. În aceste cazuri, materialul de adaos ar trebui să aibă o compoziție chimică cu o concentrație mai mare de elemente cu efect de durificare și, ca efect, cu o sensibilitate la fisurarea la rece mai accentuată decât materialul de bază. [25, 48, 49, 50].

2.1.3 Comportarea la sudare a oțelurilor călite și revenite

Comportamentul oțelurilor călite și revenite la sudare este mai slab comparativ cu alte tipuri de oțeluri. În funcție de compoziția lor, acestea pot fi sudabile în condiții specifice sau chiar nesudabile. Comportarea la sudare este influențată de limita de curgere a materialului, iar atenția trebuie îndreptată asupra sensibilității acestuia la fisurarea la rece. În orice situație, este necesar un control al căldurii introduse în materialul de bază în timpul sudării, precum și respectarea temperaturii de preîncălzire.

Elementul principal care trebuie considerat la sudarea oțelurilor cu granulație fină este evoluția câmpului termic, care influențează ZIT prin:

- Tendința de durificare, datorită formării martensitei, și prin creșterea riscului de fisurare.
- Recombinarea hidrogenului difuzibil este mai pronunțată în oțelurile cu granulație fină datorită dimensiunii limitelor grăunților, ceea ce creează mai multe zone potențiale pentru recombinarea hidrogenului.

Preîncălzirea este esențială pentru evitarea fisurării la rece și a altor defecte [53]. Aceasta permite eliminarea hidrogenului și reduce tensiunile interne. În cazul sudării în mai multe treceri, preîncălzirea poate fi omisă la prima trecere, dacă se menține o temperatură adecvată între treceri.

2.2 Elementele tehnologice la sudarea oțelurilor de înaltă rezistență

Sudabilitatea este determinată de comportarea metalurgică, tehnologică și în construcție sudată a materialului de bază supus îmbinării prin sudare. Carbonul echivalent, energia liniară, temperatura de preîncălzire și timpul de răcire influențează în mod semnificativ rezultatele procesului de sudare.

Tensiunile reziduale apar din distribuția neuniformă a căldurii în timpul sudării și din comportamentul materialelor în procesul de încălzire și răcire. Rezistența la oboseală a îmbinării sudate este mai mare atunci când tensiunile reziduale sunt reduse.

2.2.1 Carbonul echivalent

Comportarea metalurgică la sudare a oțelurilor slab aliate, având o utilizare deosebit de largă, este determinată în primul rând de compoziția lor chimică. Ea este apreciată în mod uzual pe baza mărimii carbonului echivalent (CET). În ultimii 50 de ani au fost elaborate foarte multe formule de calcul ale carbonului echivalent [62], prin prelucrarea rezultatelor unor încercări (duritate, reziliență, de fisurare la rece, metalografice etc.) pentru suduri realizate într-o trecere sau multistrat, în diverse condiții tehnologice de realizare [63].

2.2.4 Timpul de răcire $t_{8/5}$

Un indicator global de analiză a ciclului termic la sudare este reprezentat de către $t_{8/5}$. Se observă că timpul de răcire este o mărime inversă față de viteza de răcire în sensul că un $t_{8/5}$ mare înseamnă o viteză de răcire mică și invers [69].

Timpul de răcire de la 800°C la 500°C este cel mai important parametru care influențează proprietățile îmbinării sudate în HSS, în special microstructura ZIT[70..73]. Aceasta este afectată de cantitatea de căldură introdusă, temperatura de preîncălzire și intermediară, grosimea oțelului și forma sudurii. [74..76].

Timpul de răcire între 800°C și 500°C , $t_{8/5}$, se determină analitic și cu ajutorul unor diagrame/nomograme, în funcție de modul de conducție, bidimensională sau tridimensională care are loc în timpul procesului de sudare [40, 54].

2.3 Procedee de sudare prin topire utilizate la realizarea îmbinărilor oțelurilor de înaltă rezistență

În prezent, sunt disponibile numeroase procedee de sudare [81, 82], care pot fi clasificate în funcție de sursa de energie utilizată pentru realizarea îmbinărilor. În cele mai multe cazuri, energia utilizată este de natură electrică, fiind transformată în căldură prin intermediul arcului electric sau prin efectul Joule-Lenz. Totodată, pentru generarea energiei termice necesare, se poate utiliza flacăra oxi-gaz, reacții termochimice, fascicule de electroni și fotoni, ultrasunete, precum și frecarea mecanică [54].

Sudarea prin topire presupune topirea și îmbinarea materialelor, adesea cu material de adaos în zona de sudare pentru a facilita conexiunea. Dintre tehnicile de sudare, sudarea cu arc electric este una dintre cele mai utilizate, caz în care energia generată de arc topește atât suprafața pieselor de îmbinat, cât și materialul de adaos (cum ar fi electrozii înveliți, sârme sau baghete).

2.4 Concluzii privind sudarea oțelurilor de înaltă rezistență

- Sudabilitatea oțelurilor de înaltă rezistență este condiționată de conținutul de carbon, dar și de conținutul elementelor de aliere, carbonul echivalent fiind un criteriu general de analiză a sudabilității acestor tipuri de materiale.
- Principalele probleme cu privire la sudabilitatea oțelurilor de înaltă rezistență sunt legate de pericolul apariției fisurării la rece (pe fondul apariției structurilor dure și fragile, a prezenței tensiunilor interne, dar și a hidrogenului difuzibil) și al pierderilor proprietăților de tenacitate, manifestată prin reducerea energiei de rupere la solicitări dinamice și creșterea temperaturii de tranziție ductil-fragil (cauzate de creșterea granulației).

- Pentru sudarea în bune condiții a oțelurilor de înaltă rezistență se recomandă realizarea preîncălzirii (pentru evitarea apariției fisurării la rece) și sudarea cu rânduri filiforme (pentru evitarea creșterii granulației).
- Pentru realizarea îmbinărilor prin sudare a oțelurilor de înaltă rezistență pot fi utilizate majoritatea procedeelor clasice de sudare prin topire, o atenție deosebită fiind acordată procedeelor la care disiparea căldurii se realizează rapid (EBW și LASER), existând riscul apariției structurilor dure și fragile și a creșterii exagerate a proprietăților mecanice în ZIT și cusătura sudată.

Capitolul 3. Obiectivele și structura tezei de doctorat. Echipamentele de cercetare.

3.1 Obiectivele tezei de doctorat

Alegerea temei de doctorat a plecat de la necesitatea practică a micșorării dimensiunilor și a masei produselor utilizate în diferite ramuri industriale. Cazul particular analizat în cadrul lucrării este acela de micșorare a masei șasiului unei instalații de sudare a șinelor de cale ferată (figura 3.1.)

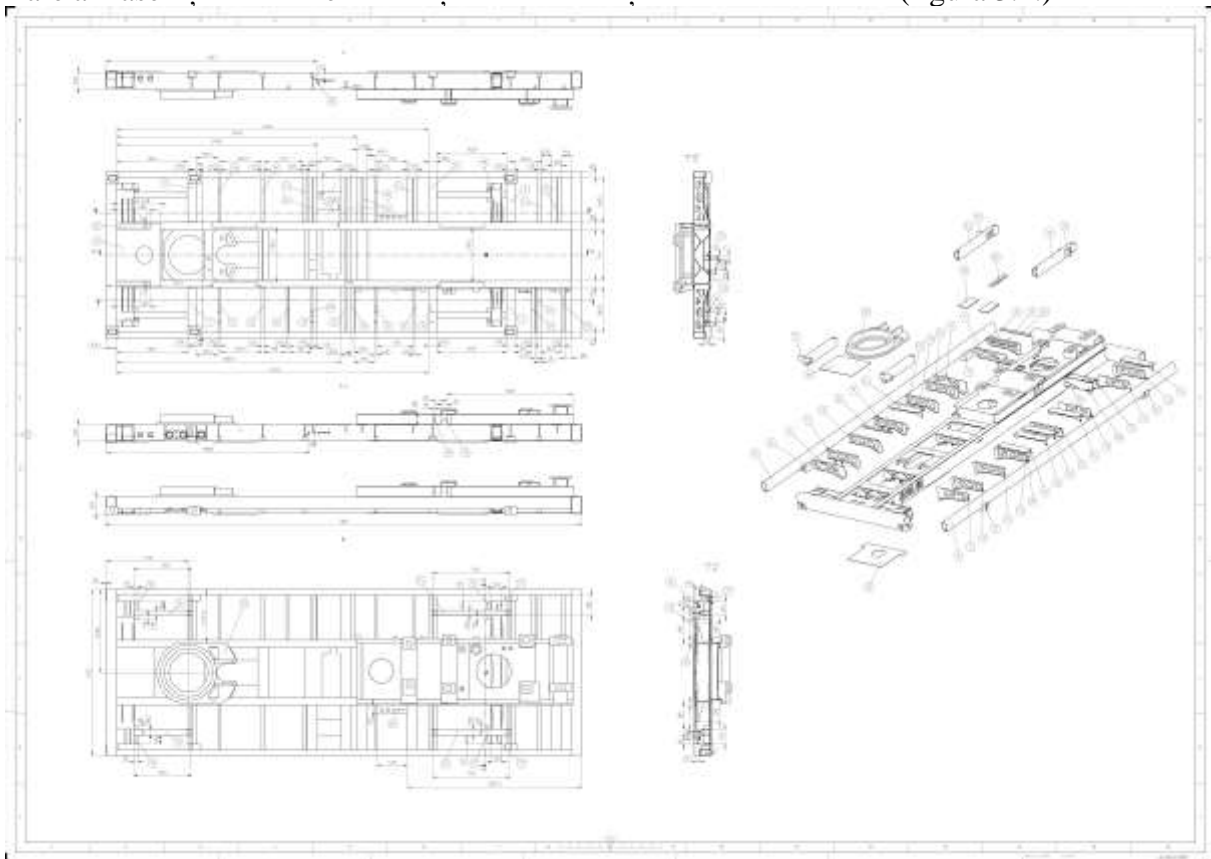


Fig. 3.1. Desen execuție șasiu instalație sudare șină de cale ferată

Micșorarea masei produsului se poate face prin micșorarea grosimii reperelor utilizate la realizarea prin sudare a ansamblului șasiu. În aceste condiții, este necesar ca materialele de bază utilizate la realizarea reperelor ansamblului să prezinte proprietăți superioare mecanice și funcționale, care să compenseze micșorarea grosimii, astfel încât să-și păstreze rezistența și integritatea în contextul solicitărilor din timpul funcționării.

Luând în considerare necesitatea practică, se propune înlocuirea materialului de bază S355 ML utilizat în cazul realizării în construcție sudată a ansamblului șasiu cu un material de bază din categoria oțelurilor de înaltă rezistență.

Obiectivul principal al tezei de doctorat este reprezentat de dezvoltare a tehnologiilor de sudare a oțelului S890QL în contextul utilizării acestuia ca material de bază necesar realizării șasiului instalației de sudare a șinelor de cale ferată.



Fig. 3.2. Șasiu instalație sudare șină de cale ferată

În cadrul tezei de doctorat, având la baza stadiului actual, cercetările teoretice au cuprins următoarele aspecte:

- cunoașterea principalelor tipuri de materiale de înaltă rezistență, cu evidențierea evoluției în timp a acestora și a proprietăților mecanice a lor;
- cunoașterea principalelor probleme de sudabilitate întâlnite în cazul îmbinării prin sudare a materialelor cu înaltă rezistență;
- cunoașterea principalelor procedee de sudare prin topire utilizate în cazul îmbinării prin sudare a materialelor de înaltă rezistență, a avantajelor, dezavantajelor și a limitărilor de aplicabilitate specifice.

Cercetările experimentale au avut ca obiective următoarele aspecte:

- elaborarea planului experimental cu privire la posibilitățile de sudare a oțelului de înaltă rezistență S890QL;
- elaborarea de tehnologii necesare îmbinării prin sudare a materialului S890QL, cu scopul înlocuirii materialului de bază S355ML;
- implementarea planului experimental elaborat și realizarea cercetărilor experimentale cu privire la posibilitatea de sudare a oțelului S890QL;
- realizarea examinărilor nedistructive a probelor sudate din oțelul S890QL;
- realizarea încercărilor distructive a probelor sudate din oțelul S890QL;
- măsurarea și validarea timpului de răcire $t_{8/5}$ prin diferite metode experimentale (cu ajutorul termocuplelor de contact, dar și a termografierii în infraroșu);
- modelarea cu element finit a câmpului termic la sudare și măsurarea parametrului tehnologic $t_{8/5}$;
- modelarea cu element finit a comportării în funcționare a șasiului echipamentului de sudare a șinelor de cale ferată, realizat din materialele de bază S355ML și S890QL.

3.2 Structura tezei de doctorat

În funcție de obiectivele tezei de doctorat prezentate în cadrul subcapitolului 3.1, s-a întocmit schema generală de desfășurare a tuturor activităților întreprinse în cadrul temei abordate, schemă prezentată în figura 3.3.

Schema generală de desfășurare a activităților a avut la bază cunoștințele acumulate în urma analizei teoretice a principalelor materiale de înaltă rezistență, a compoziției chimice, a proprietăților acestora, precum și comportarea la sudare și posibilele procedee de sudare aplicabile, dar și experiența practică acumulată la locul de muncă.

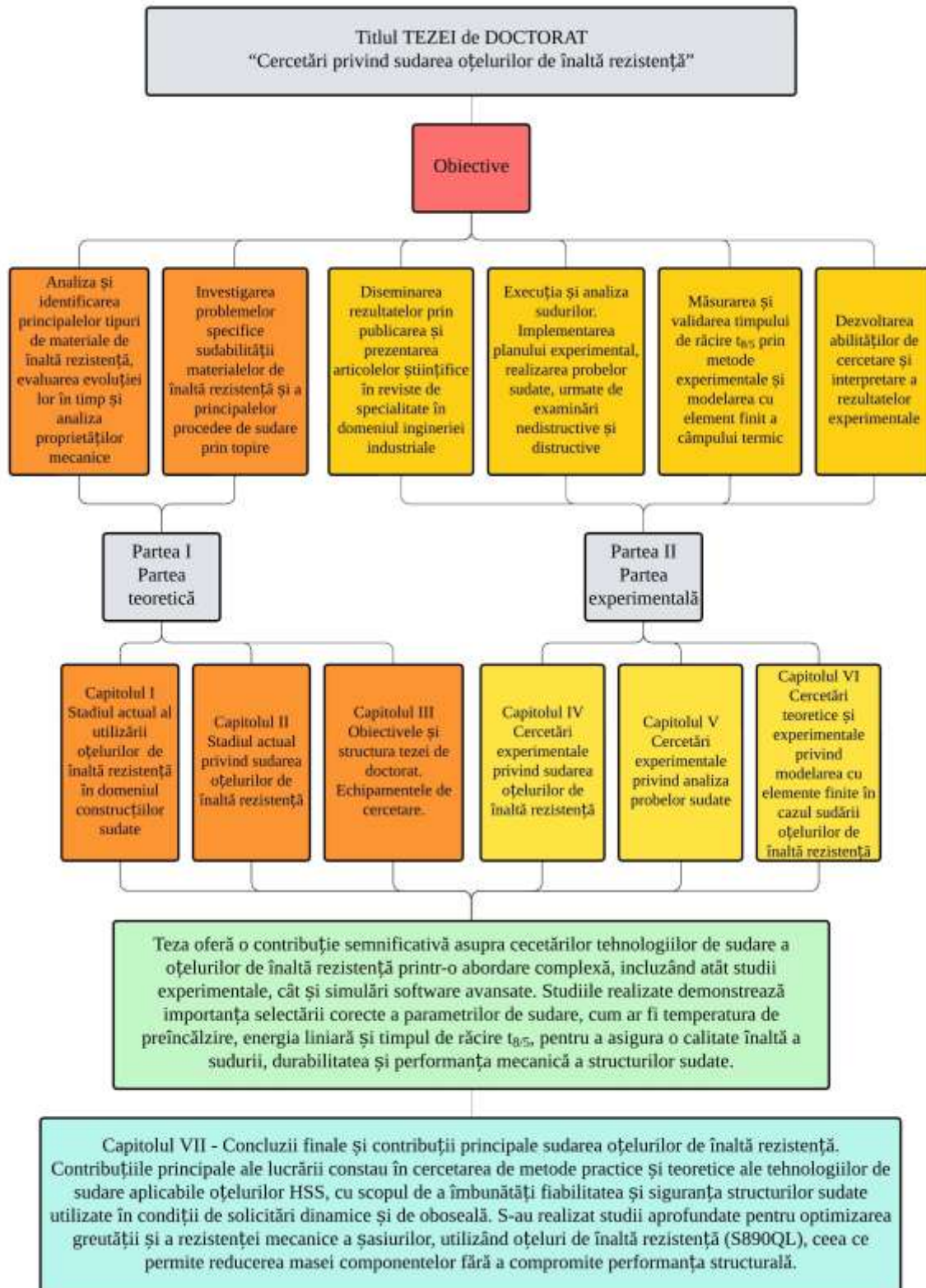


Fig. 3.3. Structura tezei de doctorat

3.3 Echipamentele de cercetare utilizate în cadrul programului experimental

Având la bază cunoștințele acumulate în urma studierii literaturii de specialitate cu privire la sudabilitatea oțelurilor de înaltă rezistență, dar și experiența practică acumulată la locul de muncă, s-a întocmit planul experimental necesar realizării cercetărilor cu privire la posibilitatea de sudare a oțelului S890QL.

Programul experimental a constat în realizarea a îmbinării prin sudare, cu ajutorul procedeului de sudare GMAW robotizat, a unui număr de 12 probe. După sudare, probele au fost supuse examinării nedistructive și încercărilor distructive, cu scopul analizei calității acestora și a identificării tehnologiilor valide de sudare.

Pentru realizarea programului experimental, a examinărilor și încercărilor efectuate, s-au folosit o serie de echipamente din cadrul laboratoarelor Universității de Știință și Tehnologie Politehnica București, dar și din cadrul firmelor colaboratoare.

3.3.1 Echipamente de sudare a probelor din oțelul S890QL

Probele au fost sudate cu ajutorul celulei robotizate Fanuc ARCMate 100iBe, din cadrul laboratorului de Sudare robotizată, din departamentul de Ingineria Calității și Tehnologii Industriale (ICTI), Facultatea de Inginerie Industrială și Robotică (FIIR) (figura 3.4.)



a)



b)



c)

Fig. 3.4. Celulă robotizată: a) – Ansamblu celulă robotizată, b) – robot sudare Fanul Arc Mate 100iBe, c) – echipament sudare Fronius TSP 4000.

Capitolul 4. Cercetări experimentale privind sudarea oțelurilor de înaltă rezistență

4.1 Date de intrare

Pe baza celor desprinse din analiza stadiului actual, se apreciază a fi de actualitate următoarele direcții de cercetare-dezvoltare privind optimizarea tehnologiilor de sudare a oțelurile de înaltă rezistență.

Programul experimental a fost conceput pentru a dezvolta o tehnologia optimă de sudare aplicabilă oțelului de înaltă rezistență S890QL, cu scopul utilizării acestuia în cazul fabricării ansamblului “șasiu instalație sudare șină de cale ferată”. Utilizarea noului material, în detrimentul oțelului S355ML oferă avantajul micșorării masei ansamblului.

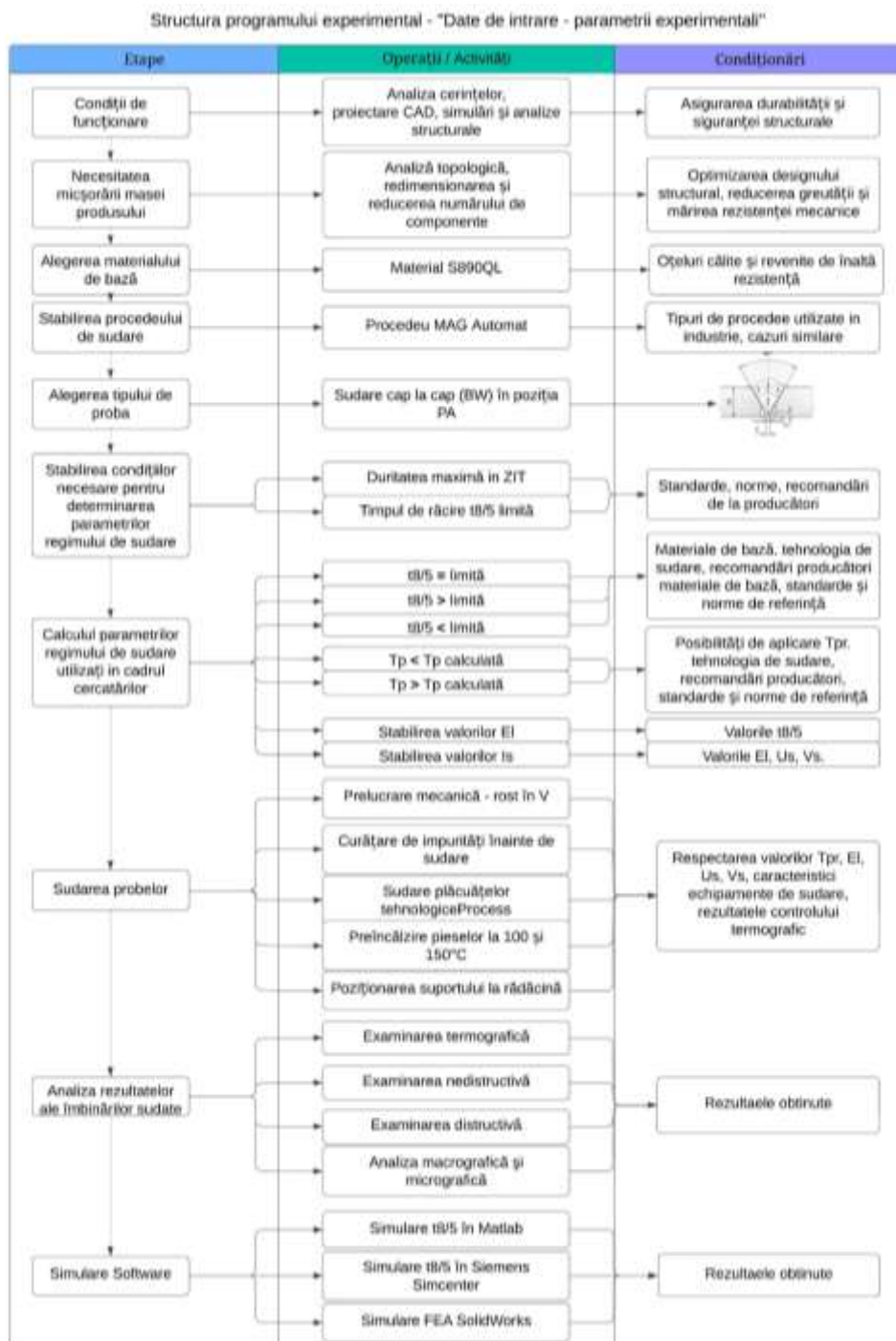


Fig. 4.1. Structura programului experimental “date de intrare – parametri”

4.2 Materialul de bază

Materialul de bază utilizat pentru realizarea programului experimental a fost oțelul S890QL, un oțel structural de înaltă rezistență, caracterizat printr-o limită minimă la curgere garantată de 890 MPa. Acest material oferă o combinație remarcabilă de rezistență și tenacitate la impact, alături de proprietăți optime pentru prelucrabilitate. Este o alegere ideală pentru structuri de susținere avansate, cum ar fi macarale mobile și încărcătoare, șasiuri de remorci și echipamente agricole. De asemenea, materialul prezintă o capacitate superioară de îndoire, calitate excelentă a suprafeței, sudabilitate ridicată și proprietăți garantate de planeitate, grosime și îndoire.

Simbolizarea oțelului este după cum urmează [127]:

- S - Oțel de construcții;
- 890 - limita minim la curgere exprimată în MPa;
- Q - călire și revenire;
- L - temperatură scăzută;

Compoziția chimică a oțelului S890QL, din șarja 629660, conform certificatului de calitate cu numărul 1220479001 (Anexa 1), precum și echivalențele sale cu alte tipuri de oțeluri conform diferitelor standarde, sunt prezentate în tabelul 4.1. și tabelul 4.2. Caracteristicile mecanice ale oțelului sunt indicate în tabelul 4.3.

4.2.1 Calculul indicilor de sudabilitate

Având în vedere influența elementelor de aliere asupra proprietăților materialului de bază (cap. 1.2.4, conform tabelul 4.3.), materialul de bază a fost achiziționat cu un certificat de calitate 3.1 (Anexa 1), în conformitate cu standardul SR EN 10204:2005 [130]. De asemenea, materialul este însoțit de certificat de calitate și condiții de livrare, conform standardului SR EN 10025-6+A1:2023 [21]. Aprecierea riscului de fisurare la rece, precum și aprecierea sudabilității materialului de bază, se realizează prin intermediul carbonului echivalent, a indicelui de fisurare la rece (P_{CM}) și la cald (HCS) [129]. (cap. 1.2.3.3 și cap. 1.3.).

4.2.2 Determinarea valorilor temperaturilor de transformare structurale

În scopul determinării influenței temperaturii de preîncălzire asupra transformărilor structurale în timpul răcirii cordonului de sudură depus prin procedeul MAG robotizat pe materialul S890Q, este necesar să se calculeze temperaturile de început și de sfârșit ale transformării martensitice.

Temperaturile de transformare sunt esențiale pentru a estima tipurile de microstructuri care se vor forma la răcirea după sudare și pentru a determina temperatura de preîncălzire optimă în procesul de sudare [131]. În cazul oțelurilor nealiate sau microaliate, principalele temperaturi la care au loc transformările la răcire, în condiții apropiate de echilibru (conform diagramei Fe-Fe₃C), sunt:

4.3 Alegerea procedeeului de sudare

Pentru optimizarea procesului de sudare a oțelului S890QL, procedeele de sudare GTAW-MAG (Metal Active Gas) automatizate sau robotizate reprezintă una dintre cele mai eficiente soluții din punct de vedere tehnic și economic. Procesul de sudare permite un control precis asupra parametrilor de sudare, ceea ce este esențial pentru menținerea caracteristicilor mecanice ale materialului, precum rezistența la tracțiune și tenacitatea, care pot fi afectate negativ de variațiile excesive de temperatură în timpul procesului de sudare.

4.5 Stabilirea valorilor parametrilor tehnologici ai regimului de sudare

4.5.1 Stabilirea temperaturii de preîncălzire (T_{pr})

Efectele metalurgice ale preîncălzirii depind de acțiunea concentrată a factorilor: timpul de răcire $t_{8/5}$, poziția lui T_{pr} în raport cu M_s și M_r ; forma particulară a diagramelor de descompunere anizotermă și

izotermă a austenitei subrăcite. În cazul oțelurilor pretențioase din punct de vedere al sudării, este necesară cunoașterea acestor date la stabilirea T_{pr} .

În urma aplicării metodologiei B din standardul SR EN ISO 1011 rezultă cele două valori luate în considerare în cadrul cercetărilor experimentale: valoarea maximă a temperaturii de preîncălzire de $T_{prmax}=150^{\circ}\text{C}$ și valoarea minimă aproximativă de $T_{prmin}=100^{\circ}\text{C}$.

Cele două valori ale temperaturii de preîncălzire alese pentru realizarea cercetărilor experimentale corespund cu valorile prescrise de către producătorii oțelului S890QL [43, 134].

4.5.2 Calcule pentru estimarea valorilor limită ale timpului de răcire între 800°C și 500°C ($t_{8/5}$)

Determinarea valorii limită a parametrului $t_{8/5}$ pornind de la o duritate maximă impusă în zona influențată termic (ZIT), în acest caz de 450 HV10, ajută la elaborarea unor tehnologii de sudare care duc la micșorarea pericolului de apariție a fisurării la rece. Se urmărește alegerea unor parametri tehnologici ai regimului de sudare astfel încât valoarea timpului de răcire $t_{8/5}$ să fie mai mare decât valoarea limită calculată, dar în limitele impuse de către producătorii de oțeluri.

În vederea optimizării tehnologiei de sudare, au fost luate în considerare 3 cazuri distincte:

- *Cazul 1* – $t_{8/5} = 8$ s: Tehnologia de sudare respectă valoarea lui $t_{8/5}$, așa cum reiese din calculele efectuate, caz în care există riscul apariției fisurării la rece și a durificării excesive în ZIT, dacă valoarea scade accidental sub valoarea impusă;

- *Cazul 2* – $t_{8/5} = 12$ s: Caz în care tehnologia de sudare respectă valoarea maximă a lui $t_{8/5}$, conform recomandării producătorului de tablă. Acesta este un caz limită în care tehnologia de sudare conduce la un timp de răcire apropiat de cel critic, recomandat de către producătorii de tablă realizată din materialul S890QL. În aceste condiții, din cauza acțiunii combinate a unor factori obiectivi, poate apărea o creștere accidentală a granulației, care se manifestă prin scăderea proprietăților mecanice și de tenacitate;

- *Cazul 3* – $t_{8/5} = 17$ s: În acest caz, recomandările cu privire la valoarea lui $t_{8/5}$ nu sunt respectate, rezultând un timp de răcire peste cel limită, ceea ce poate duce la o creștere a granulației.

Aceste cazuri sunt utilizate pentru a ilustra impactul parametrilor tehnologici asupra comportamentului materialului în ZIT și pentru a optimiza procesul de sudare astfel încât, să se reducă riscul apariției defectelor.

4.5.3 Stabilirea energiei liniare utilizate la realizarea probelor sudate

Pentru calculul valorilor energiei liniare se utilizează formula de calcul a valorii timpului de răcire (4.13) conform [40]. Ținând cont de faptul că se cunosc valorile de intrare în cadrul programului experimental ale timpului de răcire $t_{8/5}$ (8 s, 12 s și 17 s), ale temperaturii de preîncălzire (100°C și 150°C) și ale grosimii de material ($s=12\text{mm}$) în condițiile propagării bidimensionale, se poate calcula valoarea energiei liniare conform (4.14).

Din aplicarea formulei (4.14) și ținând cont de parametrii $t_{8/5}$ și T_{pr} ne rezultă:

- $Q=0,84$ kJ/mm pentru $t_{8/5} = 8$ s și $T_{pr} = 100^{\circ}\text{C}$;
- $Q=0,72$ kJ/mm $t_{8/5} = 8$ s și $T_{pr} = 150^{\circ}\text{C}$;
- $Q=1,03$ kJ/mm $t_{8/5} = 12$ s și $T_{pr} = 100^{\circ}\text{C}$;
- $Q=0,88$ kJ/mm $t_{8/5} = 12$ s și $T_{pr} = 150^{\circ}\text{C}$;
- $Q=1,23$ kJ/mm $t_{8/5} = 17$ s și $T_{pr} = 100^{\circ}\text{C}$;
- $Q=1,04$ kJ/mm $t_{8/5} = 17$ s și $T_{pr} = 150^{\circ}\text{C}$.

4.5.4 Stabilirea valorilor parametrilor regimului de sudare

În vederea simplificării cercetărilor și pentru efectuarea unor comparații cantitative și calitative ale rezultatelor obținute, se vor alege valori ale vitezei de sudare cuprinse între 3...8 mm/s, valori recomandate de către producătorul materialului de adaos.

Plecând de la valorile energiei liniare calculate și ținând cont de valorile tensiunii arcului și ale vitezei de sudare alese, în urma aplicării formulei de calcul (4.15) [40], ne rezultă valorile intensității curentului de sudare necesare realizării etapei experimentale.

Tabel 4.1 Valorile parametrilor regimurilor de sudare

Modul de transfer	Nr. probă	T_{pr} [°C]	$t_{8/5}$ [s]	E_l [KJ/mm]	I_a [A]	U_a [V]	V_s [mm/sec]	V_a [m/min]	Grosime de tranziție [mm]
SPRAY-ARC	1	100°C	8	0,84	257	26	7	8.2	13.6
	2	150°C	8	0,72	260	26	8	8.3	14.8
	3	100°C	12	1,03	290	30	7	9.3	16.7
	4	150°C	12	0,88	270	27	7	8.6	18.0
	5	100°C	17	1,23	293	30	6	9.5	19.9
	6	150°C	17	1,04	314	31	8	10.3	21.5
SHORT-ARC	7	100°C	8	0,84	165	18	3	4	13.6
	8	150°C	8	0,72	180	19	4	4.4	14.7
	9	100°C	12	1,03	190	19	3	4.7	16.7
	10	150°C	12	0,88	200	21	4	5.1	18.1
	11	100°C	17	1,23	206	21	3	5.3	19.8
	12	150°C	17	1,04	194	19	3	4.8	21.5

În urma calculului parametrilor regimului de sudare, a fost elaborat un model al specificației procedurii de sudare (Anexa 3) [135].

4.6 Descrierea standului experimental utilizat pentru realizarea probelor sudate

Standul experimental utilizat la realizarea probelor sudate este alcătuit din:

- sursă de sudare GMAW (FRONIUS TRANSPULS SYNERGIC 4000);
- Robot de sudare (FANUC ARC Mate 100iB);
- Aparat de înregistrat temperatura cu termocuple (GRAPHTEC midi LOGGER GL200A);
- Cameră de termografiere în infraroșu (FLIR E95);
- Cuptor pentru preîncălzirea pieselor;
- Termometru digital GTH 1150.

Vizualizarea câmpului termic s-a efectuat la capetele probei și în zona de mijloc a îmbinării, astfel încât măsurătorile să nu fie influențate de fenomenele care apar în zonele de început și sfârșit ale cordonului de sudură.

Sudura s-a realizat în curent continuu, cu polaritate directă, utilizând o sursă de sudare MAG.

Standul experimental pentru realizarea probelor sudate este prezentat în figura 4.3:

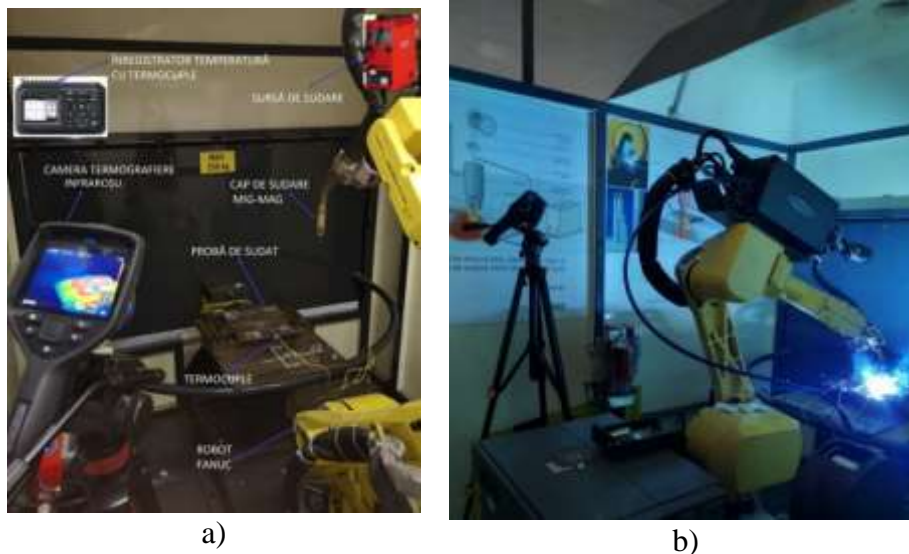


Fig. 4.3. Standul experimental folosit pentru sudarea MAG robotizată a probelor și pentru monitorizarea procesului de sudare.

4.7 Procedura experimentală [136]

În vederea realizării obiectivelor stabilite prin tema tezei, și anume analiza posibilităților de sudare a oțelului de înaltă rezistență S890QL, în vederea utilizării acestuia la realizarea șasiului instalației de sudat șine de cale ferată, partea experimentală s-a canalizat pe trei direcții de cercetare:

- prima direcție, în care se ia în calcul timpul de răcire $t_{8/5lim}$ pentru obținerea unei duriți maxime în ZIT de 450 HV10, analizând cele trei variante în care $t_{8/5}$: utilizarea $t_{8/5lim}=8$ s, a doua variantă în care valoarea lui $t_{8/5}=12$ s este valoarea maximă recomandată de către producătorii de oțeluri, și cea de a treia în care $t_{8/5}=17$ s, valoare peste limitele recomandate;

- a doua direcție, în care se pleacă de la cele trei cazuri prezentate anterior, luându-se în discuție efectuarea preîncălzirii probelor sudate: primul caz la o valoare a temperaturii de 100°C, valoare minimă rezultată în urma calculului realizat; al doilea ca la o valoare de 150°C;

Obs.: se menționează că valorile temperaturii de preîncălzire luate în discuție în cadrul programului experimental corespund situațiilor practice întâlnite în cazul realizării produselor sudate folosite în industria construcțiilor metalice.

- a treia direcție, în care pentru cele șase variante prezentate anterior se urmărește analiza influenței modificării modului de transfer (short-arc și spray-arc) în condițiile păstrării constante a celorlalți parametri tehnologici ($t_{8/5}$, T_{pr} , E_l).

Experimentele au fost desfășurate în conformitate cu direcțiile de cercetare prezentate, respectând parametrii indicați în tabelul 4.7.

Experimentele au fost concepute astfel încât rezultatele obținute să poată fi implementate în industrie, în cazurile realizării straturilor de rădăcină și de umplere prin procedeul de sudare MAG, și să constituie o bază importantă la realizarea noilor tehnologii de sudare în domeniul analizat.

Dimensiunile probelor utilizate în cadrul experimentelor au fost de 150x300x12 mm.

4.8 Concluzii

Pentru realizarea programului experimental în vederea analizei posibilităților de sudare a oțelurilor de înaltă rezistență (caz particular oțelul S890QL) s-au efectuat un număr de 12 probe sudate, luând în considerare următorii parametri tehnologici:

- *Temperatura de preîncălzire (T_{pr}):* a fost calculată având la bază metodologia B, descrisă în standardul SR EN 1011-2:2002, metodologie pentru evitarea fisurării în prezenta hidrogenului pentru oțeluri nealiate, cu granulație fină și slab aliate. În conformitate cu metodologia prezentată valorile temperaturilor de preîncălzire utilizate

la realizarea probelor sudate au fost de: $T_{pr}=100^{\circ}\text{C}$ și $T_{pr}=150^{\circ}\text{C}$. Calculul valorilor temperaturii de preîncălzire a ținut cont de valoarea carbonului echivalent, a hidrogenului difuzibil, a grosimii de material utilizate în cadrul realizării probelor experimentale (v. § 4.5.1);

- *Timpul de răcire între 800°C și 500°C ($t_{8/5}$):* timpul de răcire $t_{8/5}$ a fost calculat ținând cont de valoarea maximă a durtății din ZIT, dar și de recomandările producătorilor de oțeluri de înaltă rezistență. Valorile utilizate ale timpului de răcire $t_{8/5}$ au fost: $t_{8/5}=8$ s, $t_{8/5}=12$ s și $t_{8/5}=17$ s (v. § 4.5.2);
- *Tipul de transfer al materialului de adaos:* transfer short-arc și transfer spray-arc;
- *Energia liniară:* a fost calculată înlocuind în relația de calcul a timpului de răcire $t_{8/5}$ valorile parametrilor. În urma efectuării calculelor au rezultat următoarele valori ale energiei liniare (v. § 4.5.3):
 - $Q=0,84$ kJ/mm pentru $t_{8/5} = 8$ s și $T_{pr} = 100^{\circ}\text{C}$;
 - $Q=0,72$ kJ/mm pentru $t_{8/5} = 8$ s și $T_{pr} = 150^{\circ}\text{C}$;
 - $Q=1,03$ kJ/mm pentru $t_{8/5} = 12$ s și $T_{pr} = 100^{\circ}\text{C}$;
 - $Q=0,88$ kJ/mm pentru $t_{8/5} = 12$ s și $T_{pr} = 150^{\circ}\text{C}$;
 - $Q=1,23$ kJ/mm pentru $t_{8/5} = 17$ s și $T_{pr} = 100^{\circ}\text{C}$;
 - $Q=1,04$ kJ/mm pentru $t_{8/5} = 17$ s și $T_{pr} = 150^{\circ}\text{C}$.
- *Intensitatea curentului de sudare (I), tensiunea arcului (U) și viteza de sudare:* valorile parametrilor de sudare au fost aleși în funcție de valoarea energiei liniare, tipul de transfer al materialului de adaos și recomandările producătorului de material de adaos. Valorile parametrilor utilizați în cadrul experimentelor au fost prezentați în tabelul 4.7 (v. § 4.5.4).

Pentru eliminarea influenței factorului uman asupra calității procesului de sudare, probele au fost realizate utilizând procedeul de sudare robotizat GMAW, ceea ce asigură un control precis al vitezei de sudare și o constantă în timp a parametrilor regimului de sudare.

Capitolul 5. Cercetări experimentale privind analiza probelor sudate

Pentru analiza conformității probelor sudate și a validării tehnologiilor de sudare proiectate, probele sudate rezultate au fost supuse unor examinări nedistructive și încercări distructive. Metodele de analiză a probelor sudate sunt prezentate în figura 5.1.



Fig. 5.1. Analiza rezultatelor îmbinărilor sudate realizate pe materialul S890QL

5.1 Estimarea valorilor parametrului $t_{8/5}$ și analiza câmpului termic la sudare

Ciclul termic la sudare influențează distribuția căldurii în componentele de sudat, dar și transformările de fază care au loc în timpul solidificării băii de metal topit [137, 138]. Monitorizarea câmpului termic în cazul procedeelor de sudare trebuie realizată în vederea verificării respectării tehnologiilor de sudare și, implicit, a unor parametri importanți precum: temperatura de preîncălzire (T_{pr}), timpul de răcire între 800 °C și 500 °C ($t_{8/5}$) etc [138].

Pentru monitorizarea câmpului termic pe suprafața componentelor pot fi utilizate metode de contact (termometre de contact sau termocuple) sau fără contact (pirometre sau camere de termografieră în infraroșu) [141, 144]. În ultima perioadă, sisteme termografice sunt tot mai des folosite pentru măsurarea distribuției temperaturii și controlul sudării. Recent, camerele cu infraroșu au fost utilizate pe scară largă pentru a studia procesul de sudare în timp real [145..148], realizând măsurători fără contact și oferind rezultate cu acuratețe și precizie ridicate. Informațiile preluate de la cameră oferă o perspectivă asupra diferitelor forme de rezultate ale sudării, cum ar fi distribuția temperaturii, forma geometrică a îmbinărilor sudate și eventualele imperfecțiuni. Datele de temperatură înregistrate de la cameră pot fi folosite pentru a calcula timpii de răcire care apar în intervalul 800-500°C, interval în care au loc transformările de fază ale materialului, afectând microstructura și proprietățile mecanice.

5.2 Estimarea valorilor parametrului $t_{8/5}$ cu ajutorul termocuplelor de contact

Măsurătorile experimentale ale câmpului termic au fost realizate prin utilizarea termocuplelor atașate pe suprafața prelucrată a pieselor, la nivelul zonei de influență termică. Preluarea valorilor temperaturilor înregistrate cu ajutorul termocuplelor s-a realizat cu ajutorul echipamentului Graphtec midi Logger GL200A (figura 5.2). Variația temperaturii ciclului termic în timpul desfășurării proceselor de sudare pentru cele 12 probe realizate este prezentată în figurile 5.3....5.14. Având la bază variația temperaturii se poate măsura timpul de răcire $t_{8/5}$ pentru fiecare probă în parte, cu scopul verificării corectitudinii alegerii parametrilor tehnologiei de sudare. Valorile măsurate sunt prezentate în tabelul 5.1.



Fig. 5.2. Măsurarea valorilor temperaturilor în zonele îmbinărilor sudate

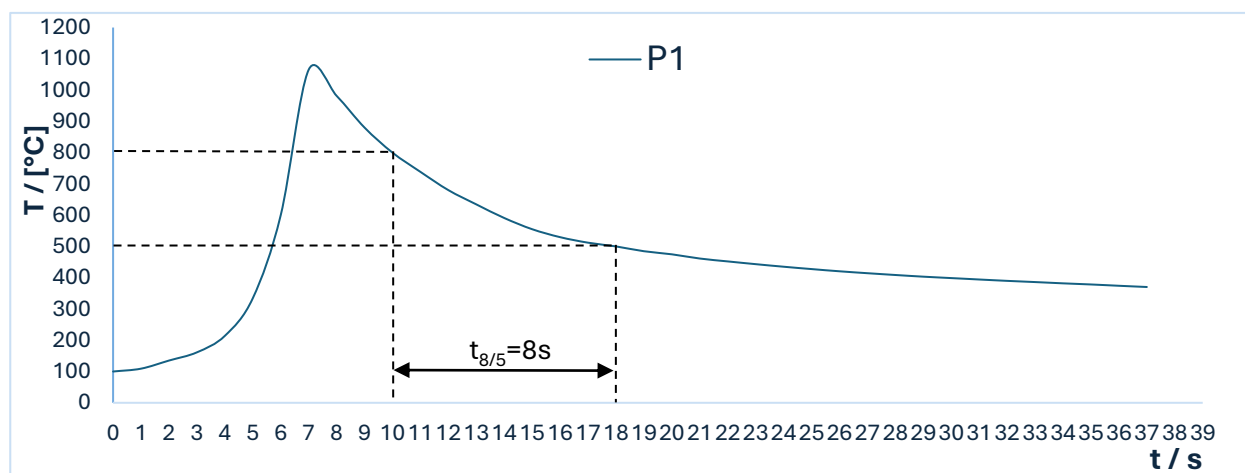


Fig. 5.3 Variația temperaturii ciclului termic în cazul probei P1

Tabel 0.2 Valorile timpului de răcire $t_{8/5}$

Nr. crt.	Modul de transfer al arcului	Codificare probă	$t_{8/5}$ impus [s]	$t_{8/5}$ măsurat [s]	Diferența [s]	Abatere [%]
1.	Spary-arc	P1	8	8,0	0	0
2.		P2		8,1	0,1	1.23
3.		P3	12	12	0	0
4.		P4		12,1	0,1	0.82
5.		P5	17	16,9	- 0,1	0.59
6.		P6		17,1	0,1	0.58
7.	Short-arc	P7	8	7,9	0,1	1.26
8.		P8		8,1	0,1	1.23
9.		P9	12	11,8	-0,2	1.69
10.		P10		12	0	0
11.		P11	17	17	0	0
12.		P12		17	0	0

În urma analizei valorilor prezentate în tabelul 5.1 se poate observa faptul că, în anumite cazuri, există mici diferențe între valorile determinate și cele măsurate ale timpului $t_{8/5}$. Diferențele maxime au fost de $t = -0.2$ s, ceea ce reprezintă o variație de 1,69%. Diferențele dintre valorile impuse și valorile măsurate ale parametrului $t_{8/5}$ pot fi cauzate de erorile de măsurare sau de condițiile de desfășurare a cercetărilor experimentale.

5.3 Estimarea valorilor parametrului $t_{8/5}$ și analiza câmpului termic la sudare cu ajutorul termografiei în infraroșu [149]

În timpul desfășurării experimentelor, ciclul termic aferent procesului de sudare a fost monitorizat prin intermediul camerei de termografie în infraroșu FLIR E95 (cap. 3.1.2), care a permis determinarea practică a unor parametri termici specifici, precum timpul $t_{8/5}$, și a oferit o reprezentare detaliată a distribuției câmpului termic pe întreaga suprafață a piesei sudate, precum și pe durata întregului proces de sudare. Utilizarea camerei de termografie cu infraroșu oferă o imagine de ansamblu a câmpului termic al îmbinării având avantajul monitorizării întregii zone de interes într-o singură înregistrare.

Figurile 5.15.a și b reprezintă imagini termografice înregistrate în timpul procesului de sudare, în timp ce figura 5.15.c. prezintă distribuția temperaturii de-a lungul cordonului de sudură la un moment dat după începerea procesului. Cunosând în permanență viteza de sudare și timpul scurs, se poate determina în orice moment poziția punctului de interes și temperatura corespunzătoare.

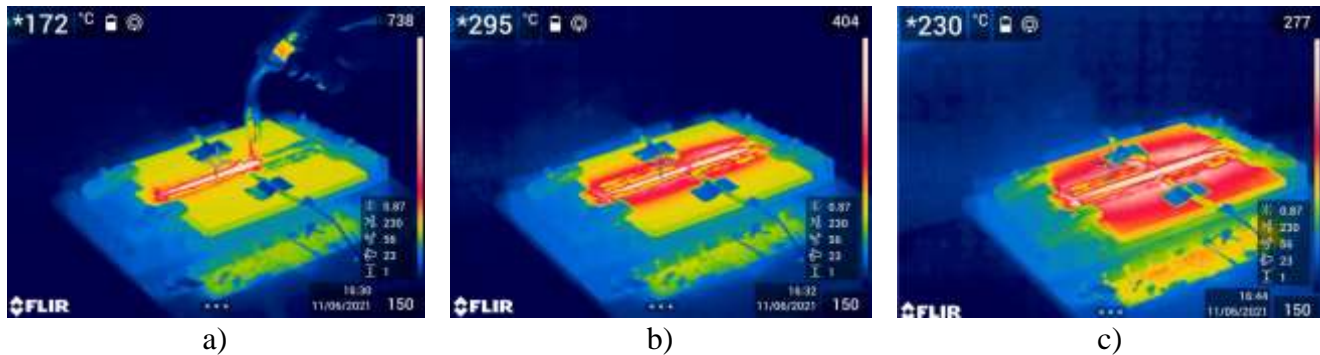


Fig. 5.15. Distribuția câmpului termic în timpul proceselor de sudare

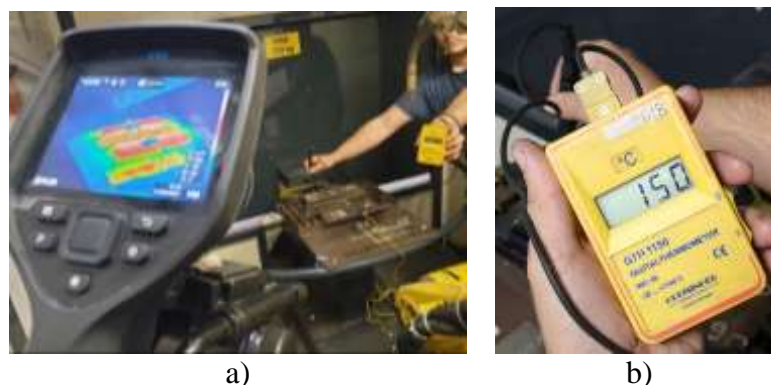


Fig 5.16. Calibrarea camerei de termografierie în infraroșu cu ajutorul termometrului de contact: a) – camera de termografierie în infraroșu, b) - termometru digital de contact.

În vederea realizării distribuției valorilor temperaturilor obținute pe baza imaginilor preluate cu ajutorul camerei de termografierie în infraroșu, a fost creată o aplicație specializată în Matlab (versiunea R2017a) care să fie capabilă să „citească” fiecare imagine a fișierului video înregistrat și să o analizeze din punct de vedere al temperaturii acesteia, respectiv să creeze o hartă de distribuție termică. Prin intermediul acestei aplicații, cercetătorii pot evalua cu precizie valorile de temperatură în timpul procesului de sudare și răcire și pot identifica în acest mod posibilele zone cu probleme, contribuind astfel la îmbunătățirea calității și fiabilității sudurilor.

Pe baza valorilor temperaturilor prezentate în tabelul 5.2 au fost trasate graficele de variație a temperaturilor măsurate pentru probele P1 și P2 în cazul utilizării termocuplelor (P1, P2), respectiv a camerei de termografierie în infraroșu (P1IT, P2IT) prezentate în figura 5.17.

5.4 Examinarea nedistructivă a îmbinărilor sudate

Examinarea nedistructivă are un rol important în evaluarea calității îmbinărilor sudate, oferind informații valoroase despre integritatea structurii, fără a compromite piesa analizată. Pentru acest studiu, au fost aplicate mai multe metode de examinare nedistructivă (examinarea vizuală, cu lichide penetrante și examinarea cu ultrasunete) urmate ulterior de prelevarea probelor pentru testări distructive.

Aceste metode au fost selectate în cadrul experimentelor pentru a asigura o evaluare completă și detaliată a calității îmbinărilor sudate, asigurând atât o examinare de suprafață cât și de volum.

5.8 Analizele macrografice și micrografice ale îmbinărilor sudate

5.8.2 Examinarea macroscopică și microscopică

Examinarea macroscopică și microscopică optică a fost efectuată în Laboratorul LAMET, în conformitate cu SR EN ISO 17639:2022.[165, 166].

Examinarea micrografică și macrografică a fost realizată cu ajutorul microscopului optic OLYMPUS GX51 și a microscopului electronic de baleiaj (SEM) Quanta Inspect S.

Examinarea macroscopică și microscopică a probei P1

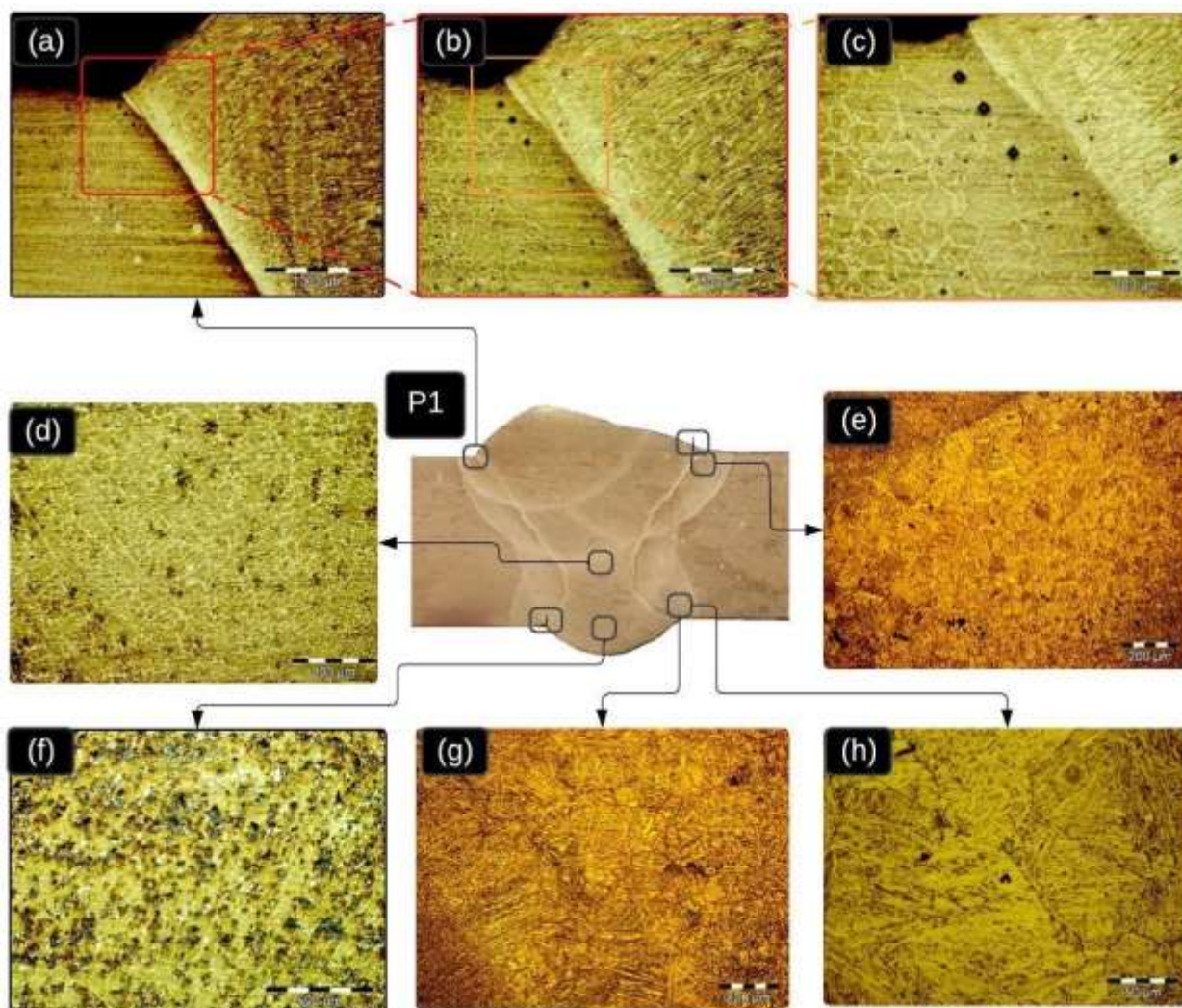


Fig. 5.41. Analiza microstructurii probei P1

- Zona de trecere între cusătură și materialul de bază, la suprafața sudurii, 50x.
- Analiza macroscopică pe zona de trecere între materialul de bază și sudură: Se observă linia de fuziune continuă, fără imperfecțiuni și creșterea granulației în ZIT, 100x.
- Detaliu pe zona de trecere între sudură și materialul de bază, în ZIT, 200x.
- Sudura: Microstructură dendritică fină în șiruri, 200x.
- Microstructura ZIT zona superioară a sudurii: Grăunți grosolani de martensită și austenită reziduală, 200x.
- Microstructura sudurii în zona de rădăcină, 100x.
- Detaliu microstructura ZIT zona de rădăcină: Grăunți grosolani de martensită și austenită reziduală, 200x.
- Detaliu ZIT: Grăunți grosolani de Martensită și mici zone de austenită reziduală, 1000x.

Austenita reziduală apare la răcirea mai rapidă decât cea de echilibru, deoarece timpul de transformare este prea scurt. Austenita reziduală tinde să se retransforme în stare solidă în ferită și perlită la o eventuală reîncălzire (tratament termic, reparații locale ale sudurii), generând tensiuni interne suficient de mari, ce pot determina fisurarea. La fel, martensita și bainita se pot retransforma în ferită/perlită dacă

se depășește temperatura M_s sau B_s . Valoarea M_s pentru oțelul analizat (S890QL) este de 405°C , deci se poate atinge cu ușurință la o reîncălzire pentru depunerea următoarelor straturi.

Austenita reziduală apare la răcirea mai rapidă decât cea de echilibru, deoarece timpul de transformare este prea scurt. Austenita reziduală tinde să se retransforme în stare solidă în ferită și perlită la o eventuală reîncălzire (tratament termic, reparații locale ale sudurii), generând tensiuni interne suficient de mari, ce pot determina fisurarea!

La fel, martensita și bainita se pot retransforma în ferită/perlită dacă se depășește temperatura M_s sau B_s (temperaturile superioare de transformare, calculate în § 4.4.2). M_s pentru oțelul analizat este de 405°C , deci se poate atinge cu ușurință la o reîncălzire pentru depunerea următoarelor straturi.

5.9 Realizarea proceselor verbale de calificare a procedurilor de sudare

Pe baza analizei rezultatelor obținute în cazul cercetărilor experimentale, s-au elaborat procesele verbale de calificare a două tehnologii de sudare: prima procedură are la bază sudarea prin transfer short-arc, pentru table cu grosime mai mică de 8 mm, a doua prin transfer spray-arc, pentru table cu grosime mai mare de 8 mm. (Anexa 7).

5.10 Concluzii privind sudarea oțelurilor de înaltă rezistență

- ✓ Monitorizarea câmpului termic la sudarea oțelurilor de înaltă rezistență se poate realiza atât cu ajutorul termocuplelor de contact, cât și cu ajutorul camerei de termografieră în infraroșu;
- ✓ În cazul măsurării temperaturilor procesului de sudare cu ajutorul termocuplelor de contact s-au obținut valori ale timpului de răcire $t_{8/5}$ cu o variație de maxim 1,66% față de valorile calculate, fapt ce duce la concluzia că au fost respectate cerințele tehnologice ale procesului de sudare;
- ✓ În cazul monitorizării câmpului termic cu ajutorul camerei de termografieră în infraroșu, diferențele între valorile parametrului $t_{8/5}$ determinat prin termografieră și pe baza formulelor matematice se înscriu în valorile acceptabile, înregistrând erori de maxim 2,75% din valoarea timpului $t_{8/5}$ calculat;
- ✓ Monitorizarea câmpului termic la sudare cu ajutorul termografierii în infraroșu se constituie într-un instrument adecvat de stabilire a distribuției temperaturii pe suprafața probei analizate, cât și pentru măsurarea parametrului $t_{8/5}$;
- ✓ Măsurarea durtăților în zonele caracteristice a evidențiat o creștere a valorii durtăților în zona cordonului de sudură sau în ZIT, atingând o valoare maximă de 391 HV_{0,2}, valoare sub limita maximă impusă de către standardele în vigoare;
- ✓ Rezultatele obținute în urma încercării la tracțiune a scos în evidență faptul că ruperea probelor s-a realizat la o valoare a rezistenței de rupere sub $R_m=940\text{MPa}$ (valoare minimă garantată în cazul oțelului S890QL) pentru probele a căror temperatură de preîncălzire a fost de $T_{pr}=100^\circ\text{C}$, fapt ce duce la recomandarea utilizării unei valori a temperaturii de preîncălzire de $T_{pr}=150^\circ\text{C}$;
- ✓ Valorile limitei de curgere ale probelor sudate sunt peste limita minimă garantată de $R_{p0,2}=890\text{MPa}$ în toate cazurile utilizării unei valori a temperaturii de preîncălzire de $T_{pr}=150^\circ\text{C}$;
- ✓ În cazul utilizării unei valori a temperaturii de preîncălzire de $T_{pr}=100^\circ\text{C}$ s-au obținut valori sub valoarea minimă garantată a $R_{p0,2}$, sau foarte apropiate, fapt ce duce la recomandarea utilizării unei temperaturi de preîncălzire cu o valoare mai mare ;
- ✓ Valorile parametrului $t_{8/5}$ luate în considerare în cadrul programului experimental nu au efect de durificare excesivă în zonele cordonului de sudură (care să ducă a apariția fisurării), dar nici o supraîncălzire care să producă o pierdere a valorilor proprietăților mecanice.

Pe baza analizelor microstructurii probelor P1-P12, se pot extrage următoarele concluzii privind influența parametrilor de sudare, timpii de răcire și energia liniară asupra microstructurii și rezultatelor din încercările destructive:

1. Calitatea liniei de fuziune:

- În toate probele analizate, linia de fuziune între materialul de bază și sudură este continuă, fără imperfecțiuni vizibile la scară macrostructurală. Acest aspect indică o calitate ridicată a procesului de sudare, asigurând integritatea structurală.

2. Zonele influențate termic (ZIT):

- Microstructura sudurii prezintă în mod consistent formațiuni dendritice fine, aliniată pe direcția fluxului termic. Aceasta sugerează o solidificare controlată, cu o rată de răcire corespunzătoare pentru a preveni apariția defectelor interne.
- În ZIT, este observată o creștere a dimensiunii grăunților, specifică regiunilor expuse la temperaturi înalte, urmată de răcire. Aceasta este mai pronunțată în zonele de supraîncălzire.
- În toate probele, ZIT prezintă grăunți grosolani de martensită, asociați cu temperaturile ridicate și răcirea rapidă. Acestea pot influența rezistența și comportamentul la oboseală al sudurii.
- Este observată frecvent în ZIT, mai ales în zonele de tranziție și rădăcină, indicând condiții termice care favorizează transformările incompletă austenită-martensită.
- În anumite probe (ex. P3), au fost identificate precipitații de carburi dure la limitele de grăunte, ceea ce poate contribui la creșterea durității dar și la potențiala fragilizare a ZIT.

3. Structura sudurii:

- În zona rădăcinii, microstructura prezintă formațiuni dendritice aciculare orientate pe direcția fluxului termic cu posibilitatea de formare a grăunților columnari orientați pe direcția de răcire. De asemenea, se observă formarea unor mici faze precipitate, ce pot contribui la creșterea durității locale.

4. Unghiurile de racordare:

- Unghiurile de racordare dintre sudură și materialul de bază variază între 122° și 178° , indicând o distribuție largă a condițiilor geometrice. Unghiurile mai mari (ex. 178° - P4) sugerează o supraîncălzire semnificativă a stratului de sudură, ceea ce poate influența tensiunile reziduale și performanța mecanică.

5. Materialul de bază:

- Structura materialului de bază prezintă grăunți poliedrici de ferită și perlită, specifici materialului laminat termomecanic. La interfața cu ZIT, grăunții devin alungiți din cauza transformărilor induse termic.

6. Concluzie generală:

- Microstructura probelor analizate este în general uniformă, fără defecte, ceea ce sugerează utilizarea unui proces de sudare controlat. Totuși, se recomandă monitorizarea atentă a ZIT pentru a minimiza granulația grosolană și a îmbunătăți tranzițiile fazelor.
- Unghiurile de racordare și distribuția precipitațiilor trebuie corelate cu testele mecanice pentru a confirma conformitatea cu cerințele standardelor aplicabile.
- În cazul probelor realizate cu temperaturi de preîncălzire mai scăzute, se observă prezența martensitei aciculare și austenitei reziduale, cu o tendință de formare a granulației grosolane în ZIT pe măsură ce timpul de răcire crește.
- Timpul de răcire ($t_{8/5}$) influențează semnificativ structura finală a sudurii. La probele cu timp de răcire scurt (P1, P2, P7, P8), microstructura sudurii este predominant dendritică, cu forme fine și uniforme. În schimb, la probele cu un timp de răcire mai mare (P3, P4, P6, P10), se observă o microstructură mai grosă și mai puțin omogenă, cu formarea de precipitate de carburi în ZIT și o granulație mai mare. Aceasta sugerează o răcire mai lentă care favorizează precipitațiile și creșterea dimensiunii cristalelor.

Capitolul 6. Cercetări teoretice și experimentale privind modelarea CFD-MEF în cazul sudării oțelurilor de înaltă rezistență

O tendință actuală în domeniul proceselor de fabricație este reprezentată de minimizarea și/sau eliminarea timpilor neproductivi de pe fluxul de fabricație, timpii alocați încercărilor preliminare ale produselor realizate precum și a tehnologiilor elaborate. Pentru îndeplinirea acestui deziderat, una dintre metodele utilizate pe scară largă este simularea condițiilor de lucru reale cu ajutorul unor pachete software specializate [168].

Modelarea fenomenelor și proceselor de fabricație reprezintă o provocare, devenită posibilă datorită elaborării unor noi tehnici și algoritmi de calcul, dar și a dezvoltării componentelor hardware din structura calculatoarelor. Metoda Simulării Numerice a Curgerii Fluidelor și transferului de căldură (Computational Fluid Dynamics - CFD) are un rol extrem de important în proiectarea și verificarea diverselor proiecte care implică curgere și transfer de căldură și face să nu fie nevoie, cel puțin în diverse etape ale dezvoltării, de partea experimentală care era de neînlocuit până acum câțiva ani. Prin analiza CFD se pot obține informații detaliate privind distribuția vitezei, presiunii, temperaturii sau a altor parametri relevanți din domeniul fluid în regim tranzitoriu sau staționar [167].

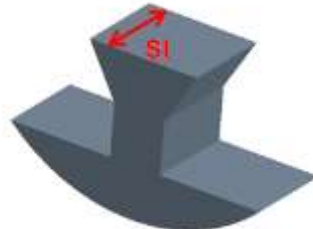
Pentru simularea ciclului termic la sudare MEF oferă o serie întregă de facilități, care se referă la:

- multiple variante de discretizare a modelului analizat astfel încât fenomenele care apar în cordonul de sudură și în zona învecinată lui să poată fi ușor analizate;
- se pot defini caracteristici de material diferite pentru materialele folosite în cazul simulării;
- permite interpretarea și vizualizarea câmpului termic rezultat la sudare,
- permite aproximarea nivelului de tensiuni și deformații în componentele de sudat.

6.1 Simularea CFD a timpului de răcire $t_{8/5}$

6.1.1 Datele de intrare în vederea modelării a câmpului termic la sudare

- Materialul de bază, placa din oțel S890QL cu dimensiunile: 300 x 150 x 12 mm (figura 6.2)
- Placă de susținere din oțel cu fantă în T-Slot cu dimensiunile: 350 x 360 x 20 mm) (figura 6.3)
- Cordon de sudură de lungime fixă: 300 mm (figura 6.4)
- Baie mobilă de sudare
- Suport ceramic de susținere la rădăcină (sub sudură, între plăcile de oțel și placa T-Slot)



S_h [mm]	7
S_l [mm]	3.5
S_{bh} [mm]	2
S_{bw} [mm]	10
S_{ch} [mm]	2
S_{cw} [mm]	2
α [$^{\circ}$ C]	60

Fig.6.4. Elementele geometrice ale cordonului de sudură

6.1.2 Materiale utilizate pentru realizarea experimentelor

Definirea caracteristicilor materialelor utilizate s-a făcut în funcție de compoziția chimică și de temperatura procesului de sudare. Caracteristicile materialelor utilizate sunt prezentate în tabelul 6.1.

Pentru realizarea simulării câmpului termic la sudare s-a luat în considerare tehnologia de sudare utilizată în cazul probei P1 (tabel 6.2.).

În figura 6.8. este prezentată distribuția câmpului termic generat de sursa de sudare la începutul procesului de sudare (figura 6.8.a), la jumătatea procesului (figura 6.8.a) și la finalul acestuia (figura 6.8.c).

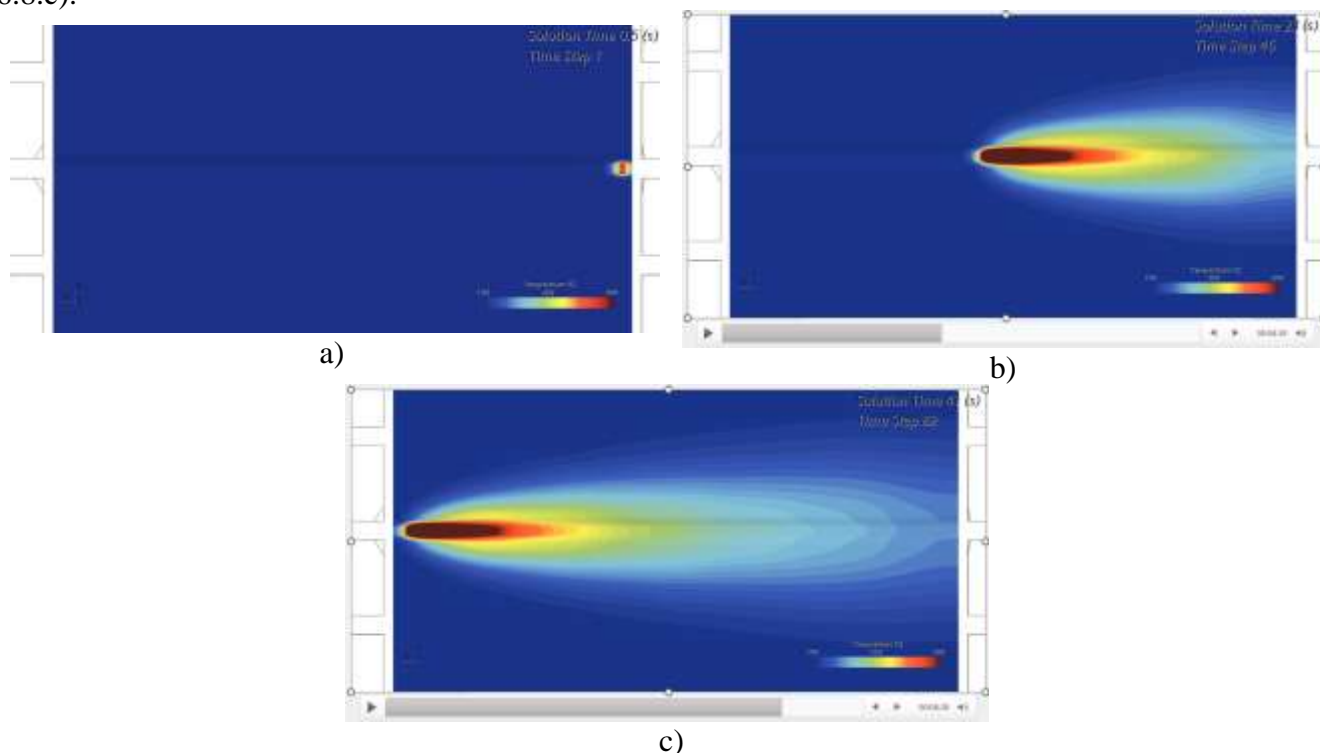


Fig 6.8. Simularea distribuției câmpului termic al primului strat (rădăcină) pentru Proba P1: a) – la începutul probei sudate – $t=0.5$ s; b) – la jumătatea cordonului de sudură – $t=23$ s; c) – la finalul cordonului de sudură – $t=46$ s

6.1.4 Validarea rezultatelor modelului de simulare

Validarea modelului simulării presupune compararea rezultatelor simulării efectuate cu rezultatele preluării temperaturii cu ajutorul termocuplelor de contact. În figura 6.9 este prezentată variația temperaturii pentru cele 2 componente, în punctele de măsurare 1 și 2. În funcție de variația temperaturii, s-au extras valorile $t_{8/5}$ pentru cele două componente, valori prezentate în tabelul 6.3. Se poate observa faptul că valorile $t_{8/5}$ rezultate în urma simulării sunt de $t_{8/5-1} = 7.57$ s și $t_{8/5-2} = 7.58$ s, având o eroare de măsurare de 5.25%, respectiv 5.37%.

6.2 Influența modificării materialului de bază asupra caracteristicilor ansamblului șasiu

Având la bază diferențele dintre proprietățile mecanice ale materialelor S355ML și S890QL, s-a propus modificarea grosimii elementelor de ranforsare ale cadrului principal al șasiului, fără a modifica dimensiunile de gabarit ale acestuia. Modificarea dimensiunilor de gabarit ale șasiului dar și a componentelor, necesită o analiză detaliată și complexă a întregului echipament de sudare a șinelor de cale ferată.

În urma re-proiectării șasiului prin înlocuirea materialului de bază și modificarea grosimii componentelor, s-a realizat o analiză comparativă MEF având la bază modificările de proprietăți ale materialului de bază dar și a modificării grosimii de material a unora dintre componente.

Pentru a analiza diferența de masă a șasiului rezultată în urma modificării materialului de bază și a grosimii componentelor, a fost realizat modelul 3D al acestuia în programul de proiectare SolidWorks.

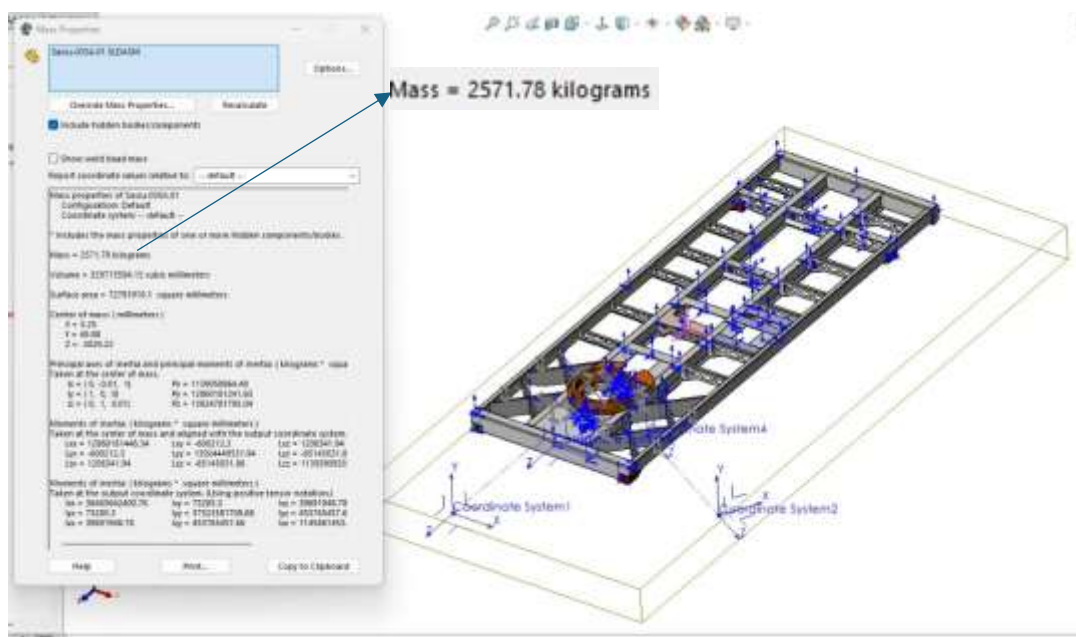


Fig.6.10. Determinarea masei ansamblului șasiu realizat din oțelul S355ML

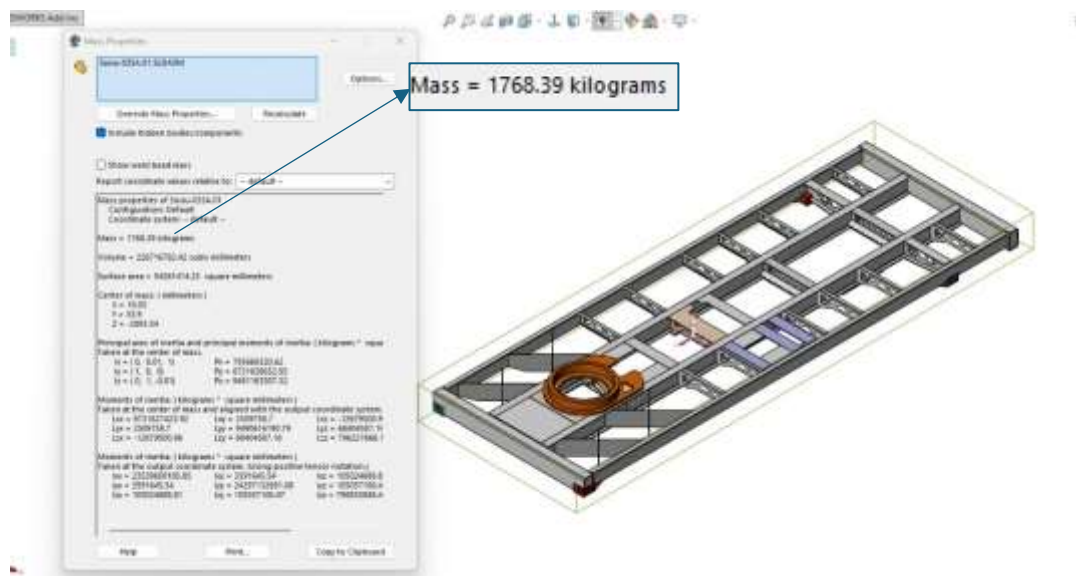


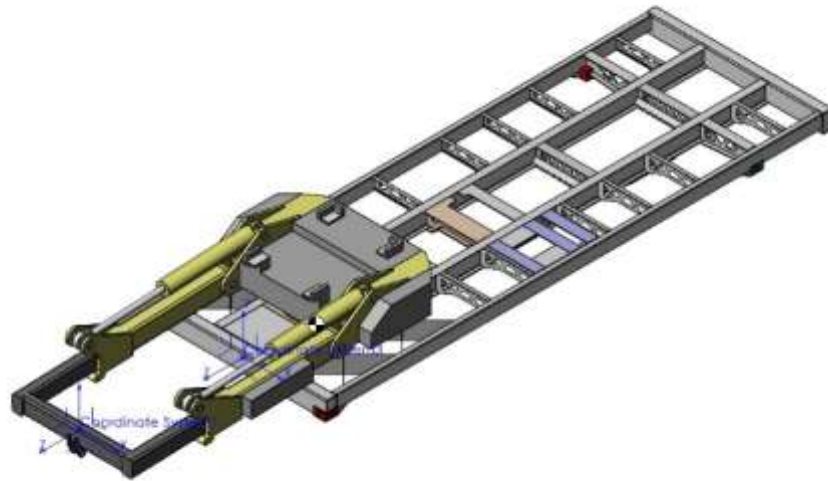
Fig.6.11. Determinarea masei ansamblului șasiu realizat din oțelul S890QL

Din analiza figurilor 6.10 și 6.11, se poate observa faptul că, în urma modificării grosimii componentelor prezentate în tabelul 6.4, masa ansamblului șasiu s-a micșorat de la 2571,78 kg la 1768,39 kg. Din analiza valorilor, se observă faptul că s-a realizat o micșorare a masei șasiului de 803,39 kg, ceea ce reprezintă o pierdere de 31,23% din masa inițială a acestuia.

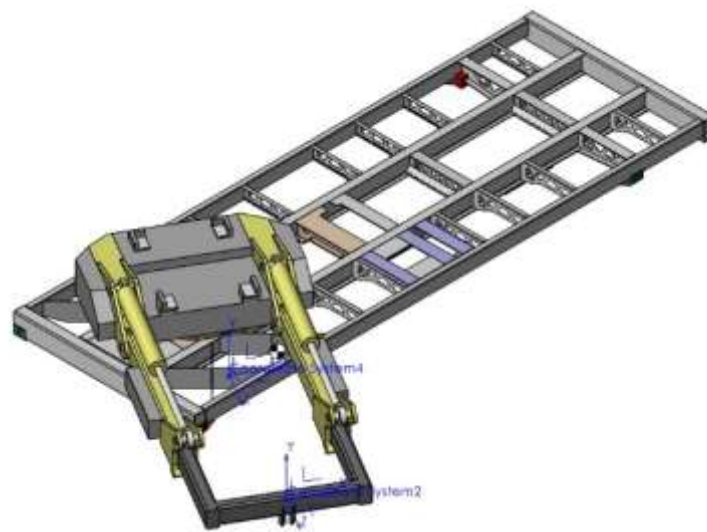
6.3 Simularea cu ajutorul MEF a șasiului instalației de sudare

Pentru realizarea procesului de simulare, cu ajutorul softului specializat SolidWorks, s-au luat în considerare solicitările rezultate în urma utilizării capului de sudare. Solicitățile la care a fost supus modelul șasiului au fost: 5000 kgf, reprezentat de masa capului de sudare (longitudinal pe șasiu sau la o înclinare de 60° față de axa longitudinală a șasiului), și 2800 kgf, din masa dispozitivul de prindere a capului de sudare.

Scopul utilizării oțelurilor cu rezistență ridicată în astfel de aplicații este adesea reducerea greutății prin scăderea grosimii componentelor. Reducerea greutății structurale aduce numeroase avantaje, printre care un consum redus de material, mai puține operațiuni de sudare și costuri diminuate de transport.



a)



b)

Fig.6.12. Modelul 3D al șasiului: a) – în poziție de deplasare; b) – în poziție de funcționare.

6.3.1 Încărcări și constrângeri generale ale studiului

Conform modelului de asamblare și funcționare, șasiul va avea puncte fixe de prindere pe corpul instalației de sudare, ele fiind constituite de colțurile acestuia (figura 6.14).

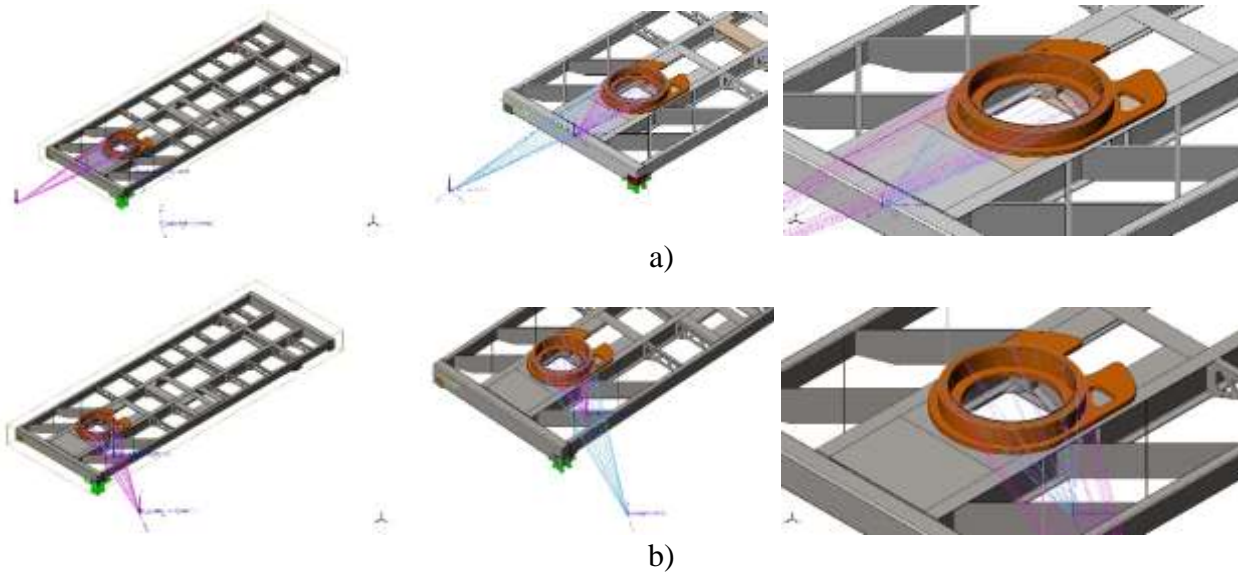


Fig.6.15. Modul de solicitare a șasiului: a) – aplicarea solicitărilor în lungul șasiului; b) - aplicarea solicitărilor la un unghi de 60° față de axa longitudinală.

6.3.2 Simularea șasiului realizat din materialul S355ML cu sarcina aplicată la un unghi de 60° față de axa longitudinală a șasiului.

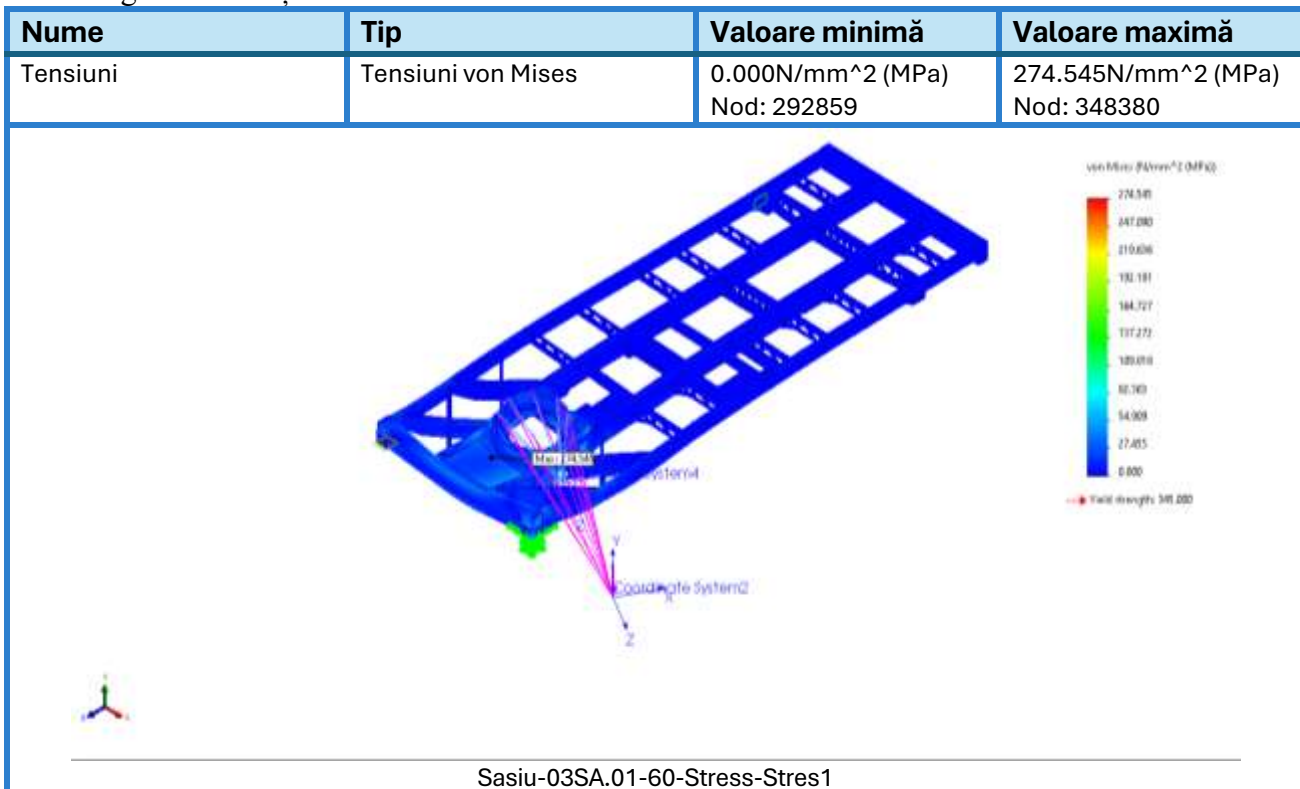


Fig.6.24. Distribuția tensiunilor von Mises pentru materialul S355ML cu sarcina aplicată la un unghi de 60° față de axa longitudinală a șasiului.

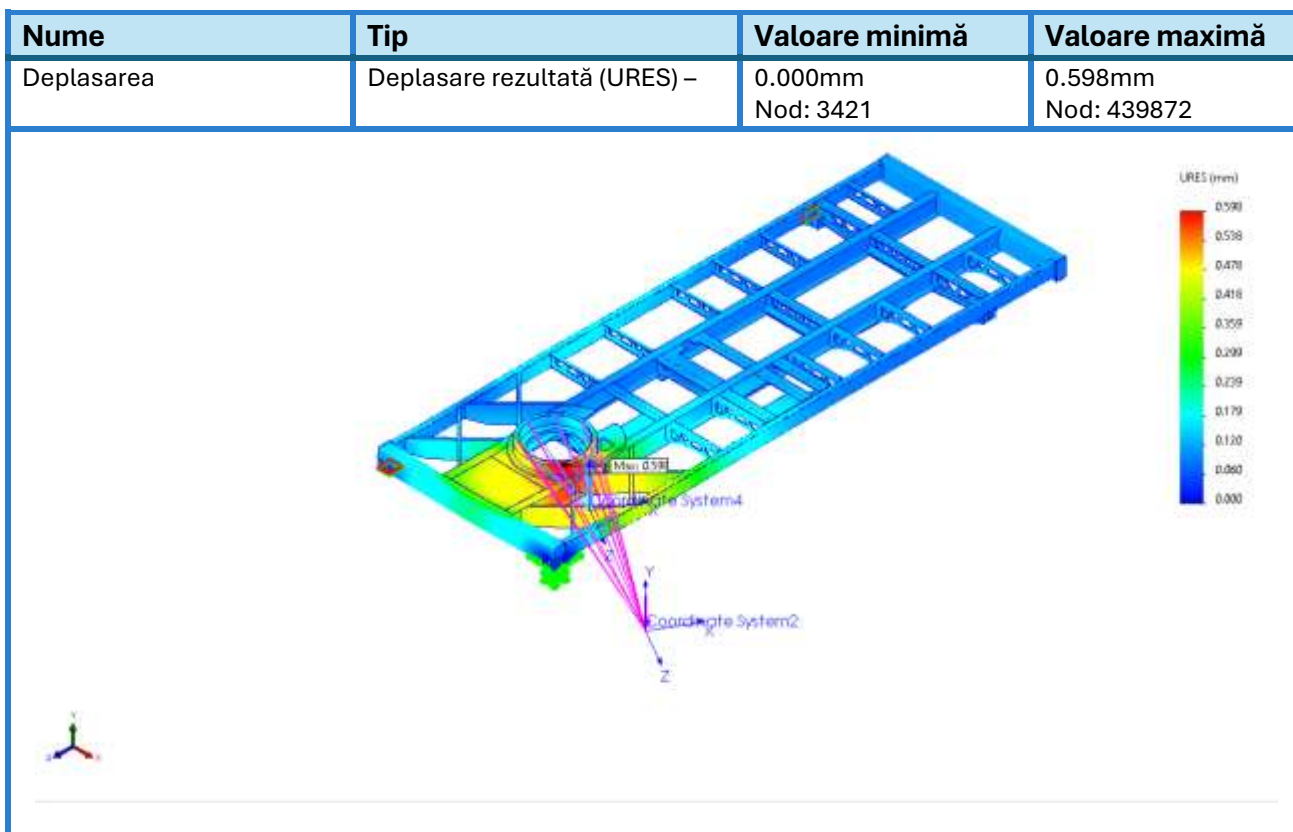


Fig.6.25. Distribuția deplasărilor pentru materialul S355ML cu sarcina aplicată la un unghi de 60° față de axa longitudinală a șasiului.

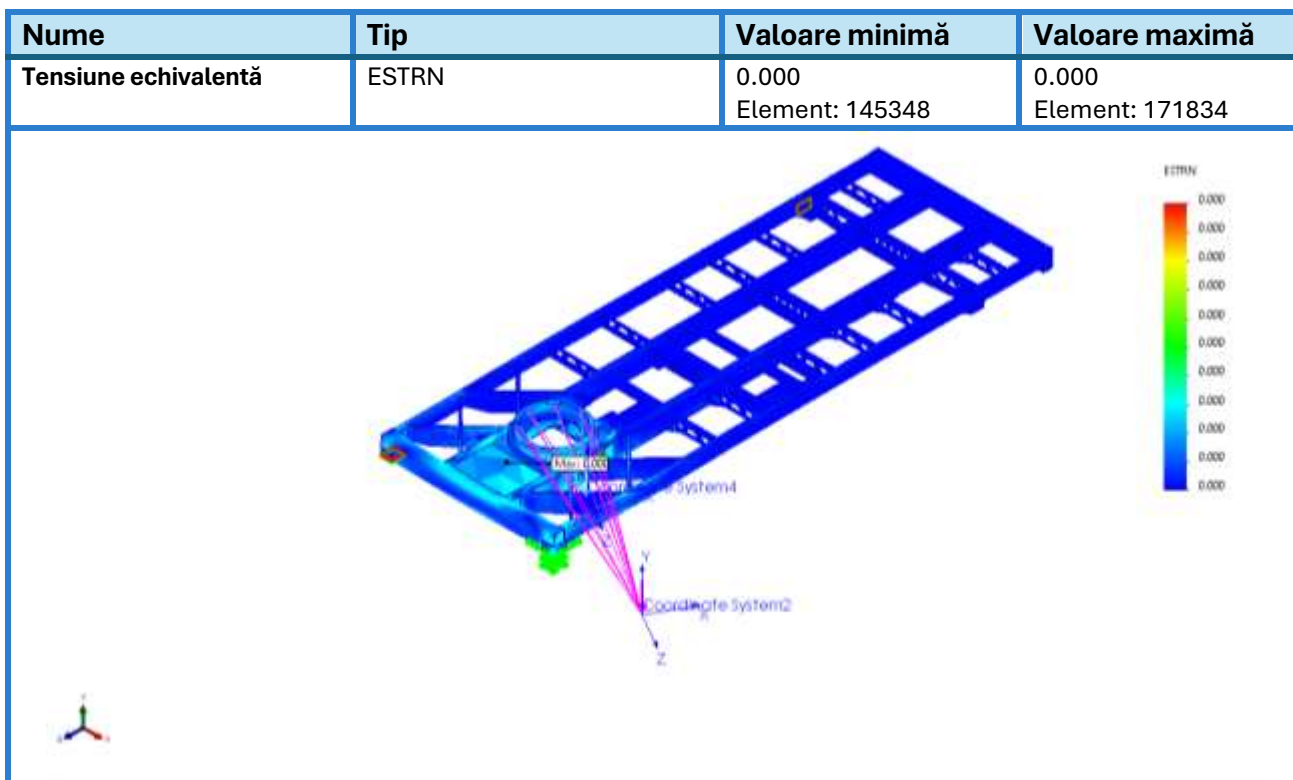


Fig.6.26. Distribuția tensiunilor echivalente pentru materialul S355ML cu sarcina aplicată la un unghi de 60° față de axa longitudinală a șasiului.

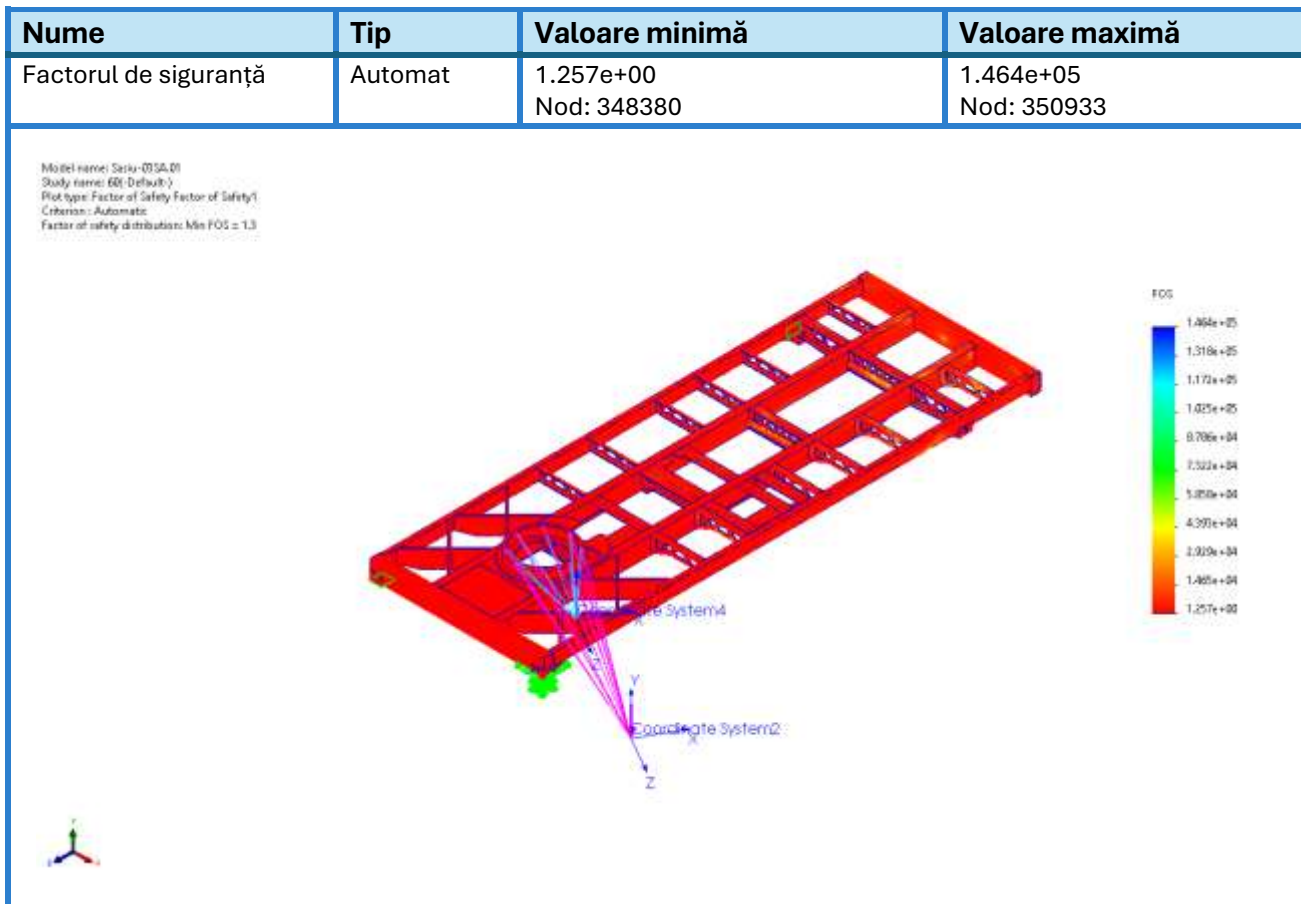


Fig.6.27. Distribuția factorului de siguranță pentru materialul S355ML cu sarcina aplicată la un unghi de 60° față de axa longitudinală a șasiului.

6.4 Concluzii:

Modelarea câmpului termic la sudare oferă posibilitatea reducerii timpilor de proiectare a structurilor sudate. În același timp, oferă informații cu privire la distribuția temperaturii în timpul procesului de sudare, dar și posibilitatea de măsurare a unor parametri importanți, cum ar fi timpul de răcire $t_{8/5}$.

Validarea modelului de simulare utilizat în cadrul tezei de doctorat s-a realizat prin compararea curbei distribuției temperaturii din timpul sudării, realizate cu ajutorul termocuplelor de contact, cu cea obținută prin simulare, în scopul determinării valorii $t_{8/5}$. Valorile indică o asemănare destul de mare a distribuției temperaturii și, implicit, a valorilor $t_{8/5}$. Se poate observa faptul că valorile $t_{8/5}$ rezultate în urma simulării sunt de $t_{8/5-1} = 7.57$ s și $t_{8/5-2} = 7.58$ s, având o eroare de măsurare de 5,25%, respectiv 5,37%.

Din analiza comparativă a rezultatelor obținute în urma utilizării MEF, pot fi evidențiate următoarele informații cu privire la solicitările la care structura sudată este supusă în timpul funcționării:

- în urma reproiectării structurii șasiului prin înlocuirea oțelului S355ML cu S890QL și utilizarea unor componente cu grosime mai mică, masa ansamblului se reduce cu 31,23%;
- reducerea masei șasiului oferă posibilitatea utilizării unei instalații cu un cap de sudare cu o masă mai mare dar cu funcții superioare din punct de vedere al parametrilor tehnologici;
- în cazul utilizării materialului S355ML pentru fabricarea șasiului, tensiunile maxime din timpul funcționării instalației se apropie de limita de curgere a materialului, fapt ce reprezintă un risc de cedare în cazul apariției unor factori perturbatori care să crească accidental solicitările;

- în cazul utilizării oțelului S890QL, solicitările din timpul funcționării instalației ajung la valori de până la 30% din limita de curgere, fapt care oferă premisele utilizării instalației în condiții de solicitări mai mari sau/și reducerea în continuare a grosimii componentelor;
- factorul de siguranță crește în cazul utilizării oțelului S890QL până la valori de peste 2.991, valoare care oferă posibilitatea de încărcare suplimentară a instalației de sudare fără să existe riscul de cedare în exploatare;
- deformațiile cauzate de solicitările la care este supus șasiul au valori de maxim 0.946 mm, valori relativ scăzute care nu reprezintă un risc pentru funcționarea instalației de sudare.

Capitolul 7. Concluzii finale, contribuții originale și direcții ulterioare de cercetare

7.1 Concluzii rezultate în urma realizării cercetărilor teoretice

Din analiza teoretică a stadiului actual privind utilizarea oțelurilor de înaltă rezistență și sudabilitatea acestora, s-au desprins următoarele concluzii importante:

- Dezvoltarea oțelurilor de înaltă rezistență (HSS) a început la jumătatea secolului XX, odată cu apariția oțelurilor normalizate cu o valoare a rezistenței la rupere de 400...500 MPa (S355N/NL, S460NL/ML), ajungând în prezent la valori de 1400 MPa, pentru oțelurile cu rezistență ultra-înaltă (S1300Q - v. § 1.2) sau 1700...2000 MPa pentru oțelurile avansate de înaltă rezistență (MS 1250/1500) ;
- Oțelurile de înaltă rezistență sunt utilizate pentru proprietățile mecanice ridicate, a proprietăților anticorozive, dar și pentru valorile energiei de rupere la temperaturi scăzute, asigurând astfel reducerea semnificativă a masei structurii, dar și utilizarea acestora în diferite condiții de mediu (v. § 1.3) ;
- Odată cu dezvoltarea acestei categorii de oțeluri, ele și-au găsit aplicabilitatea în diferite domenii industriale: auto (structura de rezistență), transport feroviar (rezervoare transport, infrastructură), platforme de foraj offshore, construcții navale, energetic (turbine eoliene, turnuri de transmisie și alte structuri legate de energie), construcții și infrastructură (clădiri, poduri), fabricarea de echipamente grele (echipamente de ridicat, excavatoare, buldozere și alte echipamente de excavare) (v. § 1.1) ;
- Sudabilitatea oțelurilor de înaltă rezistență este condiționată de conținutul de carbon, dar și de conținutul elementelor de aliere, carbonul echivalent fiind un criteriu general de analiză a sudabilității acestor tipuri de materiale (v. § 2.2.1) ;
- Principalele probleme cu privire la sudabilitatea oțelurilor de înaltă rezistență sunt legate de pericolul apariției fisurării la rece (pe fondul apariției structurilor dure și fragile, a prezenței tensiunilor interne dar și a hidrogenului difuzibil) și al pierderilor proprietăților de tenacitate, manifestată prin reducerea energiei de rupere la solicitări dinamice și creșterea temperaturii de tranziție ductil-fragil (cauzate de creșterea granulației) (v. § 2.1.3) ;
- Pentru sudarea în bune condiții a oțelurilor de înaltă rezistență se recomandă realizarea preîncălzirii (pentru evitarea apariției fisurării la rece) și sudarea cu rânduri filiforme (pentru evitarea creșterii granulației) (v. § 2.2.2) ;
- Pentru realizarea îmbinărilor prin sudare a oțelurile de înaltă rezistență pot fi utilizate majoritatea procedeele clasice de sudare prin topire, o atenție deosebită fiind acordată procedeele la care disiparea căldurii se realizează rapid (EBW și LASER),

existând riscul apariției structurilor dure și fragile și a creșterii exagerate a proprietăților mecanice în ZIT și cusătura sudată (v. § 2.3).

7.2. Concluzii rezultate în urma realizării cercetărilor teoretice

În urma realizării cercetărilor cuprinse în programul experimental al prezentei tezei de doctorat, se pot extrage următoarele concluzii:

- Oțelurile de înaltă rezistență pot fi utilizate cu succes pentru realizarea prin sudare a diferitelor structuri sudate folosite în industria auto și feroviară și pot înlocui cu succes oțelurile utilizate în prezent, cu scopul posibilității utilizării unor sarcini mai mari de încărcare în timpul funcționării și al reducerii masei structurii sudate;
- Pe baza tehnologiilor de sudare elaborate în cadrul programului experimental și a rezultatelor obținute se poate lua decizia de aplicare a acestora în cazul utilizării oțelurilor de înaltă rezistență la realizarea structurilor sudate;
- În cazul structurilor sudate, având la bază rezultatele cercetărilor realizate în cadrul tezei de doctorat precum și analiza tehnico-economică se poate lua decizia de înlocuire a vechilor materiale de bază cu oțeluri de înaltă rezistență;
- Examinările nedistructive (OV, LP și US) efectuate asupra probelor sudate (OV, LP și US) nu au scos în evidență defecte care să ducă la excluderea probelor din setul experimental;
- Ținând cont de importanța timpului de răcire $t_{8/5}$, pentru verificarea practică a valorii calculate, cercetările experimentale au scos în evidență posibilitatea măsurării valorii acestuia cu ajutorul termocuplelor de contact dar și cu ajutorul termografierii în infraroșu;
- Valorile durităților probelor sudate nu au depășit valoarea maximă permisă de către standardele în vigoare, valoare la care se evită pericolul de apariție a fisurării la rece, aceasta fiind minimă. Cea mai mare valoare a durității a fost de 391HV_{0,2} și a fost obținută în cazul probei P5, probă sudată cu o valoare a temperaturii de preîncălzire de $T_{pr}=100^{\circ}\text{C}$. În anumite zone ale cusăturii și a ZIT-ului se poate observa o variație a valorilor durității de la 272...291 HV_{0,2}. Valorile reduse sunt cauzate de creșterea granulației pe baza efectului de supraîncălzire. Ținând cont de problemele întâlnite în cazul sudării oțelurilor de înaltă rezistență, se recomandă să se acorde o atenție deosebită alegerii cuplului temperatură preîncălzire-energie liniară. Valori prea mici ale acestora pot duce la supra călirea zonei cordonului de sudură și a ZIT-ului, cu riscul de apariție a unor faze de tip precipitate de carburi, ceea ce implică creșterea durității și creșterea riscului de apariție a fisurării la rece. Utilizarea unor valori mari poate duce la apariția supraîncălzirii cu efect de creștere a granulației și a scăderii proprietăților mecanice;
- În cazul majorității probelor sudate la care s-a utilizat o valoare a temperaturii de preîncălzire de $T_{pr}=100^{\circ}\text{C}$, valorile rezistenței la rupere s-au situat sub limita minimă garantată - $R_{m\ min}=940\text{N/mm}^2$, mai puțin în cazul probei P11 la care valoarea R_m a fost de $R_m=951\text{N/mm}^2$;
- Pentru probele la care valoare temperaturii de preîncălzire a fost de $T_{pr}=100^{\circ}\text{C}$, valorile limitei de curgere ($R_{p0,2}$) se situează sub limita minimă garantată sau apropiate de această limită, mai puțin în cazul probei P11;
- Valorile obținute ale energiei de rupere obținute în urma realizării încercării de încovoierii prin șoc, se situează peste valoarea minimă cerută de către standardele în vigoare pentru materialul S890QL;
- Analiza metalografică efectuată în zonele de interes a probelor sudate (material de bază, zona influențată termic și cordonul de sudură) a scos în evidență faptul că linia de fuziune între materialul de bază și sudură este continuă, fără imperfecțiuni vizibile. Microstructura sudurii prezintă în mod consistent formațiuni dendritice fine, aliniată

pe direcția fluxului termic. În toate probele, ZIT prezintă grăunți grosolani de martensită, asociați cu temperaturile ridicate și răcirea rapidă. În cazul anumitor probe, în ZIT, s-a observat o creștere a dimensiunii grăunților, specifică regiunilor expuse la temperaturi înalte, urmată de răcire. Aceasta este mai pronunțată în zonele de supraîncălzire;

- În cazul modelării câmpului termic la sudare, valorile obținute indică o asemănare destul de mare a distribuției temperaturii și implicit a valorilor $t_{8/5}$. Se observă faptul că valorile $t_{8/5}$ rezultate în urma simulării sunt de $t_{8/5-1} = 7.57$ s și $t_{8/5-2} = 7.58$ s, având o eroare de măsurare de 5,25%, respectiv 5,37%;
- Din analiza comparativă a rezultatelor obținute în urma utilizării MEF rezultă faptul că în cazul utilizării materialului S355ML pentru fabricarea șasiului, tensiunile maxime din timpul funcționării instalației se apropie de limita de curgere a materialului, fapt ce reprezintă un risc de cedare în cazul apariției unor factor perturbatori care să crească accidental solicitările. În cazul utilizării oțelului S890QL, solicitările din timpul funcționării instalației ajung la valori de până la 30% din limita de curgere, fapt care oferă premisele utilizării instalației în condiții de solicitări mai mari sau/și reducerea în continuare a grosimii componentelor. Factorul de siguranță crește în cazul utilizării oțelului S890QL până la valori de peste 2.991, valoare care oferă posibilitatea de încărcare suplimentară a instalației de sudare fără să existe riscul de cedare în exploatare. Deformațiile cauzate de solicitările la care este supus șasiul au valori de maxim 0.946 mm, valori relativ scăzute care nu reprezintă un risc pentru funcționarea instalației de sudare.

7.3. Contribuții personale

Prin prisma obiectivelor propuse, precum și în urma rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale efectuate pe parcursul elaborării tezei de doctorat, contribuțiile personale pot fi sintetizate după cum urmează:

7.3.1. Contribuții teoretice:

- Realizarea unui studiu cu privire la stadiul actual al utilizării oțelurilor de înaltă rezistență în domeniul fabricării structurilor sudate, cu prezentarea clasificării și evoluției acestora, precum și a particularităților specifice ale acestor oțeluri (v. § 1);
- Realizarea unui studiu amplu cu privire la sudabilitatea oțelurilor de înaltă rezistență și prezentarea principalelor probleme întâlnite în cazul acestor oțeluri (v. § 2);

7.3.2. Contribuții experimentale:

- Elaborarea și desfășurarea programului experimental, care cuprinde realizarea celor 12 probe sudate realizate din oțelul S890QL, cu ajutorul procedurii de sudare GMAW robotizat (v. § 3);
- Elaborarea tehnologiilor de sudare, ținând cont de recomandările standardelor în vigoare, dar și de recomandările producătorilor;
- Examinarea nedistructivă a probelor sudate rezultate, cu ajutorul unor operatori calificați (examinarea vizuală, examinarea cu lichide penetrante, examinarea cu ultrasunete);

- Efectuarea încercărilor mecanice în cadrul unor laboratoare certificate, cu scopul determinării caracteristicilor mecanice a fiecărei probe sudate în parte (încercarea la tracțiune, determinarea microdurității, încercarea la încovoiere prin șoc);
- Efectuarea examinărilor microscopice și macroscopice ale îmbinărilor sudate realizate;
- Măsurarea parametrului $t_{8/5}$ și analiza câmpului termic cu ajutorul termocuplelor de contact și a termografierii în infraroșu;
- Realizarea cercetărilor experimentale cu privire la modelarea CFD-MEF în cazul oțelurilor de înaltă rezistență;
- Realizarea unui model 3D experimental al șasiului pentru estimarea tensiunilor și a deformațiilor la sudare;
- Realizarea unui stand experimental pentru testarea ansamblu șasiu fabricat prin sudarea reperelor fabricate din oțelul S890QL;
- Realizarea proceselor verbale de omologare a tehnologiilor de sudare pentru 2 tehnologii de sudare: prima sudare prin transfer short-arc, pentru table cu grosime mai mică de 8 mm, a doua prin transfer spray-arc, pentru table cu grosime mai mare de 12 mm.

7.4. Direcții ulterioare de cercetare

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

- Realizarea prototipului șasiului instalației de sudare prin utilizarea noului oțel de tip S890QL și a tehnologiilor de sudare omologate;
- Reproiectarea șasiului cu scopul micșorării grosimii componentelor ansamblului și a adaptării caracteristicilor dimensionale la noile condiții de funcționare;
- Valorificarea rezultatelor nepublicate prin publicarea acestora în cadrul unor manifestări științifice, conferințe internaționale și reviste de specialitate.

Bibliografie

- [1]. Heavy-duty lightweighting - By SSAB, data publicării articolului, 25 October 2021, <https://www.automotivemanufacturingsolutions.com/voice/heavy-duty-lightweighting/42417.article>. (accesare la 18.06.2023.).
- [2]. ***, SSAB AB, Suedia, High strength steel, <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/strenx> (accesare la 28.10.2023).
- [3]. Javidan, F., Heidarpour, A., Zhao, X.L., Hutchinson, C.R. and Minkkinen, J., Effect of weld on the mechanical properties of high strength and ultra-high strength steel tubes in fabricated hybrid sections. *Engineering Structures*, 118, pp.16-27. 2016.
- [4]. Haslberger, P., Holly, S., Ernst, W. et al. Microstructure and mechanical properties of high-strength steel welding consumables with a minimum yield strength of 1100 MPa. *J Mater Sci* 53, 6968–6979. 2018.
- [5]. Tümer, M., Schneider-Bröskamp, C. and Enzinger, N., Fusion welding of ultra-high strength structural steels—A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 82, pp.203-229. 2022.
- [6]. Amraei, M., Dabiri, M., Björk, T. and Skriko, T., Effects of workshop fabrication processes on the deformation capacity of S960 ultra-high strength steel. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(12), p.121007. 2016.
- [7]. Guo, W., Crowther, D., Francis, J.A., Thompson, A., Liu, Z. and Li, L., Microstructure and mechanical properties of laser welded S960 high strength steel. *Materials & Design*, 85, pp.534-548. 2015.

- [8]. Stadler, M., Schnitzer, R., Gruber, M., Steineder, K. and Hofer, C., Influence of the Cooling Time on the Microstructural Evolution and Mechanical Performance of a Double Pulse Resistance Spot Welded Medium-Mn Steel by Metals. 11(2), 270. 2021.
- [9]. Siar, O., Benlatreche, Y., Dupuy, T., Dancette, S. and Fabrègue, D., Effect of severe welding conditions on liquid metal embrittlement of a 3rd-generation advanced high-strength steel. Metals, 10(9), p.1166. 2020.
- [10]. Gáspár, M. and Balogh, A., GMAW experiments for advanced (Q+ T) high strength steels. Production Processes and Systems, 6(1), pp.9-24, 2013.
- [11]. Enzinger, N., Cerjak, H., Böllinghaus, T., Dorsch, T., Saarinen, K. and Roos, E., November. Properties of high strength steel s890 in dry and aqueous environments. In 1st. Int. Conf. Super-High Strength Steels. 2005.
- [12]. Cerjak, H.H., Enzinger, N., Greiner, R. and Zenz, G., High Strength Steels for Hydropower Plants Design Concepts-Pressure Conduits. Verlag der Technischen Universität Graz. 2013.
- [13]. Schröter, F. and Schütz, W., 2005. State of art in the production and use of high-strength heavy plates for hydropower applications. Proceedings of the High Strength Steel for Hydropower Plants, Graz, Austria, pp.5-6.
- [14]. ***, www.esab.com, ESAB (Washington DC, USA)
- [15]. ***, AG der Dillinger Hüttenwerke, Germania, <https://en.dillinger.de/products/downloads/> (accesare la 18.10.2022).
- [16]. ***, Thyssenkrupp AG, Germania, <https://www.thyssenkrupp-steel.com/en/publications.html/> (accesare la 18.06.2022).
- [17]. David et al. "Weldable high-strength steels: Challenges and engineering applications." 2015.
- [18]. ***, SR CEN ISO/TR 15608:2017 - Sudare. Ghid pentru un sistem de grupare a materialelor metalice
- [19]. ***, SR EN 10025-3:2019 - Produse laminate la cald din oțeluri de construcții. Partea 3: Condiții tehnice de livrare pentru oțeluri de construcții sudabile cu granulație fină în stare normalizată/laminare normalizantă
- [20]. ***, SR EN 10025-4+A1:2023 - Produse laminate la cald din oțeluri de construcții. Partea 4: Condiții tehnice de livrare pentru oțeluri de construcții sudabile cu granulație fină obținute prin laminare termomecanică
- [21]. SR EN 10025-6+A1:2023 - Produse laminate la cald din oțeluri de construcții. Partea 6: Condiții tehnice de livrare pentru produse plate din oțeluri cu limită de curgere ridicată în stare călită și revenită.
- [22]. Lehnert, T. and Schröter, F., How Modern Steel Developments Can Help Optimizing Cost and Sustainability of Bridge Constructions. Dillinger Hütte. 2014.
- [23]. Micloși, V., Tratamente termice conexe sudării prin topire a oțelurilor Vol.I, Timișoara, Sudura, 2003 2 vol., ISBN 973-8359-10-4, Vol. 1 – Bibliogr. – ISBN 973-8359-11-2. 2003
- [24]. Micloși, V., Tratamente termice conexe sudării prin topire a oțelurilor Vol.II, Timișoara, Sudura, 2004 2 vol., ISBN 973-8359-10-4, Vol. 3 – Bibliogr. – ISBN 973-8359-12-0. 2004
- [25]. Bodea, M., "Sudura și procedee conexe", Editura UTCLUJ, ISBN 978-606-737-143-7, 2016.
- [26]. ***, <https://www.totalmateria.com/en-us/articles/thermo-mechanical-control-process/> pdf (accesare la 12.11.2023).
- [27]. Patel, J., Introduction to high strength structural steels, International Metallurgy Ltd. 2021.
- [28]. I.Voiculescu, C.Rontescu, I.L.Dondea. Metalografia îmbinărilor sudate. Editura SUDURA, ISBN 978-973-8359-58-1, 2010
- [29]. ***, www.schmitz-metallographie.de (accesare la 29.10.2023).
- [30]. Lehto, P., Remes, H., Saukkonen, T., Hänninen, H. and Romanoff, J., Influence of grain size distribution on the Hall–Petch relationship of welded structural steel. Materials Science and Engineering: A, 592, pp.28-39.. ISSN, 2014.
- [31]. Herion, S. and Scherf, S., High Strength Steels for Low Temperature Structural Applications. In Proc 8th Int Conf on Advances in Steel Structures. 2018.
- [32]. ***, Aachen University, ISF - Welding and Joining Institute, 2005.

- [33]. ***, SR EN 10149-2:2014 - Produse plate laminate la cald din oțeluri cu limită de curgere ridicată pentru deformare la rece. Partea 2: Condiții tehnice de livrare pentru oțeluri obținute prin laminare termomecanică
- [34]. Mohrbacher, H., Metallurgical concepts for optimized processing and properties of carburizing steel. *Advances in Manufacturing*, 4(2), pp.105-114. 2016.
- [35]. Mohrbacher, H., Property optimization in as-quenched martensitic steel by molybdenum and niobium alloying. *Metals*, 8(4), p.234. 2018.
- [36]. ***, Voestalpine Grobblech GmbH, Linz, Austria, High strength and ultra high strength Thermomechanically Rolled fine-grained steels, Rolled fine-grained steels, Technical terms of delivery for heavy plates, Alform, 1 January, 2024.
- [37]. ***, Lori Jo Vest |AHSS Guidelines Version 7.0, Jun 29, 2021, disponibilă online la <https://www.worldautosteel.org/>, (accesare la 28.10.2023).
- [38]. ***, SEW 088 : 2017 - Weldable non-alloy and low-alloy steels - recommendations for processing, in particular for fusion welding.
- [39]. ***, SR EN 1011-1:2009 - Sudare. Recomandări pentru sudarea materialelor. Partea 1: Ghid general pentru sudarea cu arc electric
- [40]. ***, SR EN 1011-2: 2002/A1:2004 - Sudare. Recomandări pentru sudarea materialelor metalice. Partea 2: Sudarea cu arc electric a oțelurilor feritice
- [41]. Wongpanya, P., Boellinghaus, T., Lothongkum, G. and Kannengiesser, T., Effects of preheating and interpass temperature on stresses in S 1100 QL multi-pass butt-welds. *Welding in the World*, 52, pp.79-92. 2008.
- [42]. Dehelean, D. Sudarea prin topire, Editura Sudura, Timișoara, ISBN 973-98049-1-8. 1997.
- [43]. ***, Air Liquide Welding Cranes & Heavy Lifting Equipment, https://www.airliquide.com/sites/airliquide.com/files/th_cranes_and_heavy_lifting_w000370267_en.pdf (accesare la 28.10.2023).
- [44]. S. Kou, *Welding Metallurgy*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [45]. Padhy, G.K. and Komizo, Y.I., Diffusible hydrogen in steel weldments: A status review. *Transactions of JWRI*, 42(1), pp.39-62. 2013.
- [46]. Granjon, H., Cold cracking in the welding of steels. *Indian Welding Journal*, pp.43-53. 1973.
- [47]. C.Rontescu, G. Iacobescu, D.T. Cicic, Sudarea prin topire, Vol. III, Editura Bren, ISBN 978-606-610-250-6, 2020.
- [48]. Manivelmuralidaran, V., Sakthivel, M. and Balaji, M., Cold Crack Susceptibility studies on high strength low alloy steel 950A using tekken test. *J Adv Chem*, (3), pp.25-31. 2017.
- [49]. Hong, K.A.N.G., Mingshan, F.A.N.G., Dongmei, J.I.A., Xueyi, F.U., Yurong, L.I.U., Lizhen, W.A.N.G. and Xiaofeng, Z.H.A.O., Effect of Heat input on Microstructure and Properties of Heat Affected Zone in 890 MPa Welded Tube for Crane Boom Service. *STEEL PIPE*, 53(2), pp.74-78. 2024.
- [50]. Magudeeswaran, G., Balasubramanian, V. and Reddy, G.M., Hydrogen induced cold cracking studies on armour grade high strength, quenched and tempered steel weldments. *International journal of hydrogen energy*, 33(7), pp.1897-1908. 2008.
- [51]. Gáspár, M., Effect of welding heat input on simulated HAZ areas in S960QL high strength steel. *Metals*, 9(11), p.1226. 2019.
- [52]. ***, SR EN ISO 15614-1:2017/A1:2019 - Specificația și calificarea procedurilor de sudare pentru materiale metalice. Verificarea procedurii de sudare în vederea calificării. Partea 1: Sudarea cu arc electric și sudarea cu gaze a oțelurilor și sudarea cu arc electric a nichelului și a aliajelor de nichel. Amendament 1.
- [53]. Brezova, E., Masiar, H. and Radic, P., „Welding of high strength materials used in the manufacture special equipment”. *University Review*, 8(3-4), pp.51-61. 2014.
- [54]. C. Rontescu, G. Iacobescu, Sudarea prin topire, Vol. I, Editura Bren, Cod CNC SIS 96, ISBN 978-606-610-190-5, 2016.
- [55]. Yang, D.X., Wang, X.H., Liu, Z.Y. and Sun, Y.F., Study on SH-CCT Diagram and Weldability of S890 Steel. *Advanced Materials Research*, 415, pp.865-868. 2012.
- [56]. Peltonen, M., Weldability of high-strength steels using conventional welding methods, 2014.

- [57]. Klein, M., Spindler, H., Luger, A., Rauch, R., Stiaszny P., and Eigelsberger, P. M., "Thermomechanically hot rolled high and ultra high strength steel grades-processing, properties and application., Materials Science Forum, 500-501, pp. 543-550. 2005.
- [58]. Honeycomb, R. W. K., and Bhadeshia, H. K. D. H., Steels - microstructure and properties, Second Ed., London: Edward Arnold. 1995.
- [59]. Mohrbacher, H., Principal effects of Mo in HSLA steels and cross effects with microalloying elements. Central Iron and Steel Research Institute (CISRI), pp.75-96. 2010.
- [60]. Guillala, A., Abdelbakib, N., Gaceba, M. and Bettayeba, M., Effects of martensite-austenite constituents on mechanical properties of heat affected zone in high strength pipeline steels-review. Chem. Eng, 70, pp.583-588. 2018.
- [61]. ***, ANTERA STEEL S.R.L. 2016, <https://www.anterasteel.ro/ElementeAliere.aspx> (accesare la 18.06.2022).
- [62]. ***, Weld Magazine, https://sites.ualberta.ca/~ccwj/Assets/Teaching/MATE481/HRD_Prediction_of_Hardness/Supplemental_Material/hintze19_hardness_models_steel.pdf (accesare la 12.11.2023).
- [63]. Górka, J., Janicki, D., Fidali, M. and Jamrozik, W., Thermographic assessment of the HAZ properties and structure of thermomechanically treated steel. International Journal of Thermophysics, 38, pp.1-21. 2017.
- [64]. Węglowski, M.S. and Zeman, M., Prevention of cold cracking in ultra-high strength steel Weldox 1300. Archives of Civil and Mechanical engineering, 14(3), pp.417-424. 2014.
- [65]. Dobosy, Á. and Lukács, J., The effect of the welding parameters on the properties of thermomechanically rolled high strength steels. In Proceedings of the MultiScience—XXX, microCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolc, Hungary (pp. 21-22), ISBN 978-963-358-113-1, April 2016.
- [66]. Cicic, D.T., Rontescu, C., Bogatu, A.M. and Petriceanu, C.S., August. Research regarding the influence of the preheating temperature on the welding dilution. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 400, No. 2, p. 022015). IOP Publishing. 2018.
- [67].). Schaupp, T., Ernst, W., Spindler, H. and Kannengiesser, T., Hydrogen-assisted cracking of GMA welded 960 MPa grade high-strength steels. International journal of hydrogen energy, 45(38), pp.20080-20093. 2020.
- [68]. ***, <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-alloy-steels-irons/structural-steels-TMCP.php> (accesare la 18.09.2022)
- [69]. Rontescu, C., Voiculescu, I., Iacobescu, G. and Cicic, D.T., Influence of the parameters preheating temperature and linear energy on the micrographic and macrographic characteristics of welded joints, UPB Sci. Bull., Series D, 71(2). 2009.
- [70]. Celin, R., Berneti, J., Anica, D., Balanti, S., Welding of the steel grade S890QL, Materials and technology, 48, pp. 931-935, ISSN 1580-2949. 2014.
- [71]. Liu, X., Chung, K.F., Ho, H.C., Xiao, M., Hou, Z.X. and Nethercot, D.A., Mechanical behavior of high strength S690-QT steel welded sections with various heat input energy. Engineering Structures, 175, pp.245-256. 2018.
- [72]. Bodea, M., December. New weldability model based on the welding parameters and hardness profile. In Powder Metallurgy and Advanced Materials. Materials Research Forum LLC (pp. 115-124). 2018.
- [73]. Liu, T.Y., Qiu, X.B., Lu, Z.Y. and Dong, L.M., Estimation of cooling rate from 800 C to 500 C in the welding of intermediate thickness plates based on FEM simulation. Journal of Materials Science and Engineering B, 7(6), pp.258-267. 2017.
- [74]. Kou, S., Welding metallurgy, New York: John Wiley & Sons, Inc. 1987.
- [75]. American Welding Society, AWS, : Welding Hand Book, Miami: American Welding Society. 1981.
- [76]. Terasaki, T. and Gooch, T. G., "Prediction of cooling time for ferrite-austenite. 1995.
- [77]. Fiedler, M., Plozner, A., Rutzinger, B. and Scherleitner, W., Control of mechanical properties of high strength steels through optimized welding processes. Biul Inst Spawalnictwa, 5, pp.31-37. 2016.

- [78]. Gyasi, E.A. and Kah, P., Structural integrity analysis of the usability of high strength steels (HSS). *Reviews on Advanced Materials Science*, 46(1). 2016.
- [79]. Arora, A., Roy, G.G. and DebRoy, T., Cooling rate in 800 to 500 C range from dimensional analysis. *Science and Technology of Welding and Joining*, 15(5), pp.423-427. 2010.
- [80]. Mičian, M., Frátrik, M., Trško, L., Gucwa, M., Winczek, J. and Skroński, Ł., Butt welding of thin sheets of S960MC steel. *Welding Technology Review*, 93. 2021.
- [81]. ***, AWS A3.0M/A3.0:2020, An American National Standard, Standard Welding Terms and Definitions, Including Terms for Adhesive Bonding, Brazing, Soldering, Thermal Cutting, and Thermal Spraying, 13th Edition. 2020.
- [82]. ***, SR EN ISO 4063:2023 - Sudare, lipire tare, lipire moale și tăiere. Nomenclatorul procedeeilor și numere de referință
- [83]. Coman, M.N., Rontescu, C., Bogatu, A.M., Cicic, D.T. and Florea, A., Industry 4.0 in welding processes in the automotive industry. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability No 2/ 2023*. Editura "Academica Brâncuși", Târgu Jiu, ISSN 1844 – 640X. 2023.
- [84]. Coman, M.N., Rontescu, C., Bogatu, A.M., Cicic, D.T., Pîrvu, V., Implementation of robot welding in the context of Industry 4.0 development, *Modtech 2023*.
- [85]. Ślęzak, T., Characteristics of MAG Welded Joints Made in Fine-Grained High-Strength Steel S960QL. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, 62(6), pp.45-53. 2018.
- [86]. Keränen, L., Pylvänäinen, M., Kaijalainen, A., Jokiaho, T., Tulonen, J., Hyvärinen, A., Vippola, M. and Kurvinen, E., Residual stresses of MAG-welded ultrahigh-strength steel rectangular hollow sections. *Engineering Structures*, 305, p.117719. 2024.
- [87]. Mičian, M., Harmaniak, D., Nový, F., Winczek, J., Moravec, J. and Trško, L., Effect of the t 8/5 Cooling Time on the Properties of S960MC Steel in the HAZ of Welded Joints Evaluated by Thermal Physical Simulation. *Metals*, 10(2), p.229. 2020, 10, 229.
- [88]. Ismar, H., Burzi, Z., Kapor, N.J. and Kokelj, T., Experimental Investigation of High-Strength Structural Steel Welds. *Journal of Mechanical Engineering/Strojniški Vestnik*, 58(6). 2012.
- [89]. Lazic, V., Arsić, D., Aleksandrovic, S., Nikolic, R., Djordjevic, M. and Hadzima, B., Experimental investigations of the high-strength steel welded samples. 978-80-89296-21-7. 2017.
- [90]. Mert, T., Gürol, U. and Tümer, M., The effect of heat input in multi-pass GMAW of S960QL UHSS based on weaving and stringer bead procedure on microstructure and mechanical properties of HAZ. *Materials Research Express*, 10(8), p.086507. 2023.
- [91]. Mert, T., Gürol, U. and Tümer, M., The effect of weaving and non-weaving multi-pass procedure on microstructure and mechanical properties in GMAW of S960QL. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 129(9), pp.4731-4742. 2023.
- [92]. Liu, Z., Li, X., Pan, L., Gao, J. and Zhang, K., Effects of weld penetration modes on laser welding characteristics of a novel ultra-high strength steel for aerospace application. *Journal of Manufacturing Processes*, 90, pp.111-124. 2023.
- [93]. Kahn mouei, J.T. and Moallem, M., Advancements in control systems and integration of artificial intelligence in welding robots: A review. *Ocean Engineering*, 312, p.119294. 2024.
- [94]. Bayock, F.N., Kah, P., Mvola, B. and Layus, P., Experimental review of thermal analysis of dissimilar welds of High-Strength Steel. *Reviews on Advanced Materials Science*, 58(1), pp.38-49. 2019.
- [95]. Chen, C., Chiew, S.P., Zhao, M.S., Lee, C.K. and Fung, T.C., Welding effect on tensile strength of grade S690Q steel butt joint. *Journal of Constructional Steel Research*, 153, pp.153-168. 2019.
- [96]. Chiew, S.P., Cheng, C., Zhao, M.S., Lee, C.K. and Fung, T.C., Experimental study of welding effect on S690Q high strength steel butt joints. *ce/papers*, 3(3-4), pp.701-706. 2019.
- [97]. Rontescu, C., Cicic, D.T., Iacobescu, G. and Amza, G.C., The influence of the welding current polarity on the geometric configuration of the bead. *Advanced Materials Research*, 1088, pp.797-801. 2015.
- [98]. Rontescu, C., Iacobescu, G., *Sudarea prin topire*, Vol.II, Editura Bren, ISBN 978-606-610-225-4, 2019.
- [99]. Tarn T.J. et al., *Robotic Welding, Intelligence and Automation*, LNEE, 88, pp. 369-374, 2011.

- [100]. Muñoz, M.Á.Z., Escoto, P.A.O. and Gordillo, G.B., June. Automated MIG Welding Application: An Industrial Case Study. In International Conference on Machine and Industrial Design in Mechanical Engineering (pp. 627-635). Cham: Springer International Publishing. 2021.
- [101]. Kah, P. and Martikainen, J., Current trends in welding processes and materials: improve in effectiveness. *Rev. adv. mater. Sci*, 30(2), pp.189-200. 2012.
- [102]. Voiculescu, I., Geanta, V., Rusu, C.C., Mircea, O., Mistodie, L.R. and Scutelnicu, E., Research on the Metallurgical Behaviour of X70 Steel subjected to Multi-Wire Submerged Arc Welding. *Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII, Welding Equipment and Technology*, 27, pp.38-46. 2016.
- [103]. Scutelnicu, E., Rusu, C.C., Georgescu, B., Mircea, O. and Bormambet, M., Mechanical behaviour of welded joints achieved by multi-wire submerged arc welding. *Advanced Materials Research*, 1143, pp.52-57. 2017.
- [104]. Puchianu, M., Florea, A., Solomon, G., Duma, I. and Pascu, G., studies regarding submerged arc welding of duplex stainless steel in shipbuilding industry. *U.P.B. Sci. Bull., Series D*, Vol. 85, Iss. 3, ISSN 1454-2358. 2023.
- [105]. Kah, P., Layus, P. and Ndiwe, B., Submerged arc welding process peculiarities in application for Arctic structures. *AIMS Materials Science*, 9(3), pp.498-511. 2021.
- [106]. Layus, P., Usability of the submerged arc welding (SAW) process for thick high strength steel plates for Arctic shipbuilding applications. 2017.
- [107]. Layus P, Kah P, Gezha V. Advanced submerged arc welding processes for Arctic structures and ice-going vessels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2018.
- [108]. Layus, P., Kah, P., Kesse, M. and Gyasi, E., June. Submerged Arc Welding Process Productivity in Welding Thick High Strength Steel Plates Used for Arctic Applications. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (pp. ISOPE-I). ISOPE. 2017.
- [109]. Cicic, D.T., Rontescu, C., Amza, C.G. and Chivu, O.R., The combined effect of chemical elements on the properties of a layer deposited by welding. *Rev. Chim.(Bucharest)*, 66(9), pp.1299-1301. 2015.
- [110]. Sahoo, A. and Tripathy, S., Development in plasma arc welding process: a review. *Materials Today: Proceedings*, 41, pp.363-368. 2021.
- [111]. Wu, C.S., Wang, L., Ren, W.J. and Zhang, X.Y., Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling. *Journal of manufacturing processes*, 16(1), pp.74-85. 2014.
- [112]. Tashiro, S., Interaction mechanism of arc, keyhole, and weld pool in keyhole plasma arc welding: a review. *Materials*, 17(6), p.1348. 2024.
- [113]. ***, Ionix Oy, Finlanda, <https://www.ionix.fi/en/technologies/laser-processing/hybrid-laser-welding/> (accesare la 28.10.2023).
- [114]. ***, CLOOS GmbH, Germania, <https://www.cloos.de/de-en/processes/details/laser-hybrid-weld/> (accesare la 28.10.2023).
- [115]. ***, Fronius International GmbH, Austria, <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-high-performance/laserhybrid/laserhybrid> (accesare la 28.10.2023).
- [116]. Lahdo, R., Seffer, O., Springer, A., Kaierle, S. and Overmeyer, L., GMA-laser hybrid welding of high-strength fine-grain structural steel with an inductive preheating. *Physics Procedia*, 56, pp.637-645. 2014.
- [117]. Sisodia, R.P.S. and Gáspár, M., An approach to assessing S960QL steel welded joints using EBW and GMAW. *Metals*, 12(4), p.678. 2022.
- [118]. Tümer, M., Domitner, J. and Enzinger, N., Electron beam and metal active gas welding of ultra-high-strength steel S1100MC: influence of heat input. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp.1-12. 2022.
- [119]. Błacha, S., Węglowski, M.S., Dymek, S. and Kopyściański, M., Microstructural and mechanical characterization of electron beam welded joints of high strength S960QL and Weldox 1300 steel grades. *Archives of Metallurgy and Materials*, 62. 2017

- [120]. ***, SR EN ISO 17637:2017 - Examinări nedistructive ale sudurilor. Examinarea vizuală a îmbinărilor sudate prin topire
- [121]. ***, SR EN ISO 23277:2015 - Examinări nedistructive ale sudurilor. Examinarea cu lichide penetrante a sudurilor. Niveluri de acceptare
- [122]. ***, SR EN ISO 3452-1:2021 - Examinări nedistructive. Examinare cu lichide penetrante. Partea 1: Principii generale
- [123]. ***, SR EN ISO 3452-4:2002 - Examinări nedistructive. Examinări cu lichide penetrante. Partea 4: Echipament
- [124]. ***, SR EN ISO 5817:2023 - Sudare. Îmbinări sudate prin topire din oțel, nichel, titan și aliajele acestora (cu excepția sudării cu fascicule de energie). Niveluri de calitate pentru imperfecțiuni.
- [125]. ***, SR EN ISO 17640:2019 - Examinări nedistructive ale îmbinărilor sudate. Examinare cu ultrasunete. Tehnici, niveluri de examinare și evaluare
- [126]. ***, <https://www.tcontrol.ro/ultrasunete/UTTransducers/>. (accesare la 18.06.2021).
- [127]. ***, SR EN 10027-1:2017 - Sisteme de simbolizare a oțelurilor. Partea 1: Simbolizarea alfanumerică.
- [128]. ***, Certificatul de calitate al materialului de bază. (Așașat la Anexa 1).
- [129]. Zgură, Gh., Iacobescu G., Rontescu C., Cicic D.T. - Tehnologia sudării prin topire, Editura Politehnica Press , București, 2007.
- [130]. ***, SR EN 10204:2005 - Produse metalice. Tipuri de documente de inspecție
- [131]. Gorni, A.A., Steel forming and heat treating handbook. São Vicente, Brazil, 24. 2011.
- [132]. ***, SR EN ISO 16834:2012 - Materiale consumabile pentru sudare. Sârme electrod, sârme vergele și depuneri prin sudare pentru sudarea cu arc electric în mediu de gaz protector a oțelurilor cu limită de curgere ridicată. Clasificare
- [133]. ***, Certificatul de calitate al materialului de adaos. (Așașat la Anexa 2).
- [134]. ***, Dillinger Hütte GTS: Dillimax Technical Information No. III/2007, p. 25.
- [135]. ***, SR EN ISO 15613:2004 - Specificația și calificarea procedurilor de sudare pentru materiale metalice. Calificarea bazată pe o încercare de sudare înainte de fabricație
- [136]. **Florea, A.**, Rontescu, C., Bogatu, A.M., Cicic, D.T., Coman M.N., Research regarding the measurement possibilities of the thermal cycle in welding, *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability* No 2/ 2023. Editura “Academica Brâncuși”, Târgu Jiu, ISSN 1844 – 640X. 2023.
- [137]. Gh. Solomon, D.T. Cicic, Teotia proceselor de sudare Vol.I, Vol.II, Editura Bren, 2010.2301-2318, Bariloche, 2004
- [138]. Micloși, V., Bazele proceselor de sudare, EDP, București, 1982.
- [139]. SR EN ISO 9692-1:2014 - Sudare și procedee conexe. Tipuri de pregătire a îmbinării. Partea 1: Sudare manuală cu arc electric cu electrod învelit, sudare cu arc electric cu electrod fuzibil în mediu de gaz protector, sudare cu gaze, sudare WIG și sudare cu fascicule de energie a oțelurilor.
- [140]. ***, SR EN ISO 14175:2008 - Materiale consumabile pentru sudare. Gaze și amestecuri de gaze pentru sudarea prin topire și procedee conexe.
- [141]. Unnikrishnakurup, S., Krishnamurthy, C.V. and Balasubramaniam, K., Monitoring TIG welding using infrared thermography—simulations and experiments. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 92, pp.1-18. 2016.
- [142]. Rontescu, C., Voiculescu, I., Iacobescu, G., Dumitrascu, C. and Cicic, D.T., Analysis of the thermal field for TIG welding by using infrared thermography. *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, 70(3), pp.55-60. 2008.
- [143]. Stăncioiu, A., Releasing the welded parts through thermal treatments, *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability* No 1/ 2023.
- [144]. Bermejo, V.M.A., Hurtig, K., Hosseini, V.A., Karlsson, L. and Svensson, L.E., October. Monitoring thermal cycles in multi-pass welding. In *Proceedings of the 7th International Swedish Production Symposium (SPS-16), Lund, Sweden* (pp. 25-27). 2016.

- [145]. X.F Liu, C.B. Jia, C.S. Wua, G.K. Zhang; J.Q Gao, Measurement of the keyhole entrance and topside weld pool geometries in keyhole plasma arc welding with dual CCD cameras, J. Mater. Process. Technol. 248, 2017, pp.39-48.
- [146]. Pinto-Lopera J.E., J.M.S.T. Motta, S.C.A. Alfaro, Real-Time Measurement of Width and Height of Weld Beads in GMAW Processes, Sensors 2016, 16, pp.1-14.
- [147]. B. Silwal, M. E. Santangelo, Effect of vibration and hot-wire gas tungsten arc (GTA) on the geometric shape, J. Mater. Process. Technol., 251, pp. 138-145. 2018.
- [148]. Lahtinen, T., Vilaça, P., Peura, P., Mehtonen, S. MAG Welding Tests of Modern High Strength Steels with Minimum Yield Strength of 700 MPa. Appl. Sci. 2019.
- [149]. **Florea, A.**, Petriceanu, S.C., Rontescu, C., Bogatu, A.M., Cicic, D.T., Thermal field measurement during welding using infrared thermography, University Politehnica of Bucharest Scientific bulletin series B-chemistry and materials science, Volume85, Issue3, Page167-178, 2023.
- [150]. ***, SR EN ISO 6520-1:2007 - Sudare și procedee conexe. Clasificarea imperfecțiunilor geometrice din îmbinările sudate ale materialelor metalice. Partea 1: Sudare prin topire.
- [151]. ***, SR EN ISO 17635:2017 - Examinări nedistructive ale sudurilor. Reguli generale pentru materiale metalice.
- [152]. ***, SR EN ISO 9712:2022 - Examinări nedistructive. Calificarea și certificarea personalului pentru examinări nedistructive
- [153]. ***, SR EN ISO 3059:2013 - Examinări nedistructive. Examinarea cu lichide penetrante și cu pulberi magnetice. Condiții de observare
- [154]. ***, SR EN ISO 11666:2018 - Examinări nedistructive ale sudurilor. Examinare cu ultrasunete. Niveluri de acceptare
- [155]. **Florea, A.**, Rontescu, C., Bogatu, A.M., Cicic, D.T., Assessment of the hardness of S890QL material welded joints. 2024.
- [156]. ***, SR EN ISO 6507-1:2023 - Materiale metalice. Încercarea de duritate Vickers. Partea 1: Metodă de încercare
- [157]. ***, SR EN ISO 9015-1:2011 - Încercări distructive ale îmbinărilor sudate din materiale metalice. Încercarea de duritate. Partea 1: Încercarea de duritate a îmbinărilor sudate cu arc electric
- [158]. ***, SR EN ISO 9015-2:2016 - Încercări distructive ale îmbinărilor sudate din materiale metalice. Încercarea de duritate. Partea 2: Încercarea de microduritate a îmbinărilor sudate
- [159]. Python Software Foundation, 2024. Python 3.12. Disponibil la: <https://www.python.org> (Accesat 17.10.2024).
- [160]. Plotly, 2024. Plotly Library. Disponibil la: <https://plotly.com/python/> (Accesat 17.10.2024).
- [161]. ***, SR EN ISO 4136:2022 - Încercări distructive ale sudurilor din materiale metalice. Încercarea la tracțiune transversală
- [162]. ***, SR EN ISO 6892-1:2020 - Materiale metalice – Încercarea la tracțiune – Partea 1: Metodă de încercare la temperatura ambiantă
- [163]. ***, SR EN ISO 148-1:2017 - Materiale metalice. Încercarea de încovoiere prin șoc pe epruveta Charpy. Partea 1: Metodă de încercare
- [164]. ***, SR EN ISO 9016:2022 - Încercări distructive ale îmbinărilor sudate din materiale metalice. Încercare la încovoiere prin șoc. Poziție a epruvetei, orientare a creștăturii și examinare
- [165]. ***, SR EN ISO 17639:2022 - Încercări distructive ale îmbinărilor sudate din materiale metalice. Examinarea macroscopică și microscopică a îmbinărilor sudate
- [166]. ***, SR EN ISO 643:2020 - Oțeluri. Determinarea micrografică a mărimii aparente a grăuntelui
- [167]. Florin BODE, Simularea numerică a proceselor de transfer termic, UTPRESS Cluj-Napoca, 2021
- [168]. ***, Simcenter 3D – Capabilități extinse de editare a geometriei și simulare, <https://www.digitaltwin.ro/produse-siemens-plm/simcenter-3d/> (accesare la 18.06.2021).