



**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**Universitatea POLITEHNICA din București**  
**Școala Doctorală de**  
**Inginerie Industrială și Robotică**

**Bogdan-Marian P. VERDETE**

**TEZĂ DE DOCTORAT**

*Conducător științific*

**Prof.univ.dr.ing. Cristina PUPĂZĂ**

**- 2023-**





**MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII**  
**Universitatea POLITEHNICA din București**  
**Școala Doctorală de**  
**Inginerie Industrială și Robotică**

**Bogdan-Marian P. VERDETE**

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**Influența parametrilor regimului de sudare  
asupra transferului de căldură la depunerea  
de material prin sudare robotizată**

## **REZUMAT**

***Conducător științific***

**Prof.univ.dr.ing. Cristina PUPĂZĂ**

**- 2023 -**



# **Universitatea POLITEHNICA din București**

**Decizie CSUD UPB nr. 1051 din 10.07.2023**

**Bogdan-Marian P. VERDETE**

## **TEZĂ DE DOCTORAT**

**Influența parametrilor regimului de sudare asupra transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată**

**The influence of the welding parameters on the heat transfer that occurs during the robotic surfacing weld processes**

### **COMISIA DE DOCTORAT**

Președinte	Prof.univ.dr.ing. Miron ZAPCIU	Universitatea POLITEHNICA din București
Conducător științific	Prof.univ.dr.ing. Cristina PUPĂZĂ	
Referent	Prof.univ.dr.ing. Sever-Gabriel RACZ	Universitatea "Lucian Blaga" din Sibiu
Referent	Prof.univ.dr.ing. Ionel STAREȚU	Universitatea Transilvania din Brașov
Referent	Prof.univ.dr.ing. Cătălin Gheorghe AMZA	Universitatea POLITEHNICA din București

## Cuprins

Contextul cercetărilor .....	3	7
Listă de abrevieri și simboluri.....	5	9
<i>Partea I. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul depunerii de material prin sudare robotizată.....</i>	7	11
<i>Capitolul 1. Considerente tehnologice.....</i>	7	13
1.1. Introducere în sudarea robotizată.....	7	13
<i>Capitolul 2. Tendințe actuale în domeniul sudării robotizate.....</i>	8	25
2.1. Concluzii referitoare la stadiul actual al cercetărilor în domeniul depunerii de material prin sudare.....	8	44
<i>Partea a II - a. Contribuții privind dezvoltarea unui model de simulare al transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată.....</i>	10	51
<i>Capitolul 3. Modelarea CFD-MEF a transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată .....</i>	10	53
3.1. Etape de modelare .....	10	53
3.2. Obiective.....	11	54
3.3. Echipamentul experimental utilizat în cadrul cercetărilor .....	11	54
3.4. Analiza CFD a curgerii gazului de protecție.....	15	63
3.5. Analiza termică în regim tranzitoriu.....	20	74
3.6. Concluzii.....	24	80
<i>Capitolul 4. Influența variației debitului de gaz asupra transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată .....</i>	24	83
4.1. Introducere .....	24	83
4.2. Obiective.....	25	84
4.3. Cercetări experimentale privind influența variației debitului de gaz asupra transferului de căldură .....	25	84
4.4. Parametrizarea modelului de simulare.....	27	90
4.5. Utilizarea sistemelor de ordinul I.....	30	95
4.6. Verificarea abordării propuse.....	36	103
4.7. Concluzii.....	38	107
<i>Capitolul 5. Influența variației debitului de gaz asupra macrostructurii și microstructurii reperelor la depunerea de material prin sudare robotizată .....</i>	38	109

UPB	Teză de doctorat	Influența parametrilor regimului de sudare asupra transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată	Bogdan-Marian P. VERDETE
5.1.	Introducere.....		38 109
5.2.	Analiza vizuală a cordonului de sudură .....		39 110
5.3.	Analiza microscopică a sudurilor în secțiune transversală .....		43 123
5.4.	Diluțiile și Ariile rosturilor în secțiune pentru fiecare regim de sudare .....		46 131
5.5.	Corelarea parametrilor geometrici, a defectelor microstructurale și a diluției cu coeficienții de corecție ai sistemului dinamic.....		52 137
5.6.	Concluzii.....		50 143
	<i>Capitolul 6. Concluzii.....</i>		<i>53</i>
6.1.	Concluzii generale.....		53 147
6.2.	Contribuții originale ale tezei de doctorat.....		60
6.3.	Direcții de continuare a cercetărilor.....		61
	Bibliografie selectivă.....		62 159

## Contextul cercetărilor

Sudarea robotizată este esențială în industria actuală datorită beneficiilor pe care le aduce. Prin integrarea roboților industriali în procesele de sudare, se obține eficiență și productivitate sporite. Acest fapt se datorează vitezei și preciziei de lucru superioare. Calitatea produselor finite devine consistentă, fiind eliminate erorile cauzate de operatorii umani. De asemenea, se asigură siguranța în exploatare, prin reducerea riscurilor asociate tehnologiilor de sudare. Sudarea robotizată contribuie la reducerea costurilor pe termen lung, prin minimizarea pierderilor de materiale. Aceasta oferă flexibilitate și adaptabilitate, putând fi programată pentru diferite tipuri de reperi și tehnologii. Prin reducerea dependenței factorului de decizie uman, sudarea robotizată asigură stabilitate și continuitate în procesele de producție, indiferent de fluctuațiile pieței.

Depunerea de material prin sudare robotizată este importantă în industrie deoarece facilitează repararea rapidă a pieselor sau componentelor uzate sau deteriorate, prelungind astfel durata de viață a acestora și evitând costurile ridicate asociate cu înlocuirea completă.

Analiza termică a proceselor de depunere de materialului prin sudare robotizată este crucială în contextul industrial actual. Aceasta permite evaluarea și optimizarea parametrilor transferului de căldură, cum ar fi temperatura, viteza de încălzire și răcire, precum și schimbările de fază care intervin în timpul sudării. Prin înțelegerea și controlul adecvat al acestor parametri, se poate asigura o recondiționare eficientă și de înaltă calitate a pieselor. Analiza termică ajută la prevenirea dilatațiilor excesive, a fisurilor și a tensiunilor interne, asigurând astfel integritatea și performanța optimă a reperelor recondiționate.

Deși literatura de specialitate este abundentă pe aceste direcții de cercetare, o serie de întrebări rămân neadresate.

Prezenta Teză de doctorat abordează din punct de vedere numeric și experimental aspectele legate de transferul de căldură caracteristic tehnologiilor de depunere a materialului prin sudare robotizată

În prima fază, se utilizează un semifabricat din oțel care este supus procesului de depunere a materialului de adaos în mod robotizat. O celulă robotizată dedicată operațiilor de sudare cu arc electric sub mediu de gaze protectoare este utilizată în acest sens. Sunt evidențiate tehnici experimentale necesare achiziției de temperaturi de la nivelul băii de sudură și a materialului de bază.

Este dezvoltat un model de simulare bazat pe dinamica fluidelor computațională și metoda elementelor finite. Scopul acestuia este de a reproduce transferul de căldură prin convecție și conducție care se manifestă datorită procesului de sudare.

Validarea abordării de simulare se face considerând diferite valori ale debitului de gaz. Se observă în mod experimental că rezultatele analizelor termice se potrivesc doar parțial cu cele măsurate fizic.

În acest sens, a fost identificată o corelare între parametrii regimului de sudare și conductanța și capacitanța modelului care se manifestă la interacțiunea dintre materialul de bază și cel de adaos.

În ultimă fază a fost realizată verificarea caracteristicilor macroscopice și microscopice a eșantioanelor sudate. Au fost observate tendințe de liniaritate între corecțiile conductanței și capacitanței respectiv anumiți parametrii evaluați prin defectoscopie. Drept urmare, a fost dezvoltat un model de regresie liniară multiplă pentru creșterea gradului de generalizare al abordării.





## Lista de abrevieri

Nr. crt.	Abrev.	Semnificație/ Significance
1	CAD	Proiectare Asistată de Calculator / Computer Aided Design
2	CC-WAAM	Constrângerea compulsivă a fabricației aditive cu arc electric/ Compulsively constricted Wire Arc Additive Manufacturing
3	CFD	Dinamica Fluidelor Computațională / Computational Fluid Dynamics
4	CM	Crater marginal / Marginal crater
5	CMT	Transferul materialului de adaos la rece / Cold Metal Transfer
6	CPS	Sisteme Cyber-Fizice / Cyber Physical Systems
7	CSV	Fișier delimitat cu virgule / Comma Separated Value
8	CZ	Cruste de zgură / Slag crust
9	FOPDT	Sistem de ordin 1 cu întârziere / First order plus dead time system
10	MAG	Metal activ gaz / Metal active gas
11	MEF	Metoda Elementelor Finite / Finite Element Method
12	MIG	Metal inert gaz / Metal inert gas
13	NG	Neuniformități geometrice / Geometric non-uniformities
14	NS	Număr de stropi / Number of droplets
15	PC	Calculator personal / Personal Computer
16	RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes / Reynolds-averaged Navier-Stokes
17	RMS	Eroarea medie pătratică / Mean squared error
18	UE	Uniunea Europeană / The European Union
19	WAAM	Fabricarea aditivă cu arc electric/ Wire Arc Additive Manufacturing
20	ZIT	Zona influențată termic / Thermal influenced zone

## Lista de simboluri

Nr. crt.	Abrev.	Semnificație/ Significance
1	A	Arie / Area
2	$A_d$	Rata depunerii / Deposition rate
3	B	Lățime cordon sudură / Welded joint width
4	C(s)	Mărime de ieșire / Output variable
5	$C_{th}$	Capacitanța termică / Thermal capacitance
6	$C_{\mu}$	Constantă / Constant
7	$d_g$	Debitul de gaz / Gas flow rate
8	$E_{i,j}$	Parametrul vitezei de deformare / Strain rate parameter

9	$E_l$	Energia liniară / Liniar energy
10	$G_k$	Energia cinetică turbulentă datorită gradientilor medii de viteză / Kinetic energy due to the average velocity gradients
11	$h$	Înălțime cordon sudură / Welded joint height
12	$I$	Intensitatea curentului de sudare / Welding current
13	$K$	Factor de aplicare / Gain
14	$l_{cl}$	Lungimea liberă a sârmei electrod / Electrode stick-out
15	$L_l$	Distanța dintre duza de gaz și materialul de sudat / Standoff distance
16	$Nu$	Numărul lui Nusselt / Nusselt Number
17	$P_e$	Forța electromagnetică / Electromagnetic force
18	$P_p$	Forța de propulsie / Propulsion force
19	$Pr$	Numărul lui Prandtl / Prandtl number
20	$q$	Căldura transferată între nodurile elementului / Heat between the element nodes
21	$R(s)$	Mărime de intrare / Input variable
22	$Re$	Numărul lui Reynolds / Reynolds number
23	$R_{th}$	Conductanța termică / Thermal conductance
24	$S_e$	Termeni definiți de utilizator / User defined terms
25	$t_f$	Temperatura mediului ambiant / Ambient temperature
26	$T_{ij}$	Temperaturi nodale / Nodal temperatures
27	$t_s$	Temperatura suprafeței / Surface temperature
28	$U$	Tensiunea arcului / Arc voltage
29	$v_a$	Viteza de avans a sârmei electrod / Wire feed rate
30	$v_g$	Viteza de curgere a gazului de protecție / Welding gas flow rate
31	$v_s$	Viteza de sudare / Welding speed
32	$Y_M$	Contribuția dilatării fluctuante a turbulențelor la viteza de disipare / The contribution of the fluctuating dilation on the turbulent dissipation velocity
33	$\theta$	Întârzierea sistemului / System dead time
34	$\sigma_k$	Numărul Prandtl pentru energia cinetică turbulentă / Prandtl number for the kinetic turbulent energy
35	$\sigma_\varepsilon$	Numărul Prandtl pentru viteza de disipare a turbulențelor / Prandtl number for the turbulence dissipation velocity
36	$\tau$	Constanta de timp a sistemului / Time constant

## **Capitolul 1. Considerente tehnologice**

### **1.1. Introducere în sudarea robotizată**

Sudarea robotizată reprezintă un proces de sudare automatizat, în care un robot industrial realizează depunerea de material/îmbinarea sudată în locul operatorului uman. În acest sens, robotul este folosit pentru a genera traiectorii în mod repetitiv, fiind echipat cu un echipament de sudare specific. Sistemul poate fi programat pentru a efectua suduri în diverse poziții și unghiuri. Din această perspectivă, procedeul tehnologic este caracterizat printr-o repetabilitate ridicată. Sudarea robotizată este utilizată în mod uzual pentru fabricarea de produse cu un grad mare de precizie și eficiență, prin minimizarea erorilor umane și reducerea duratei ciclului de lucru [1].

Sudarea robotizată se diferențiază de alte procedee convenționale prin mai multe caracteristici distinctive. Comandată de un controller de proces, sudarea robotizată este foarte precisă, având capacitatea de a genera traiectorii exacte și repetabile. Mai mult, un robot industrial poate opera fără întreruperi, fără pauzele necesare în cazul sudării manuale, ceea ce face procesul de sudare mai eficient. Prin urmare, reperatele obținute prin sudarea robotizată sunt de calitate superioară. În plus, robotul poate fi programat să execute o varietate largă de mișcări și să efectueze depuneri de material/îmbinări complexe, făcând acest proces ideal pentru producția de serie [2].

Cu toate acestea, există și dezavantaje ale sudării robotizate. Aceasta poate fi costisitoare în faza de implementare și poate necesita investiții semnificative în echipamente și formarea specializată a personalului. De asemenea, adaptarea la schimbările de producție poate fi dificilă. De regulă fiecare soluție de sudare robotizată este caracteristică unei anumite categorii de dimensiuni de gabarit ale pieselor sudate (mici, medii, mari).

Tehnologiile de sudare robotizate uzuale includ: sudarea cu arc electric, sudarea cu laser, sudarea cu plasmă și sudarea cu fascicul de electroni. Sudarea cu arc electric este cea mai utilizată tehnologie și poate fi de tip MIG/MAG (cu electrod consumabil, în mediu de gaz de protecție inert sau activ). Sudarea cu laser utilizează un fascicul laser pentru a topi materialul și a realiza depunerile de material/îmbinările. Sudarea cu plasmă implică utilizarea unui gaz ionizat pentru a produce căldura necesară topirii materialului. Sudarea cu fascicul de electroni necesită operarea întregului sistem tehnologic în vacuum. Sudarea cu gaz de protecție utilizează un gaz inert pentru a preveni oxidarea materialului și pentru a proteja sudura. Fiecare tehnologie are avantajele și dezavantajele sale, iar alegerea tehnologiei potrivite depinde de aplicație și de materialul care este supus sudării. Dintre toate procedeele de sudare susmenționate cele mai utilizate în prezent sunt cele din categoria tehnologiilor de sudare cu arc electric. Toate aceste procedee de sudare robotizată utilizează gaz de protecție a arcului electric și băii de sudură

Beneficiile sudării robotizate includ posibilitatea de a efectua depuneri de material/îmbinări în zone periculoase sau greu accesibile pentru operatorii umani, reducând astfel riscurile de accidente de muncă. Sudarea robotizată poate fi, de asemenea, mai economică decât cea manuală în cazul unui volum mare de producție și poate reduce costurile prin eliminarea defectelor sau a pieselor rebut [3]. Indiferent de metoda tehnologică și de procedeu, problema calității produsului final și a optimizării este în centrul atenției [4]. De aceea, de-a lungul anilor s-au efectuat cercetări din care au rezultat modele matematice care să explice diferitele fenomene care au loc în cadrul procesului, s-au elaborat modele de simulare menite să ușureze munca de cercetare, iar mai nou pentru un control și mai bun există tendința de a asocia procesul cu ceea ce numim inteligență artificială [5].

## Capitolul 2. Tendințe actuale în domeniul sudării robotizate

### 2.1 Concluzii referitoare la stadiul actual al cercetărilor în domeniul depunerii de material prin sudare

Studiul bibliografiei recente a pus în evidență actualitatea și oportunitatea temei abordate în teza de doctorat din perspectiva recondiționării pieselor prin fabricație aditivă cu arc electric. Parametrii de interes, echipamentele folosite, necesitatea unei abordări sistemice a fenomenelor complexe care au loc la depunerea de material prin sudare robotizată, interconectarea modelelor de studiu prin simulare, particularitățile de generare a traiectoriilor, folosirea metodelor statistice de prelucrare a datelor, introducerea în modelele de studiu a unor date obținute pe cale experimentală, observarea surselor de erori și compensarea graduală a acestora, precum și necesitatea de cuplare a fenomenelor complexe, multi-fizice au determinat orientarea tezei de doctorat către cercetări teoretice, numerice și experimentale care să analizeze într-o manieră originală, dar în deplină concordanță cu tendințele actuale tematica propusă și concentrarea studiului asupra zonei de influență termică. Aceasta modifică local caracteristicile microstructurale ale materialului de bază. Din acest motiv ZIT manifestă caracteristici mecanice inferioare față de materialul de bază, existând riscul de apariție și propagare a fisurilor.

Pe baza ideilor sintetizate în teza de doctorat au fost urmărite obiective de cercetare primare și secundare (Os), dar și direcții de cercetare care nu sunt surprinse în totalitate de literatura existentă în domeniu (Fig 2.6).

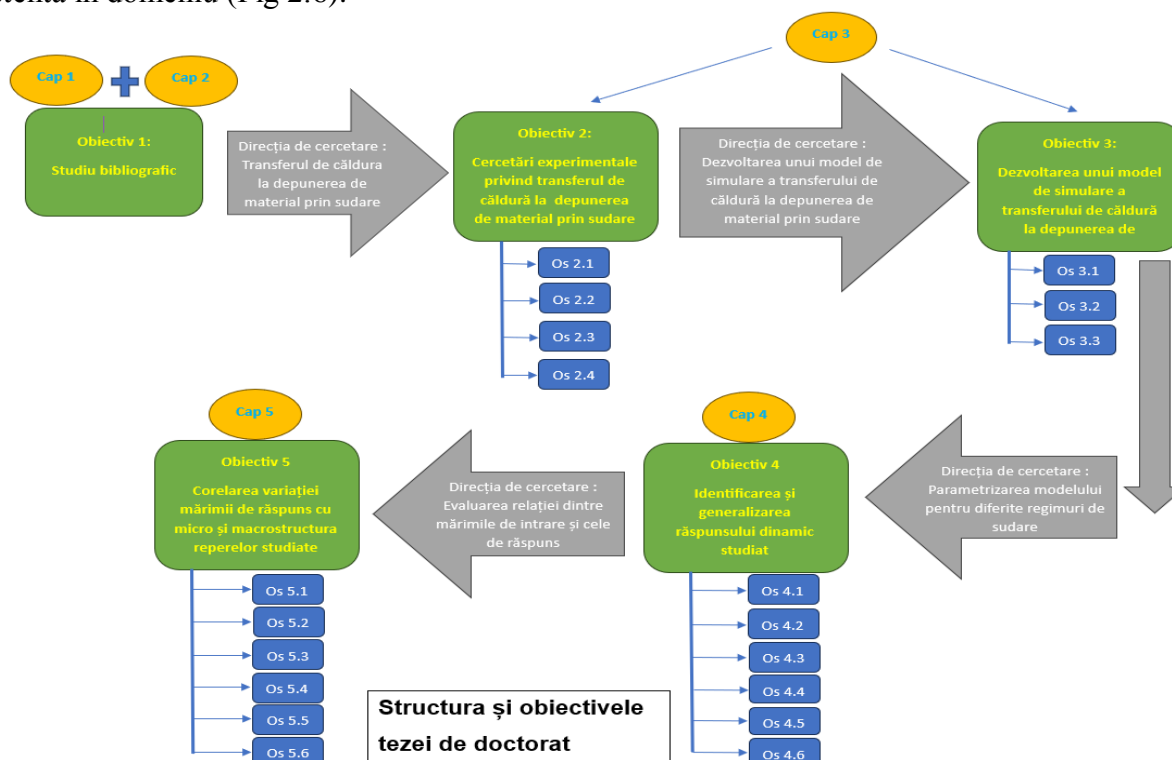


Fig 2.6. Obiectivele și structura tezei

În continuare este realizată o descriere a obiectivelor și direcțiilor de cercetare aferente:

- **OBIECTIV 1: Studiul bibliografic** – Acest obiectiv a presupus realizarea unui studiu bibliografic privind procesul de depunere a materialului prin sudare robotizată. Pe baza

literaturii de specialitate a fost evidențiată importanța cercetărilor experimentale și prin simulare a transferului de căldură care are loc la nivelul materialului de bază.

- **OBIECTIV 2: Cercetări experimentale privind transferul de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată** – Acest obiectiv a presupus dezvoltarea unui stand experimental pentru realizarea procesului de depunere a materialului prin sudare robotizată având la bază o serie de eșantioane și un plan experimental. S-a utilizat un sistem de achiziție termică pentru surprinderea gradientului de temperaturi care are loc la nivelul materialului de bază în timpul procesului. Se disting următoarele obiective secundare:
  - **Os 2.1:** Realizarea unei mostre pe baza tehnologiei de depunere a materialului prin sudare robotizată, ținând cont de parametrii regimului tehnologic
  - **Os 2.2:** Procesarea experimentală a temperaturilor de la nivelul suprafețelor exterioare ale reperului utilizând două game distincte de măsurare
  - **Os 2.3:** Scanarea 3D a reperului sudat pentru transpunerea formelor reale ale suprafețelor exterioare sub formă digitală
  - **Os 2.4:** Reconstruirea suprafețelor modelului scanat 3D pe baza tehnicilor de Reverse-Engineering
- **OBIECTIV 3: Dezvoltarea unui model de simulare cuplat CFD-MEF a transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată.** Acest obiectiv se bazează pe variația temperaturii în raport cu timpul din mai multe locații ale materialului de bază. Acestea au fost utilizate atât pentru constrângerea fluxului de căldură din domeniul solid, cât și pentru verificarea rezultatelor obținute în urma simulărilor CFD-MEF. În simulare a fost inclusă o reprezentare realistă a geometriei reperului obținută prin scanare. Pe de altă parte, modelul de calcul a fost astfel conceput pentru a permite parametrizarea ulterioară. Se poate ține cont în acest fel de variația parametrilor regimului de sudare. Se disting următoarele obiective secundare:
  - **Os 3.1:** Dezvoltarea unui model de simulare CFD pentru surprinderea interacțiunii dintre mediul fluid (materializat prin curgerea gazului de protecție) și cel solid (materializat prin pereții exteriori ai reperului sudat)
  - **Os 3.2:** Dezvoltarea unui model de simulare MEF pentru analiza în regim tranzitoriu a transferului de căldură datorat interacțiunii dintre materialul de bază și cel de adaos
  - **Os 3.3:** Cuplarea celor două medii de simulare pentru constrângerea domeniului fluid (materializat de convecția forțată din CFD) și a transferului de căldură din domeniul solid (materializat prin ecuațiile transferului de căldură prin conducție din analiza FEM)
- **OBIECTIV 4: Identificarea și generalizarea răspunsului dinamic al sistemului studiat** – Dezavantajul modelelor de simulare prin MEF / CFD parametrice îl constituie costurile de calcul ridicate. O metodă care permite generalizarea răspunsului dinamic al analizelor termice constituie utilizarea sistemelor de ordinul I prin intermediul funcțiilor de transfer. Pentru aceasta în modelul de simulare s-a considerat variația unitară a temperaturii de la nivelul amprenteii cordonului de sudură. S-a studiat temperatura din sistem până când acesta a ajuns la echilibru. Constanta de timp și amplificarea funcției de transfer se pot modifica pentru a ține cont de variația oricărui parametru al regimului tehnologic.
  - **Os 4.1:** Studiul experimental al temperaturilor din afara ZIT pentru mai multe reperi considerând variația debitului de gaz.
  - **Os 4.2:** Parametrizarea modelului de simulare inițial pentru a ține cont de variația debitului de gaz în analiza CFD și de temperaturile de la nivelul secțiunilor cordonului în analiza MEF
  - **Os 4.3:** Utilizarea sistemelor FOPDT pentru descrierea temperaturilor din afara ZIT în timpul realizării procesului de depunere a materialului prin sudare robotizată

- **Os 4.4:** Identificarea factorului de amplificare și a constantei de timp a sistemului pe baza metodei Nishikawa la răspunsul treaptă
- **Os 4.5:** Realizarea corecțiilor constantelor determinate inițial în funcție de valorile experimentale
- **Os 4.6:** Evaluarea relației dintre coeficienții de corecție și debitul de gaz pentru utilizarea ulterioară
- **OBIECTIV 5: Corelarea variației temperaturii măsurate cu micro și macrostructura plăcilor studiate** – Modul în care are loc transferul de căldură la depunerea materialului prin sudare robotizată influențează în mod direct micro și macro structura materialului de bază. În acest sens, studiile defectoscopice oferă o perspectivă importantă privind relația dintre parametrii regimului de sudare, transferul termic și calitatea sudurii.
  - **Os 5.1:** Identificarea și determinarea în urma inspecției vizuale a numărului de stropi, crustelor de zgură, neuniformităților geometrice, craterelor marginale, depunerilor de pelicule solide, lățimilor cordoanelor sudură, înălțimilor cordoanelor de sudură
  - **Os 5.2:** Determinarea cu ajutorul microscopului optic a parametrilor geometrici ( pătrundere și supraînălțare , unghi de racordare, valoare ZIT măsurata în secțiune la suprafața și la rădăcina plăcilor
  - **Os 5.3:** Calcularea diluției și energiei liniare pentru fiecare placă în parte
  - **Os 5.4:** Evaluarea relației de liniaritate între valorile măsurate și coeficienții de corecție a conductanței și capacității modelului de simulare.
  - **Os 5.5:** Dezvoltarea unui model de regresie liniară multiplă pentru generalizarea relației dintre proprietățile geometrice ,defectele microstructurale, diluția și coeficienții de corecție  $k$  și  $\tau$
  - **Os 5.6:** Verificarea gradului de generalizare a abordării pentru repere care se află în afara setului de date

## **Capitolul 3. Modelarea CFD-MEF a transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată**

### **3.1. Etape de modelare**

Scopul acestui capitol este acela de a dezvolta un model de simulare a transferului de căldură pentru depunerea de material prin sudare robotizată. Acest model a fost realizat în mediul de lucru ANSYS Workbench 19.0.

În prima etapă s-a constituit partea experimentală. Standul este compus dintr-o celulă robotizată de sudare MIG/MAG în care au fost plasate echipamentele necesare experimentelor. Reperul sudat reprezintă o placă metalică. Parametrii regimului tehnologic sunt stabiliți în concordanță cu materialul de bază și cu specificațiile sistemului robotizat folosit.

Piesa finită a fost scanată 3D pentru reconstruirea formei reale a suprafețelor exterioare în mediul de lucru CAD. În acest sens, norii de puncte au fost procesați utilizând aplicația SpaceClaim, iar pregătirea modelului de calcul a avut loc în interfața DesignModeler.

S-au realizat două tipuri de analize: de curgere a fluidelor (Computational Fluid Dynamics – CFD), respectiv analiza termică în regim tranzitoriu (Transient Thermal). Pentru cele două medii de simulare s-a ținut cont de caracteristicile de material, modul în care are loc schimbul de căldură dintre reper și mediul ambiant, respectiv proprietățile gazului de protecție.

Rezultatele analizei CFD au fost procesate pentru identificarea coeficientului de convecție în raport cu poziția torței. Acest gradient al convecției forțate a fost apoi utilizat ca dată de intrare în analiza termică. În această etapă temperaturile obținute din experimente pe baza termografiei în

infraroșu au fost utilizate pentru constrângerea fluxului de căldură în fiecare secvență de generare a cordonului.

Verificarea rezultatelor analizei termice s-a realizat considerând variația temperaturilor la nivelul unei locații arbitrare a reperului sudat. Temperaturile au fost măsurate experimental utilizând un pirometru.

Figura 3.1 ilustrează principalele etape ale modelului propus.

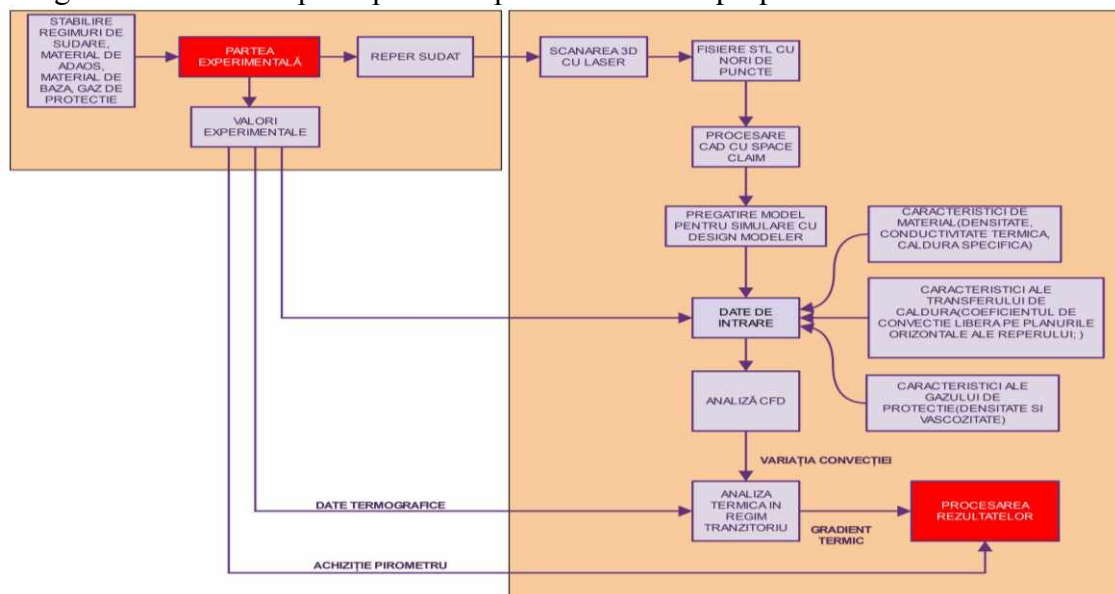


Fig. 3.1. Etapele elaborării modelului de simulare

### 3.2. Obiective

Capitolul 3 urmărește două dintre obiectivele principale ale Tezei de doctorat:

- **OBIECTIV 2:** Cercetări experimentale privind transferul de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată
- **OBIECTIV 3:** Dezvoltarea unui model de simulare a transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată

### 3.3. Echipamentul experimental

#### Stabilirea materialului de bază

Reperele pe care s-a depus material prin sudare robotizată sunt plăci având dimensiunile: L=200 mm, l=100 mm, h=10 mm. Acestea sunt dintr-un oțel utilizat în ansamblurile sudate și anume: S235JR.

#### Alegerea gazului de protecție

Gazul de protecție este compus din: 82% Ar 18% CO<sub>2</sub>. Acesta este compatibil cu sârma electrod aleasă, fiind potrivit pentru operațiile de depunere de material prin sudare a reperelor fabricate din oțel carbon.

#### Celula robotizată

Celula robotizată de sudare utilizată este una specifică acestui tip de aplicații și are în componență: un robot industrial Fanuc 100i B care este echipat cu o parte terminală de tip pistol robotizat de sudare (în termeni de integratori acesta se mai numește “torța de sudare”) și un echipament de tragere-împingere a sârmei electrod, o unitate de comandă (controller), un sistem

perirobotic cu două posturi de lucru (masă modulară pe care se fixează reperul), o sursă de sudare, un sistem de management al torței (sistemul care întreține duza de gaz), o butelie de gaz și sistemele intermediare (furtun pentru transportul gazului de protecție, elemente de curent electric).

Semifabricatul este poziționat în postul de lucru al sistemului perirobotic. Traiectoriile necesare pentru generarea cordonului de sudură și reglarea parametrilor regimului tehnologic se realizează în mod automat de către unitatea informațională a celulei.

Figura 3.1 evidențiază componentele fizice ale celulei robotizate și modul de dispunere a echipamentului de achiziției a temperaturilor.



**Fig 3.1** Celula robotizată de sudare: 1. Robotul industrial Fanuc 100 iB 2. Pirometrul Raynger MX4 3. PC pentru achiziții date pirometru, 4. Camera de termografie, 5. Placa de oțel, 6. Masă modulară

Primul pas a fost acela de a asigura o suprafață corespunzătoare a plăcilor. Pentru aceasta, suprafețele au fost pregătite cu ajutorul unui polizor unghiular și degresate utilizând alcool de uz tehnic.

Al doilea pas a fost de poziționare identică a plăcilor pe sistemul perirobotic. Astfel, cordonul este realizat identic ca lungime și poziție. Acest lucru este asigurat de faptul că masa de lucru modulară conține canale în formă de T, care permit fixarea și poziționarea în același loc a pieselor.

Un al treilea pas a fost acela de programare a robotului pentru realizarea cordonului. Acesta s-a realizat utilizând dispozitivul de instruire al robotului în următorul mod: s-a creat un punct caracteristic (un sistem de coordonate poziționat în vârful sârmei electrod a efectorului); apoi a urmat crearea punctului caracteristic al reperului (sistemul de coordonate specific plăcilor); iar apoi s-a definit traiectoria robotului, care reprezintă lungimea cordonului de sudare, traiectorie însoțită și de activarea semnalului pentru sursa de sudare și gazul de protecție.

Debitul de gaz a fost reglat manual din butelia de gaz. Lungimea liberă a sârmei electrod a fost ajustată înainte de sudare cu ajutorul unei scule pentru debitat sârma. Din teach-pendant se modifică doar intensitatea curentului și viteza de avans a sârmei electrod. Ceilalți parametri sunt determinați în mod automat.

### Parametrii regimului tehnologic

Tabelul 3.1 prezintă principalii parametri ai regimului de sudare care sunt considerați în cazul experimentului. Aceștia au fost stabiliți pe baza recomandărilor din lucrarea [172].

**Tabel 3.1** Parametrii regimului de sudare

Parametrul	Simbol	Valoare
Debitul de gaz [l/min]	$d_g$	10
Intensitatea curentului de sudare [A]	I	320



Parametrul	Simbol	Valoare
Tensiunea [V]	U	31,7
Viteza de avans a sârmei electrod [m/min]	$v_a$	11
Viteza de sudare [cm/min]	$v_s$	55
Distanța între duză și suprafața plăcii [mm]	$L_1$	20

### Sistemul de achiziție a temperaturilor

În timpul experimentelor măsurarea temperaturilor s-a realizat cu două sisteme de achiziție, pentru două domenii de măsurare:

1. **Pirometru Raynger MX4:** asigură măsurarea temperaturilor într-o locație care se află în afara zonei de depunere a materialului. Acesta poate măsura temperaturi cuprinse între  $-50$  și  $800^{\circ}\text{C}$ . Rezultatele achiziției sunt stocate pe un calculator pentru a fi utilizate în procesul de verificare a rezultatelor modelului de simulare.
2. **Cameră de termografiere FLIR SC640:** asigură măsurarea temperaturilor în zona de depunere a materialului de adaos. Domeniul de măsurare este până la  $2000^{\circ}\text{C}$  și permite surprinderea temperaturii cu care se generează cordonul de sudură. Rezultatele achiziției sunt stocate pe un calculator pentru a fi utilizate în scopul constrângerii fluxului de căldură din cadrul analizei termice.

Cele două instrumente de achiziție a temperaturii au fost necesare întrucât camera de termografiere are un domeniu de lucru  $[-40^{\circ}\text{C} \dots +2000^{\circ}\text{C}]$ , dar aceasta nu poate opera decât în două intervale  $[-40^{\circ}\text{C} \dots +500^{\circ}\text{C}]$  și  $[500^{\circ}\text{C} \dots +2000^{\circ}\text{C} / +2300^{\circ}\text{C}]$ . Astfel, camera achiziționează temperaturi în timpul experimentelor cuprinse în intervalul  $[500^{\circ}\text{C} - 2000^{\circ}\text{C} / +2300^{\circ}\text{C}]$ , iar pentru achiziția valorilor inferioare temperaturii de  $500^{\circ}\text{C}$  s-a folosit pirometrul.

**Camera SC640** este destinată măsurării fără contact a variațiilor de temperatură care se manifestă la nivelul suprafețelor exterioare ale unui obiect care este supus solicitărilor termice. În timpul procesului camera se conectează la un laptop unde vor fi stocate imaginile / înregistrările video. Ulterior acestea pot fi procesate cu aplicația "ThermaCam Researcher". Scopul sistemului de măsurare este acela de a capta variația temperaturilor de-a lungul cordonului.

**Pirometrul Raynger MX4** poate măsura fără contact. Măsurarea are loc datorită transferului de căldură prin radiație. De aceea este necesar ca în faza de calibrare să fie definite emisivitatea materialului (același lucru trebuie definit în momentul prelucrării datelor și la camera termografică; în cazul de față emisivitatea a fost de 0,8). Achiziția datelor se face prin interfața serială.

Zonele de măsurare cu camera de termografiere și pirometrul, detaliile geometrice și poziția pistolului de sudare robotizat sunt reprezentate în figura 3.2.

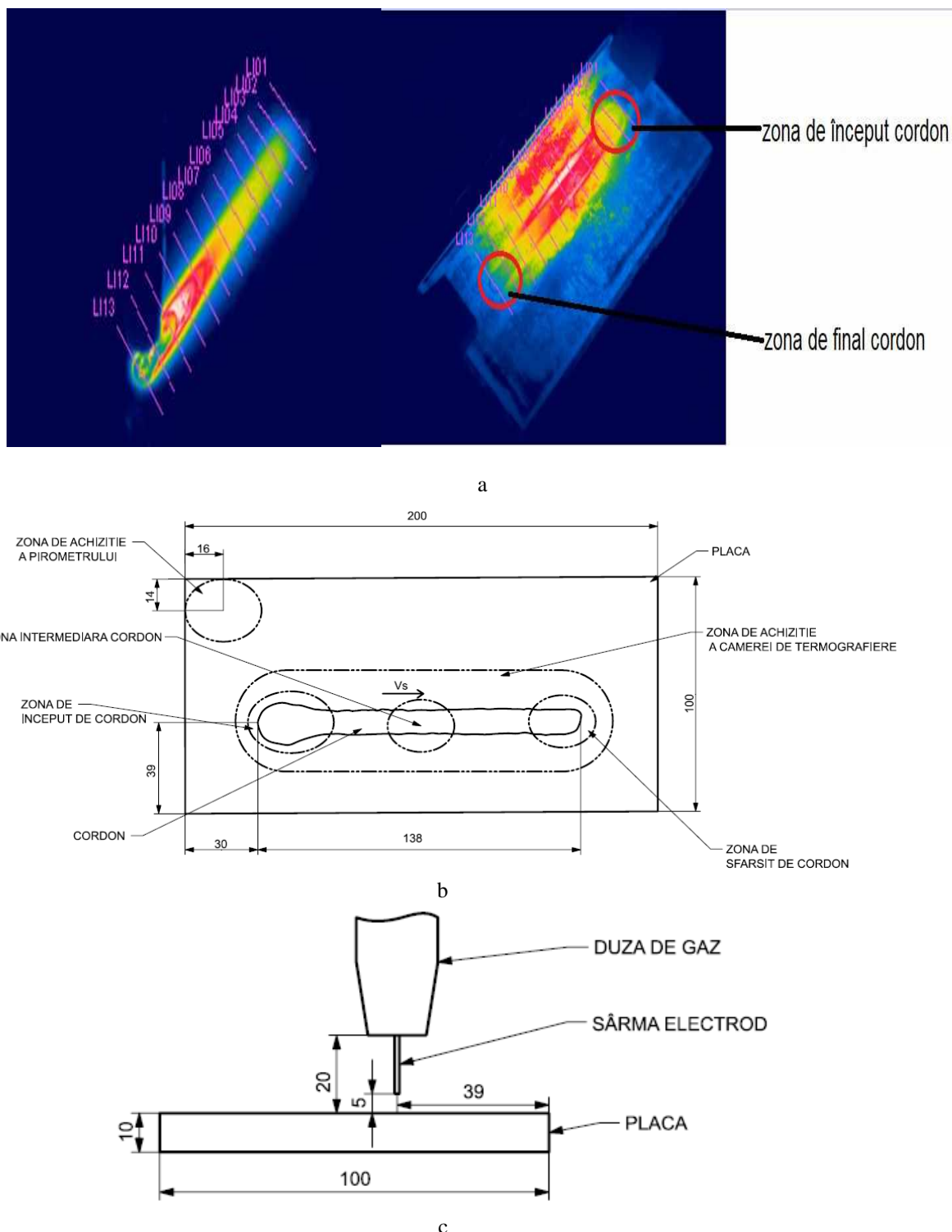
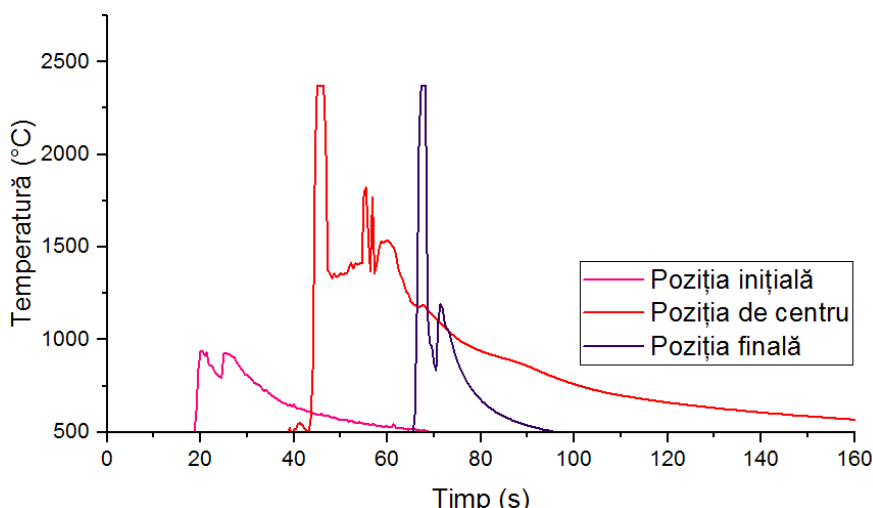


Fig 3.2 Zonele de achiziție a temperaturilor pentru camera de termogafiere (a) și pirometru (b) și (c)

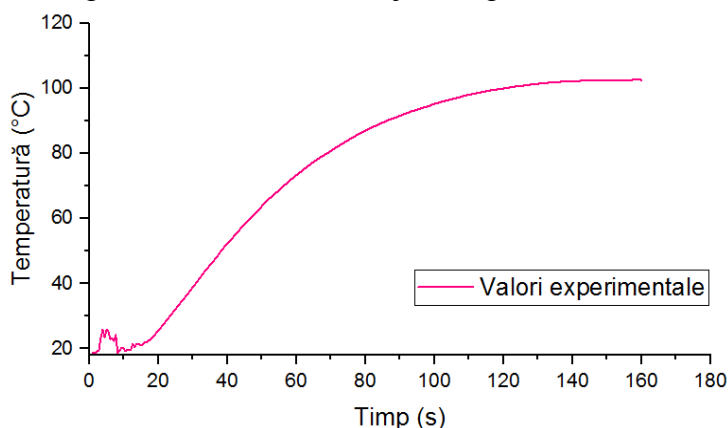
### Rezultate experimentale

Figura 3.3 ilustrează variația temperaturilor în raport cu timpul considerând poziția inițială, de centru și finală a torței. Achiziția s-a realizat prin intermediul camerei de termogafiere. Domeniul de măsurare este limitat de la 500 °C la 2000 °C / +2300 °C. Temperaturile care depășesc 1800°C (temperatura de evaporare a oțelului) reprezintă valori măsurate din arcul electric. Acestea se manifestă numai pe o fracțiune scurtă din timp.



**Fig 3.3** Variația temperaturilor în raport cu timpul achiziționate utilizând camera de termografiere considerând pozițiile: inițială, de centru și finală a torței

Figura 3.4 reprezintă temperaturile măsurate cu ajutorul pirometrului.



**Fig 3.4** Variația temperaturilor în raport cu timpul achiziționate utilizând pirometrul

### Scanarea 3D a plăcii

Scanarea 3D a plăcii s-a făcut cu ajutorul scannerului cu laser ABSOLUTE ARM 85. Prin intermediul acestuia se reconstruiește forma plăcii și a cordonului sub forma unui nor de puncte. Fișierul este exportat în format „STL”, care este importat ulterior în programul de modelare, în acest caz, ANSYS SpaceClaim.

### Reconstruirea geometriei în interfața SpaceClaim

În programul SpaceClaim s-a făcut trecerea de la norul de puncte generat prin scanarea 3D la suprafețele CAD.

### 3.4. Analiza CFD a curgerii gazului de protecție

Analiza CFD reprezintă o metodă de simulare și analiză a comportării fluidelor și a transferului de căldură într-un mediu tridimensional, utilizând metode numerice și modele matematice de curgere. 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 [174].

### Definirea domeniului solid

Prima etapă pentru realizarea modelului de simulare CFD presupune translatarea modelului CAD din interfața SpaceClaim în interfața DesignModeler. În urma transferului rezultă o sumă de suprafețe care înglobează margini triunghiulare și/sau dreptunghiulare. Acestea sunt o aproximare a geometriei fizice. Strategia de reproducere a modelului presupune secționarea cordonului cu un pas egal cu 5 mm, rezultând 27 de segmente

La final, rezultă modelul 3D din figura 3.5. Acesta dispune de 28 de corpuri solide (un corp pentru materialul de bază și 27 de corpuri pentru segmentele delimitate ale cordonului de sudură).

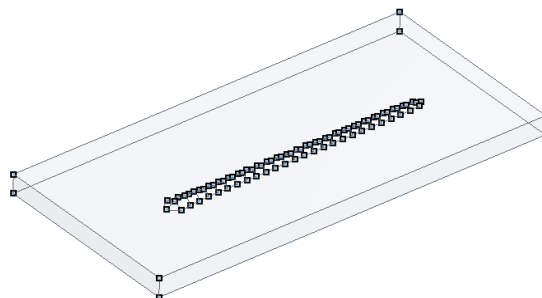


Fig. 3.5. Eșantionarea cordonului de sudură

### Definirea domeniului fluid

Pentru acest tip de analiză s-a inclus în model torța de sudare. Aceasta a fost dispusă în poziția de sudare, la un unghi de 90 de grade față de suprafața plăcii, exact ca în experiment.

În următoarea etapă s-a realizat simplificarea torței prin eliminarea componentelor care nu materializează traseul de curgere al fluidului. Reprezentarea domeniului de curgere este ilustrată în figura 3.6.

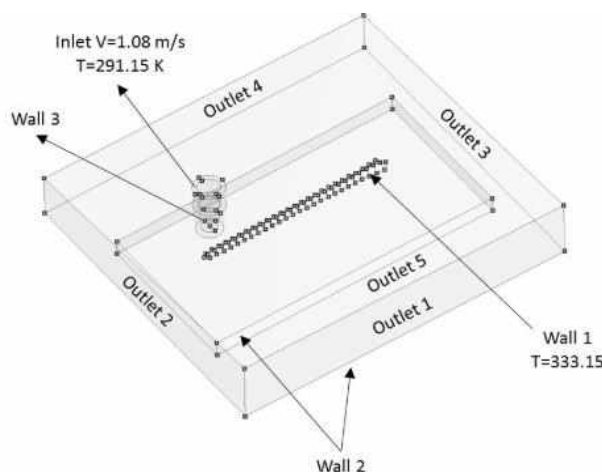


Fig 3.6 Detalii privind domeniul de curgere

### Definirea condițiilor de simulare

Analiza CFD s-a realizat utilizând solverul ANSYS CFX. La nivelul duzei de gaz s-a impus viteza de intrare a fluidului. Având în vedere că numărul Reynolds al problemei este  $1 \cdot 10^5 > 4000$  și ținând cont de informațiile obținute cu camera rapidă cu privire la modul de curgere al gazului, s-a utilizat modelul de turbulențe k-epsilon, cu activarea ecuațiilor de energie pentru a surprinde variația temperaturii la interfața dintre domeniul fluid și cel solid. Scopul simulării este de procesare a temperaturilor adiacente cordonului. Valorile calculate sunt necesare pentru interpolarea coeficientului de convecție forțată pe suprafețele exterioare ale plăcii.

Deoarece torța execută o mișcare de translație egală cu viteza de sudare, în timpul simulării gradientul convecției forțate va migra în raport cu lăța torței. De aceea s-au analizat 27 de cazuri aparținând celor 27 de secțiuni definite anterior.

Ca date de intrare pentru simulare s-au utilizat: masa molară, densitatea și căldura specifică a gazului de protecție. Tabelul 3.2 prezintă valorile utilizate.

**Tabel 3.2** Caracteristicile gazului de protecție

Masa molară [Kg/Kmol]	Densitatea [Kg/m <sup>3</sup> ]	Căldura specifică [J/Kg°C]
39,8	1,69	520

Viteza de curgere a gazului de protecție a fost evaluată pe baza relației:

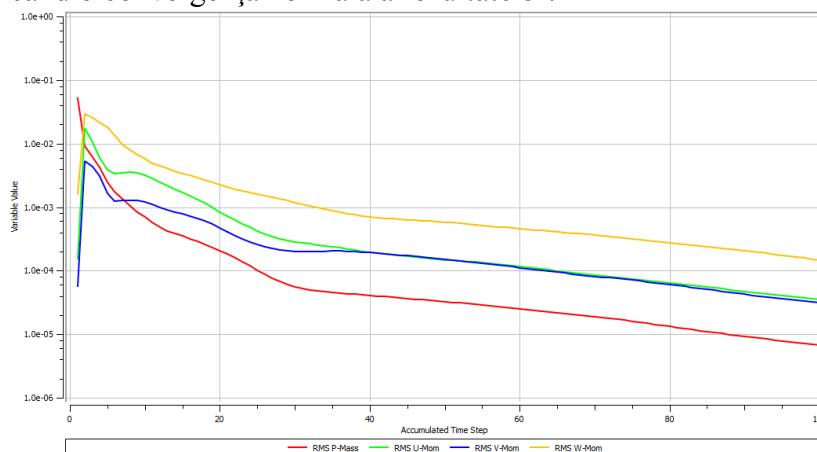
$$v_g = \frac{d_g}{A} \quad (3.1)$$

Unde:  $d_g$  reprezintă debitul de gaz, iar  $A$  aria circumferinței duzei.

Pentru problema actuală, viteza  $v_g$  este de 1,08 m/s, aceasta corespunde debitului de 10 l/min. Determinarea temperaturilor din proximitatea cordonului de sudură presupune definirea valorilor inițiale ale temperaturii pentru cele 27 de segmente delimitate. În acest scop s-au utilizat temperaturile determinate experimental. Pentru fiecare increment al deplasării torței de sudare s-au exportat valorile coeficientului de convecție forțată pentru utilizarea ulterioară a acestora în analiza termică în regim tranzitoriu.

## Procesarea rezultatelor analizei CFD

Figura 3.7 reprezintă graficul de convergență al reziduurilor pentru ecuațiile masei și ale momentului. Se observă tendința descrescătoare a valorilor, valoarea RMS fiind sub  $1 \cdot 10^{-5}$  după 100 de iterații, semnificând o convergență normală a rezultatelor.

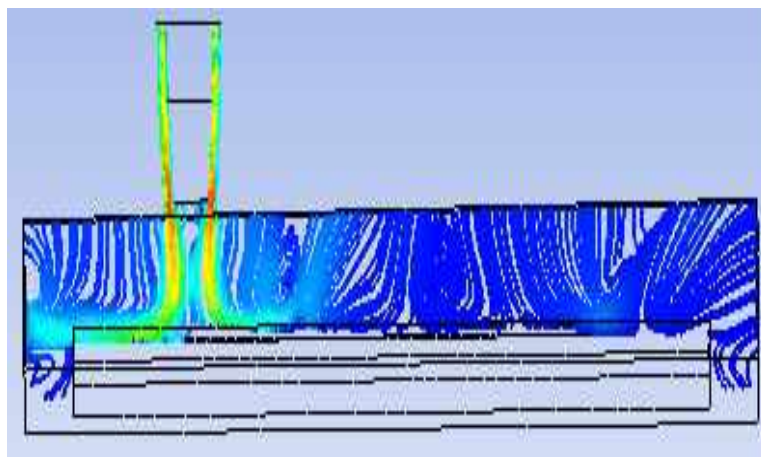


**Fig 3.7** Monitorizarea convergenței rezultatelor

- **Vectorul vitezelor fluidului**

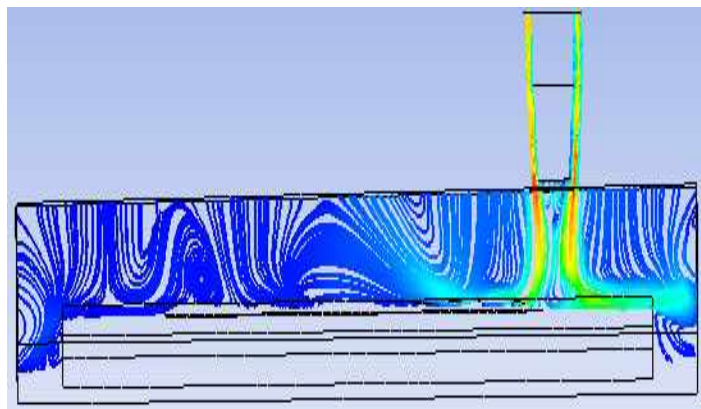
Reprezentarea liniilor de curgere ale gazului de protecție oferă informații despre modul în care fluxul de gaz se deplasează în spațiul studiat.

Figura 3.8 reprezintă vectorul vitezelor fluidului la poziția inițială a torței. Viteza maximă de 1,39 m/s se manifestă în interiorul duzei, în timp ce vitezele de 0,65 m/s apar la interacțiunea dintre gazul de protecție și materialul de bază.



**Fig 3.8** Vectorul vitezelor fluidului la poziția inițială a torței

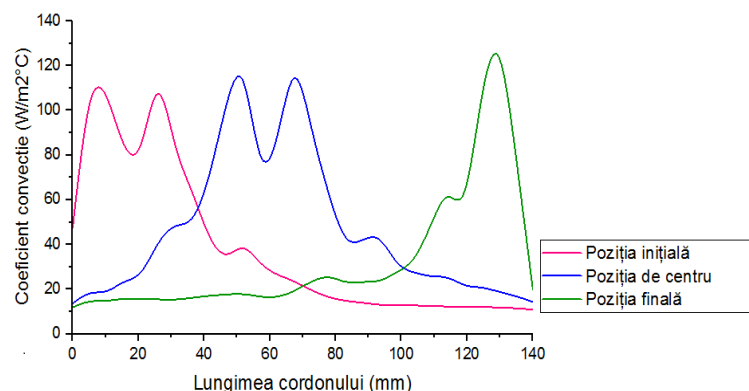
Figura 3.9 prezintă vectorul vitezelor fluidului în poziția de final a torței. În acest caz fluxul de gaz tinde să revină la forma din poziția inițială. Cu toate acestea, distanța dintre capătul cordonului și marginea reperului este de 35 mm, fapt care perturbă traseul de curgere. Se manifestă în acest caz o tendință de recirculare în care viteza gazului crește local la capătul cordonului și scade treptat față de marginea piesei.



**Fig 3.9** Vectorul vitezelor fluidului în poziția de final a torței

- **Coeficientul de convecție forțată**

În cazul proceselor de sudare cu arc electric, transferul de căldură prin convecție se manifestă preponderent datorită interacțiunii dintre reper și mediul ambiant. Astfel, o fracțiune din energia termică stocată la nivelul reperului este transferată mediului ambiant, facilitând solidificarea materialului depus. Cu toate acestea, răcirea rapidă a cordonului de sudură este influențată dominant de interacțiunea dintre cordon și gazul de protecție. Din punct de vedere al transferului de căldură, viteza de curgere a fluidului duce la creșterea coeficientului de convecție (măsură a vitezei de transfer în funcție de fluidul în mișcare). O simulare realistă a procesului necesită procesarea diferenței de temperaturi dintre mediul solid și cel fluid în funcție de poziția torței. În acest fel se cunoaște valoarea coeficientului de convecție pentru fiecare increment al poziției torței. Figura 3.10 reprezintă variația coeficientului de convecție în raport cu poziția torței.

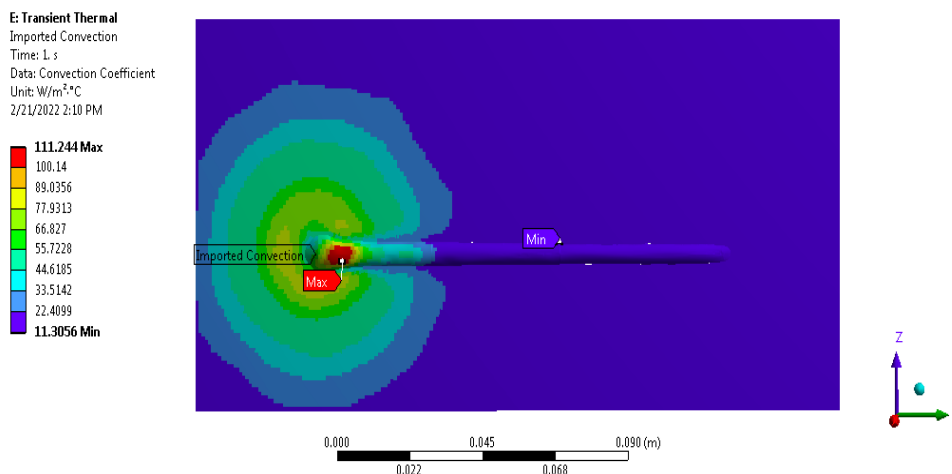


**Fig 3.10** Variația coeficientului de convecție în raport cu lungimea cordonului considerând poziția inițială, finală și de centru a torței de sudare

Sunt considerate 3 poziții: inițială, de centru și finală. Valoarea maximă de  $125,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$  se manifestă în poziția finală a torței. Valoarea maximă poate fi explicată pe baza zonei de recirculare vizibilă la procesarea vectorului vitezelor și al gradientului vitezelor.

Considerarea variației coeficientului de convecție forțată se face prin fișierele CSV. Trecerea din domeniul fluid în cel structural se realizează, prin suprimarea domeniului fluid și discretizarea celui solid. În fiecare nod al rețelei astfel generată se caută, pe baza coordonatelor nodului, cea mai apropiată valoare a coeficientului de convecție din locațiile stocate în fișierul CSV.

Figura 3.11 reprezintă variația coeficientului convecției forțate în raport cu poziția inițială a torței. Valoarea maximă a coeficientului de convecție forțată este  $111,2 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . Aceasta apare la nivelul materialului depus.



**Fig. 3.11** Coeficientul de convecție forțată [ $\text{W/m}^2\text{°C}$ ] în poziția inițială a torței.

Figura 3.12 reprezintă gradientul coeficientului convecției forțate în raport cu poziția centrală a torței. Valoarea maximă a coeficientului de convecție este  $118,3 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . Aceasta poate fi observată în mai multe locații aflate la nivelul cordonului. În acest caz este vizibil efectul considerării formei reale a cordonului de sudură asupra curgerii fluidului. Variația coeficientului de convecție poate fi explicată și pe baza vectorilor de viteză.

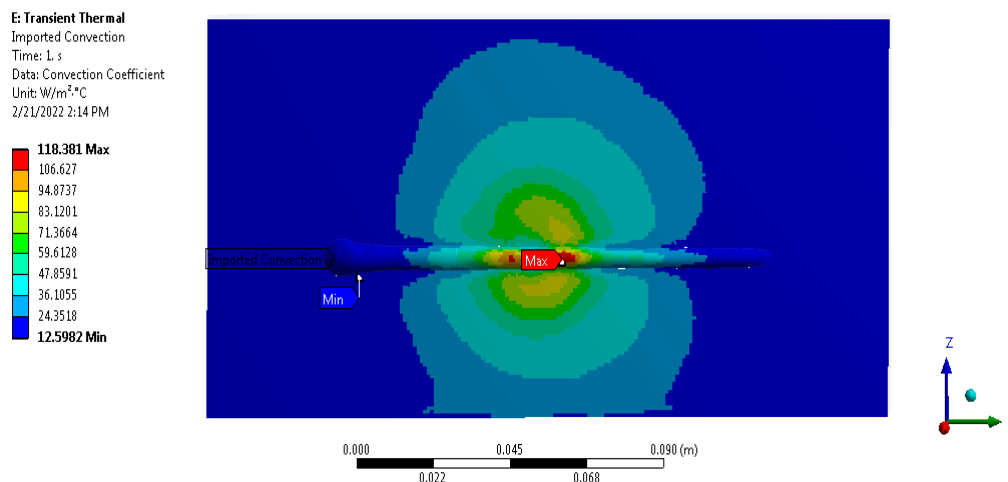


Fig. 3.12 Coeficientul de convecție forțată [ $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$ ] la poziția de centru a torței.

### 3.5. Analiza termică în regim tranzitoriu

#### Definirea condițiilor de simulare

În vederea realizării simulărilor au fost definite următoarele condiții:

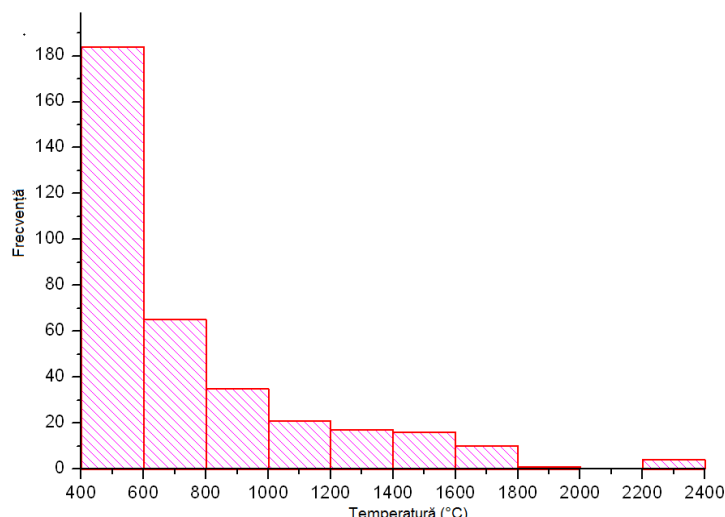
- **Setări privind pașii de timp**

Având în vedere viteza de sudare de 55 cm/min și segmentele delimitate de 5 mm ale cordonului, timpul de simulare a fost divizat în pași egali de 0,55 secunde. În afară de pașii de timp necesari în faza de generare a cordonului (aproximativ 14,8 s - timpul necesar realizării cordonului pe placă) în simulare s-a impus și un ciclu de răcire de 145,2 secunde. Acesta coincide cu timpul observat în experimente.

- **Setări privind temperaturile impuse**

Pentru a surprinde distribuția de temperaturi în oricare locație a modelului sunt necesare variațiile temperaturilor în raport cu timpul pentru fiecare secțiune a cordonului de sudură. În acest sens sunt considerate valorile maxime ale temperaturii materialului depus la nivelul fiecărei secțiuni definite de cordon. Strategia presupune procesarea rezultatelor experimentale sub formă de histograme. Se caută locațiile în care apare o discontinuitate în distribuția valorilor. În figura 3.13 se prezintă un exemplu pentru secțiunea de mijloc a cordonului. Discontinuitatea dintre valori indică temperaturi care au fost captate doar pentru un interval scurt de timp (timpul în care temperatura  $>1800\text{°C}$ ). În acest caz, valorile prezentate aparțin arcului electric și trebuie filtrate pentru a asigura relevanța rezultatelor simulărilor. Aceeași procedură este realizată pentru întregul cordon.





**Fig. 3.13** Histograma temperaturilor măsurate experimental

Pe baza studiului histogramelor, tabelul 3.3 prezintă temperaturile pentru locația de început, centru și capăt a cordonului.

**Tabel 3.3** Extras privind temperaturile din modelul de simulare

Poziția torței	Inițială	Centru	Finală
Temperatură [°C]	1708	1463	1188

- **Setări privind tehnica de activare/dezactivare a elementelor**

Tehnica „Birth and Death” permite activarea sau dezactivarea unor elemente din model pentru a recrea procesul de depunere a materialului. În spatele tehnicii stau factori de multiplicare a valorilor caracteristicilor de material (conductivitatea termică în acest caz) care constrâng elementele dintr-un grup definit să devină adiabatic. În timpul simulării fiecare secțiune a cordonului este activată în conformitate cu viteza de sudare.

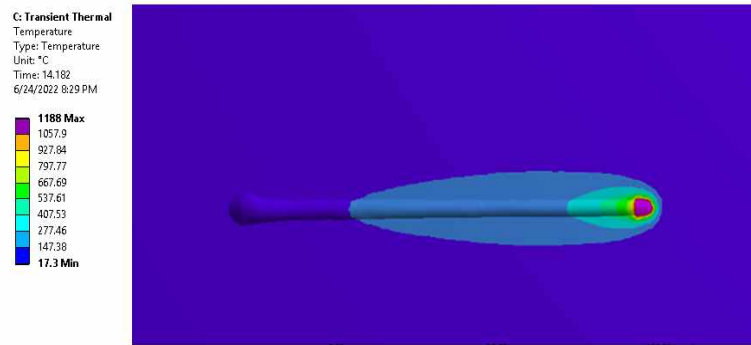
- **Setări privind convecția forțată**

Convecția forțată evaluată în simularea CFD a fost exportată în analiza MEF. În acest caz, importul gradientilor se face pentru fiecare pas de timp individual, în funcție de poziția la care se află torța. Spre exemplu, atunci când secțiunea 1 a cordonului este activă, aceasta apare în simulare cu temperatura de 1800 °C. În paralel, are loc transferul de căldură prin convecție forțată considerând poziția inițială a torței din analiza CFD. După finalizarea ciclului de sudare, răcirea are loc sub efectul convecției libere, considerând teoria plăcii orizontale.

### Procesarea rezultatelor analizei MEF

Rezultatele care pot fi procesate în cazul analizei termice în regim tranzitoriu sunt variația în raport cu timpul a fluxului total de căldură și a distribuției de temperaturi.

Distribuția de temperatură pentru poziția finală a torței este reprezentată în figura 3.14. În acest caz materialul a fost depus pe întreaga lungime sudare. Temperaturile maxime de 1188 °C rămân concentrate la capătul cordonului. Sfera de influență termică devine mai pronunțată în zona de interacțiune. Se observă răcirea progresivă a reperului, valorile temperaturilor procesate în jurul cordonului fiind de 280 °C.

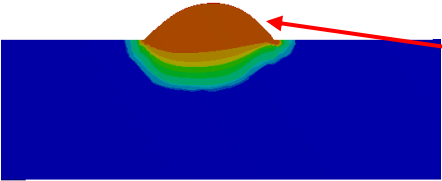
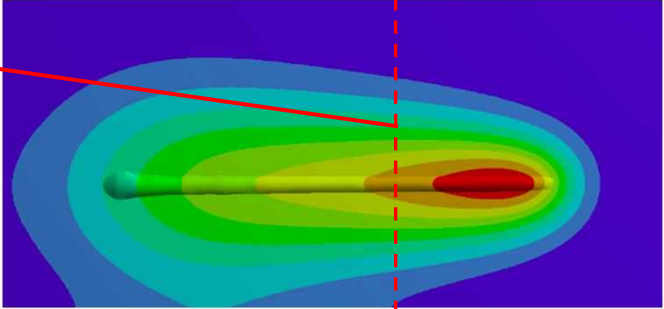
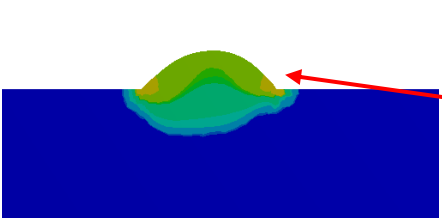
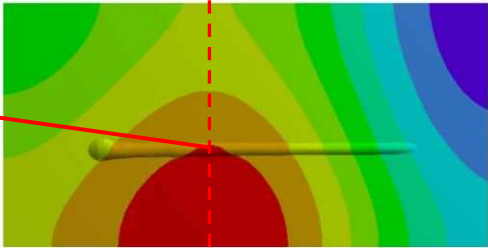


**Fig. 3.14** Distribuția de temperatură la poziția finală a torței

Gradienții de temperatură de pe suprafețele exterioare ale reperului sudat pot fi procesați și pe baza termografiei în infraroșu. Cu toate acestea, rezultatele relevante pentru analiză constituie temperaturile din secțiunea modelului. Acest mod de vizualizare este important pentru a obține o înțelegere detaliată a comportamentului termic al sistemului analizat și a influenței diferitelor variabile asupra acestuia. Astfel se pot detecta zonele cu concentrator de temperatură și se pot identifica posibile probleme termice, cum ar fi punctele fierbinți sau zonele în care are loc răcirea insuficientă. Procesarea rezultatelor în secțiune permite de asemenea și evaluarea dinamicii termice și identificarea schimbărilor de temperatură în profunzime și într-un anumit interval de timp.

Tabelul 3.4 prezintă vizualizarea rezultatelor în secțiune pentru diferite secțiuni ale cordonului. Se consideră secvența de răcire sub efectul convecției libere în două cazuri: imediat după finalizarea ciclului de sudare ( $\Delta t = 17,05$  s) și la finalul ciclului de răcire ( $\Delta t = 160$  s).

**Tabel 3.4** Extras privind temperaturile din modelul de simulare

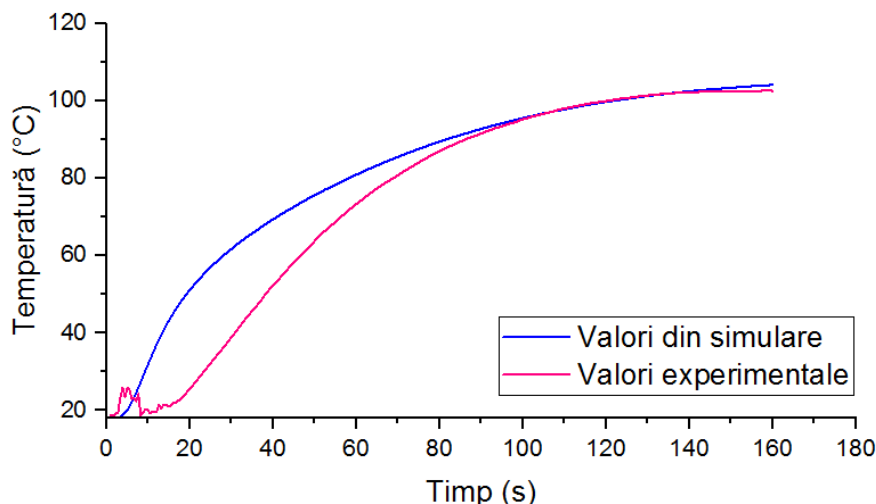
Vedere în secțiune	Vedere de sus
	 <p>C: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 17.05 6/24/2022 8:30 PM</p> <p>432.6 Max 386.57 340.54 294.51 248.48 202.44 156.41 110.38 64.351 18.32 Min</p>
<b>După finalizarea ciclului de sudare</b>	
	 <p>C: Transient Thermal Temperature Type: Temperature Unit: °C Time: 157.4 6/24/2022 8:34 PM</p> <p>118.5 Max 107.53 96.167 85 73.833 62.667 51.5 40.333 29.167 18 Min</p>
<b>După finalizarea ciclului de răcire</b>	

Cele două cazuri ilustrează modul de realizare al transferului de căldură în profunzimea materialului. Acesta este în strânsă legătură cu ZIT, fiind astfel identificată numeric această caracteristică a procedurii de depunere de material prin sudare robotizată.

### Validarea rezultatelor modelului de simulare

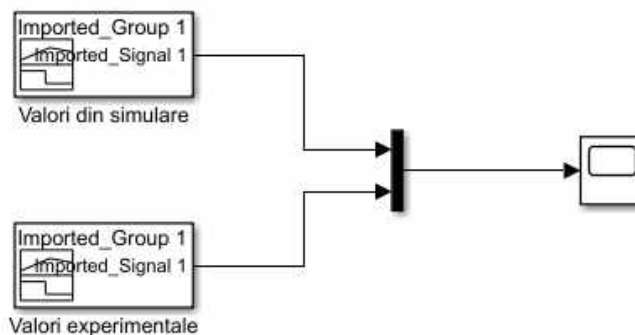
Validarea modelului de simulare presupune compararea rezultatelor obținute prin simulare cu cele experimentale.

Figura 3.15 reprezintă graficul variației temperaturilor măsurate cu pirometrul vs. cele obținute prin simulare.



**Fig 3.15** Comparație între datele obținute prin simulare și cele experimentale

Pentru a evalua acuratețea modelului de simulare este necesară compararea statistică a celor două curbe utilizând mediul de lucru MATLAB Simulink. În acest sens, rezultatele experimentale și cele ale simulărilor sunt importate în format CSV (Fig. 3.16).

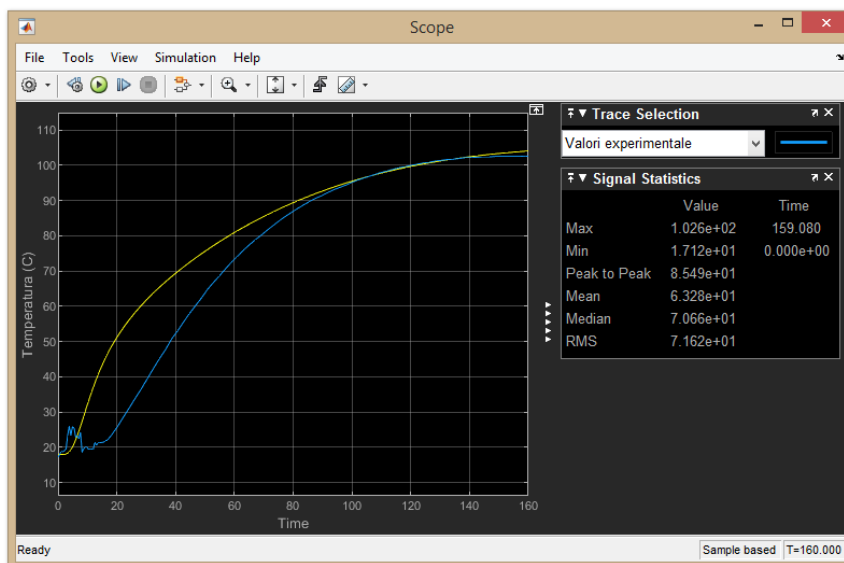


**Fig 3.16** Procesarea temperaturilor măsurate și calculate în MATLAB Simulink

Importul datelor se realizează prin intermediul a două blocuri generatoare de semnal (Imported Signal). Concatenarea acestora pentru a fi reprezentate într-un singur grafic este posibilă prin utilizarea unui bloc multiplexor (MUX). La ieșire se utilizează un bloc pentru vizualizarea grafică a celor două curbe (Scope). Acesta dispune de posibilitatea de analiză statistică a semnalelor, cele relevante fiind:

- Max: valoarea maximă a temperaturii înregistrată pe ordonată;
- Min: valoarea minimă a temperaturii înregistrată pe ordonată;
- Peak to Peak: diferența dintre temperatura minimă și cea maximă;
- Mean: media tuturor valorilor;
- Median: mediana tuturor valorilor;
- RMS: eroarea medie pătratică

Figura 3.17 reprezintă analiza statistică a curbei obținute experimental.



**Fig 3.17** Analiza statistică a semnalelor din MATLAB Simulink

Modelul de simulare poate anticipa cu acuratețe ridicată temperatura maximă în locația de măsurare a pirometrului ( $\varepsilon = 2,11\%$ ). În schimb, o diferență importantă poate fi observată în ceea ce privește timpul de stabilizare, fapt care este confirmat și de eroarea mediană de 11,08%.

### 3.6. Concluzii

Validarea modelului de simulare s-a realizat prin compararea curbei de temperatură obținută din simulare cu cea experimentală. Statisticile celor două semnale au fost interpretate utilizând MATLAB Simulink. Valorile au indicat o bună potrivire la echilibrul termic ( $\varepsilon = 2,11\%$  în cazul valorii maxime). Diferențele de 4,8% dintre valorile minime apar datorită zgomotului din experimente (vizibil în primele 15 secunde datorită interferențelor electromagnetice generate de amorsarea arcului electric).

Cu toate acestea, există o eroare de 11,08% în timpul de stabilizare a sistemului. Aceasta poate fi explicată prin faptul că modelul nu ține cont de dependența în raport cu temperatura a caracteristicilor de material (aceste informații nu sunt furnizate de producător). Prin urmare, corecția răspunsului dinamic se poate obține prin ajustarea capacității sistemului.

Deși modelul de simulare a fost validat pentru un set de parametri, obiectivul cercetărilor este acela de a se obține generalizarea acestuia considerând diferite valori ale debitului de gaz. Totodată, este importantă și îmbunătățirea răspunsului dinamic al sistemului simulat prin reducerea erorii timpului de stabilizare. Aceste aspecte s-au analizat în Capitolul 4.

## **Capitolul 4. Influența variației debitului de gaz asupra transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată**

### 4.1. Introducere

Scopul acestui capitol este acela de a studia influența variației debitului de gaz asupra transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată. Punctul de plecare este modelul de simulare dezvoltat anterior. Acesta trebuie parametrizat pentru a ține cont de valorile

diferite ale mărimilor de intrare. În acest studiu se ține cont de geometria cordonului, temperaturile segmentelor acestuia și debitul de gaz. La ieșire este surprinsă variația temperaturilor într-o locație aflată în afara ZIT.

Parcurgerea întregului flux de modelare - simulare din Capitolul 3 este inefficientă din punct de vedere al resurselor implicate. Acest fapt se datorează preponderent procesului de reverse engineering pentru reconstrucția geometriei și dimensiunii mari a fișierelor de rezultate.

Pentru a compensa eventualele surse de eroare cum ar fi: necunoașterea caracteristicilor de material dependente în raport cu temperatura sau idealizarea interacțiunii dintre corpuri s-au realizat corecții privind capacitanța și conductanța la interfață prin utilizarea unor parametri concentrați și a teoriei sistemelor de ordinul I cu întârziere (First Order Plus Dead Time – FOPDT). În acest sens, s-a studiat răspunsul sistemului la un semnal treaptă pentru identificarea unei funcții de transfer descrisă printr-un singur pol.

În următoarea etapă s-au realizat modificări succesive ale factorului de amplificare și a constantei de timp a modelului, până când s-a obținut potrivirea dintre curbele de temperatură experimentale și cele simulate. Reprezentarea grafică a acestor coeficienți vs. debitul de gaz a permis generalizarea relației de dependență găsite pentru utilizarea ulterioară în oricare caz practic.

Figura 4.1 ilustrează principalele etape ale abordării propuse.

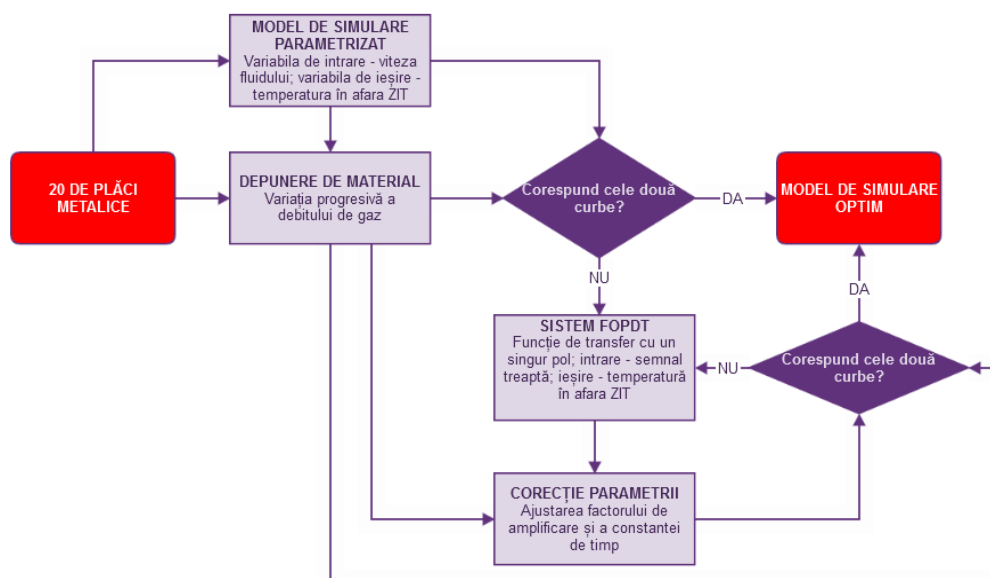


Fig. 4.1. Etapele elaborării modelului de simulare parametrizat

## 4.2. Obiective

Capitolul 4 urmărește obiectivul numărul 4 al Tezei de doctorat:

- **OBIECTIV 4:** Identificarea și generalizarea răspunsului termo-dinamic al sistemului studiat

## 4.3. Cercetări experimentale privind influența variației debitului de gaz asupra transferului de căldură

Realizarea experimentelor presupune stabilirea unor regimuri de sudare pentru fiecare set de plăci pe care se va depune material prin sudare robotizată. Următorii parametrii vor fi considerați constanți, în timp ce debitul de gaz ( $d_g$ ) variază progresiv cu valorile 10 l/min, 13,5 l/min, 17 l/min, 20,5 l/min, 24 l/min: pentru setul 3, iar pentru seturile 4,5,6,7,8 cu valorile 10 l/min, 17 l/min, 24 l/min: • Intensitatea curentului (I); • Tensiunea (U); • Viteza de sudare ( $v_s$ ); • Diametrul electrodului ( $d_e$ ); • Viteza de avans a sârmei electrod ( $v_a$ ); • Lungimea liberă a sârmei electrod ( $l_{cl}$ ).

### Parametrii regimului tehnologic

Tabelul 4.1 prezintă parametrii regimului tehnologic pentru cele 6 seturi de repere.

**Tabel 4.1** Parametrii regimului tehnologic

Parametrii	Set					
	Torța perpendiculară		Torța înclinată la 15°			
	3	4	5	6	7	8
I [A]	190	320	160	280	190	320
U [V]	18,9	31,7	17,7	29,2	18,9	31,7
$v_s$ [cm/min]	45	55	45	55	45	55
$d_e$ [mm]	1,2					
$v_a$ [m/min]	4,7	11	3,9	9	4,7	11
$l_{cl}$ [mm]	15					

### Descrierea procedurii experimentale

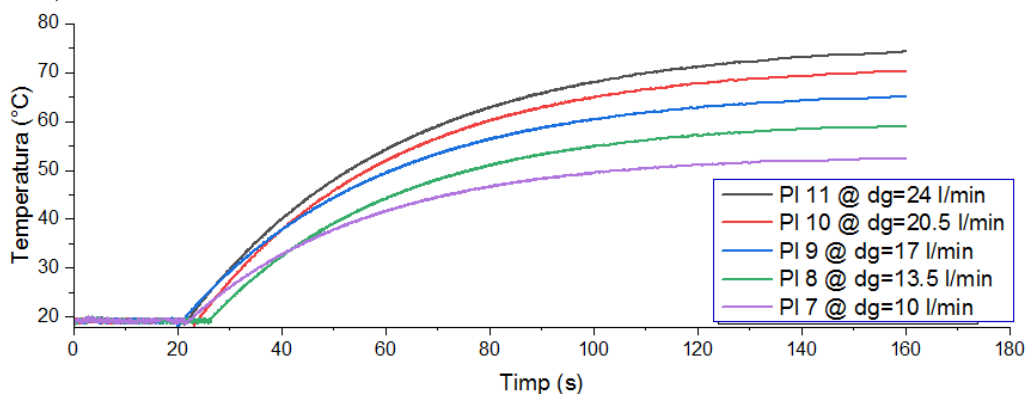
Procedura experimentală este identică cu cea prezentată în Capitolul 3

Setul 3 include un număr de 5 plăci, oferind o bază de date extinsă pentru comportarea sistemului analizat. Totodată, se pot cuantifica mai precis erorile sau incertitudinile asociate rezultatelor și se pot pune mai bine în evidență factorii de influență și tendințele de variație a curbelor de temperatură.

### Curbele de variație a temperaturilor

Rezultatele temperaturilor măsurate cu pirometrul Raynger MX4 sunt prezentate în figura 4.2 pentru cele 6 seturi de repere studiate.

Figura 4.2 reprezintă curbele de variație ale temperaturilor pentru setul 3 de plăci (notate de la PI 7 la PI 11).



**Fig. 4.2.** Curbele de temperatură obținute pentru setul cu numărul 3 de plăci (PI 7 – PI 11)

Studiul s-a continuat prin teoria sistemelor și pentru fiecare placă din set s-au prezentat comparativ următoarele caracteristici: • Peak (vârf): reprezintă 2% din valoarea maximă a temperaturilor; • Rise Time (timp de creștere): reprezintă intervalul de timp necesar pentru ca răspunsul sistemului să treacă de la temperatura mediului ambiant la 90% din valoarea de vârf; • Settling Time (timp de stabilizare): reprezintă intervalul de timp necesar pentru ca răspunsul sistemului să se apropie cu 2% de valoarea sa finală în urma unei perturbații la intrare. În acest caz perturbația este indusă de ciclul de sudare.

Pe baza analizei comportării dinamice a curbelor de temperatură studiate cu ajutorul programului MATLAB se pot formula următoarele concluzii:

- Variația debitului de gaz în timpul procesului de depunere a materialului prin sudare robotizată duce la creșterea liniară a temperaturilor (T) după următoarele relații:
  - Set 3:  $T = (1,56 \cdot d_g) + 22,5$
  - Set 4:  $T = (3,33 \cdot d_g) + 25,09$
  - Set 5:  $T = (0,42 \cdot d_g) + 24,06$
  - Set 6:  $T = (1,4 \cdot d_g) + 50,59$
  - Set 7:  $T = (0,34 \cdot d_g) + 30,8$
  - Set 8:  $T = (0,58 \cdot d_g) + 76,5$
- Variația debitului de gaz în timpul procesului de depunere a materialului prin sudare robotizată duce la creșterea liniară a timpilor stabilizare ( $t_s$ ) după următoarele relații:
  - Set 3:  $t_s = (4,10 \cdot d_g) + 97,7$
  - Set 4:  $t_s = (0,83 \cdot d_g) + 167$
  - Set 5:  $t_s = (0,34 \cdot d_g) + 139$
  - Set 6:  $t_s = (1,55 \cdot d_g) + 186$
  - Set 7:  $t_s = (1,56 \cdot d_g) + 22,5$
  - Set 8:  $t_s = (1,92 \cdot d_g) + 148$

În consecință, transferul de căldură în procesul de depunere a materialului prin sudare robotizată este influențat de gazul de protecție prin relația de proporționalitate care există între debitul acestuia și caracteristicile dinamice ale curbelor de temperatură caracteristice. Studiul evidențiază faptul că această condiție este valabilă indiferent de parametrii regimului tehnologic sau de modul de transfer al materialului de adaos.

#### 4.4 Parametrizarea modelului de simulare

Modelul de simulare prezentat în Capitolul 3 al Tezei de doctorat este utilizat pentru parametrizarea geometriei și vitezei fluidului (ca variabile de intrare) și evoluția în timp a temperaturilor (ca variabilă de răspuns). Cu toate că această procedură se poate realiza direct în interfața ANSYS Workbench, în teza de doctorat au fost introduse prin contribuții originale o serie de particularități de modelare și parametrizare. Acestea sunt descrise în cele ce urmează.

## Parametrizarea modelului geometric

Parametrizarea modelului geometric presupune extragerea formei suprafețelor secțiunilor transversale ale celor 27 de segmente în care este divizat cordonul de sudură (Fig. 4.3). Suprafețele rezultate sunt caracterizate prin aria ( $s$ ) care este constrânsă de factorii de scalare pe direcție transversală și radială ( $a$  și  $b$ ). Aceștia pot fi definiți drept parametri în interfața DesignModeler. Legăturile dintre secțiuni pot fi realizate pe baza unor curbe 3D ( $c$ ). Punctele care definesc extremitățile curbelor aparțin suprafețelor scalate. Reconstruirea corpului solid pe baza suprafețelor și curbelor permite parametrizarea integrală a cordonului de sudură. Astfel, acesta poate fi scalat pentru a respecta corect dimensiunile obținute din scanările 3D pentru fiecare caz studiat.

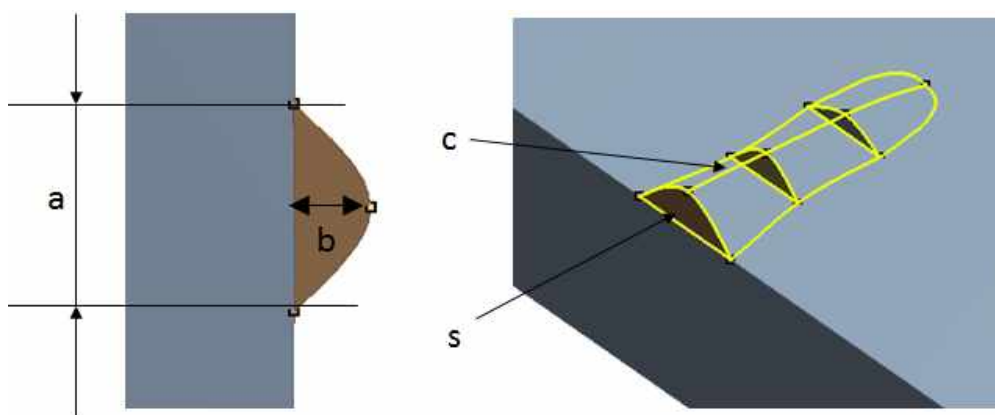


Fig. 4.3. Reprezentarea parametrizată a suprafețelor care definesc cordonul de sudură

În figura 4.4 este ilustrat un exemplu de reconstruire parametrizată a depunerii prin sudură. Modelul aparține setului setului 4 – Pl 12.

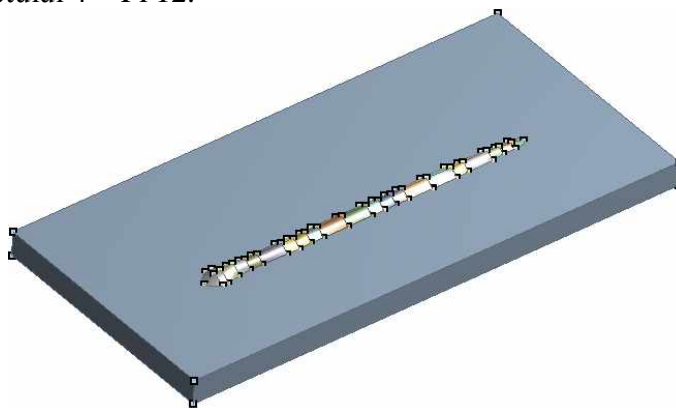


Fig. 4.4. Modelul geometric după parametrizarea acestuia - setul 4 – Pl 12

## Parametrizarea vitezei fluidului

Parametrizarea directă a modelului în interfața ANSYS CFX nu este posibilă datorită strategiei de transfer CFD-MEF a coeficienților de convecție în format tabelar. Din acest motiv se impune folosirea unei strategii alternative. Pentru aceasta a fost realizat un studiu de variație care are scop creșterea progresivă a vitezei gazului în modelul de simulare și reprezentarea grafică a variației coeficientului de convecție în diferite poziții ale torței (Fig. 4.5)



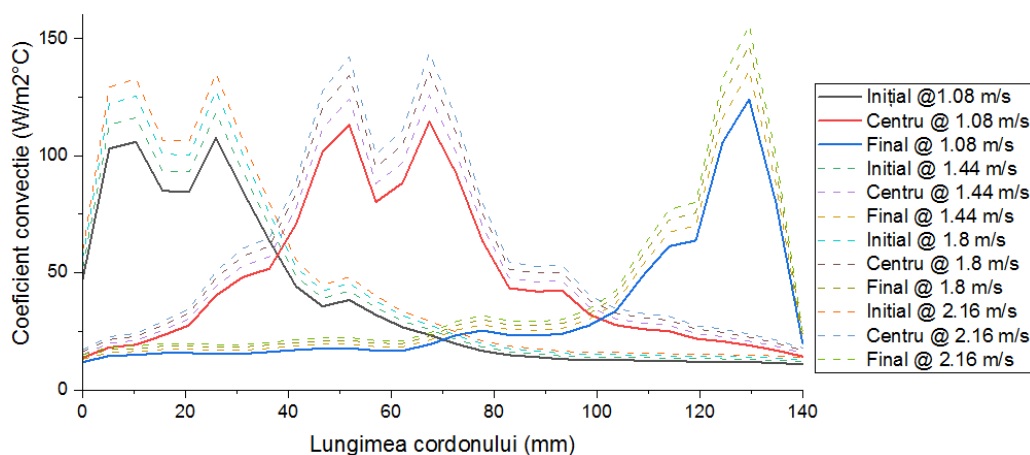


Fig. 4.5 Variația coeficientului de convecție în funcție de debit

Studiul evidențiază faptul că traseul de curgere al gazului nu este influențat de viteza gazului. Pe de altă parte se poate observa faptul că valoarea coeficientului de convecție variază după o lege polinomială (Fig 4.6).

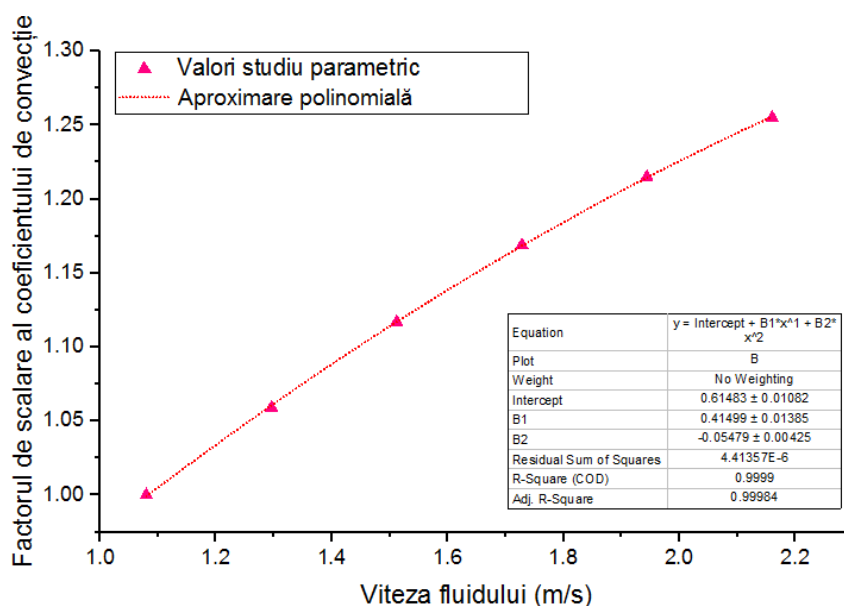


Fig. 4.6. Variația coeficientului de convecție în funcție de viteza gazului

Legea poate fi descrisă prin relația:

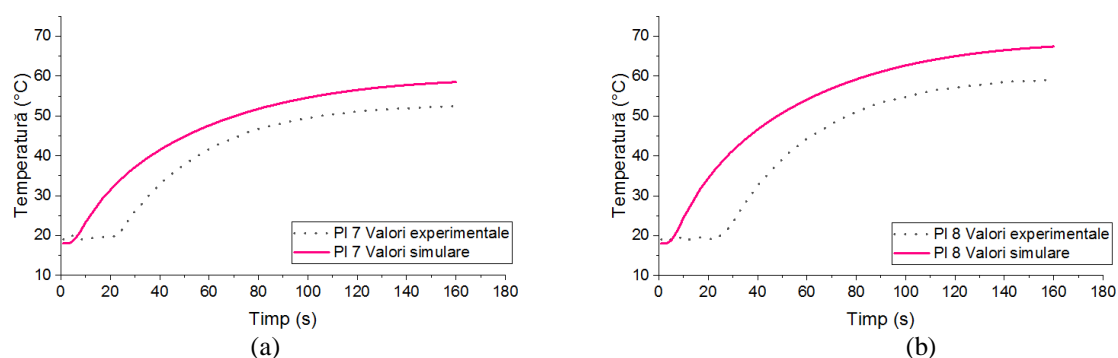
$$h = -0,0643 \cdot v^2 + 0,449 \cdot v + 0,585 \quad (4.1)$$

Unde  $h$  reprezintă coeficientul de convecție în oricare locație a modelului și  $v$  viteza fluidului.

### Verificarea modelului de simulare

În urma parametrizării modelului de simulare se realizează verificarea rezultatelor obținute pentru setul 3 de repere sudate.

Figura 4.7 a și b evidențiază diferențele dintre graficele variației temperaturilor măsurate cu pirometrul și cele obținute prin simulare pentru plăcile 7 și 8 din setul 3.



**Fig. 4.7.** Variația temperaturilor calculate și măsurate pentru setul 3, PI 7 și PI 8

Caracteristicile dinamice ale curbelor rezultate pentru cele două plăci sunt prezentate în tabelul 4.2

**Tabel 4.2** Caracteristicile sistemului dinamic pentru setul 3 PI 7 și PI 8

Caracteristica	PI 7			PI 8		
	Experimente	Simulări	$\Delta$ [%]	Experimente	Simulări	$\Delta$ [%]
<b>Vârf [°C]</b>	37,44	27,00	27,88	43,97	33,00	24,95
<b>Timp de creștere [s]</b>	75,14	35,99	52,10	86,12	41,43	51,90
<b>Timp de stabilizare [s]</b>	133,79	64,09		153,35	73,76	

Cu toate că alura curbelor este similară, se observă o diferență considerabilă între temperaturile și caracteristicile dinamice ale curbelor obținute prin simulări și cele măsurate experimental. Diferența maximă dintre valorile de vârf este de 27% în cazul plăcii 7, în timp ce timpii de stabilizare și cei de creștere diferă cu 51,8 și respectiv 52,7% pentru toate cazurile.

Într-un model generalizat erorile detectate în acest studiu se cumulează cu cele prezentate în Capitolul 3 al Tezei de doctorat necesitând găsirea unor strategii de compensare.

#### Explicarea teoretică a surselor de eroare

Diferența de temperatură care apare datorită variației debitului de gaz în cazul sudării cu arc electric poate fi explicată prin teoria transferului de căldură prin convecție.

Variația debitului gazului de protecție duce la creșterea presiunii exercitate asupra materialului depus în timpul sudării. Astfel, se elimină micro-golurile și se asigură un contact mai ferm între materialul de bază și cel de adaos. Prin urmare, rezistența termică scade în timp ce cantitatea de căldură cedată materialului de adaos crește.

#### 4.5. Utilizarea sistemelor de ordinul I

Sistemele termice includ în componența lor elemente capabile să acumuleze și să transfere cantități semnificative de energie cu viteză finită. În teoria sistemelor, modelarea acestora se poate realiza prin utilizarea sistemelor de ordinul 1 [181]. Astfel de ecuații diferențiale pot oferi o descriere simplificată, dar suficient de precisă a răspunsului termic pe baza unei singure variabile de intrare și de ieșire. Spre exemplu, fluxul de căldură datorat procesului de sudare constituie intrarea în sistem, pe când variația temperaturii în raport cu timpul constituie mărimea de răspuns.

Ecuația diferențială care face legătura dintre mărimea de intrare  $R(s)$  și cea de ieșire  $C(s)$  poate fi descrisă în domeniul de frecvență ca fiind [182]:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = K \cdot \frac{1}{\tau s + 1} \quad (4.2)$$

Unde: K reprezintă factorul de amplificare și  $\tau$  constanta de timp a sistemului.

În cazul sistemelor termice, constantele din ecuația 4.6 sunt în strânsă legătură cu caracteristicile de material. Spre exemplu, conductivitatea termică constrânge temperatura de echilibru, aceasta fiind direct proporțională cu factorul de amplificare. Pe de altă parte, constanta de timp poate fi corelată cu căldura specifică. Alături de densitatea materialului, aceasta determină timpul în care sistemul atinge starea de echilibru.

Condițiile de simulare precum solicitările impuse pot fi controlate pe baza amplitudinii semnalului de intrare. Prin cunoașterea valorilor inițiale ale sistemului se pot varia parametrii pentru realizarea unor studii fără a mai fi necesară rezolvarea ecuațiilor aferente analizei termice în regim tranzitoriu. Obiectivul este acela de a determina corecțiile aplicabile modelului de simulare pentru ca acesta să reproducă cu fidelitate transferul de căldură evaluat experimental.

În cazul analizei termice în regim tranzitoriu, constrângerea fluxului de căldură datorat interacțiunii a două corpuri poate fi realizată prin utilizarea unor elemente unidimensionale. Acestea fac legătura dintre nodurile suprafețelor aflate în contact și permit limitarea sau îmbunătățirea transferului datorat conducției pe baza teoriei rezistențelor termice [183]:

$$q = R_{th} \cdot (T_i - T_j) \quad (4.3)$$

Unde: q reprezintă căldura transferată între nodurile elementului,  $R_{th}$  conductanța termică,  $T_{i,j}$  temperaturile nodale.

În acest fel, cunoscând diferența dintre constanta de amplificare experimentală și cea obținută în urma simulărilor se poate realiza corecția conductanței la interfață.

Pe de altă parte, diferența dintre constanta de timp determinată experimental și cea rezultată în urma simulărilor poate fi corectată prin utilizarea elementelor de capacitanță. Acestea modelează matricea căldurii specifice sub forma:

$$[C_e^t] = [C_{th}] \quad (4.4)$$

Unde:  $C_{th}$  reprezintă capacitanța termică.

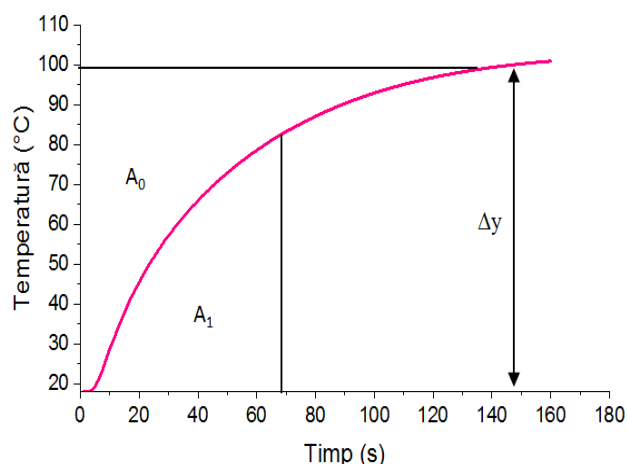
Un alt rol al elementelor de capacitanță este acela de a impune întârzierea răspunsului sistemului. În cazul analizei termice, întârzierea datorată sistemului de achiziție este considerată neglijabilă. Având în vedere faptul că piometrul dispune de o anumită rată de eșantionare, la procesarea valorilor experimentale este necesară includerea timpului mort în ecuația 4.6, rezultând un sistem de ordin 1 cu întârziere [184]:

$$\frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (4.5)$$

Unde  $\theta$  reprezintă întârzierea sistemului.

## Identificarea constantelor sistemului

O etapă importantă pentru aproximarea modelului de simulare printr-un sistem de ordinul I cu întârziere o constituie identificarea constantelor K,  $\tau$  și  $\theta$  pentru fiecare caz studiat. În acest scop este utilizată Metoda suprafeței curbilor propusă de Nishikawa [185]. Figura 4.8 reprezintă locația mărginită de cele două suprafețe ( $A_0$  și  $A_1$ ) în cazul setului cu numărul 3, placa 11.



**Fig. 4.8.** Reprezentarea suprafețelor necesare pentru identificarea sistemelor prin metoda Nishikawa

Conform notațiilor din figura 4.16, relațiile de calcul sunt [185]:

$$A_0 = \int_0^{\infty} (\Delta y(\infty) - \Delta y(t)) dt \quad (4.6)$$

$$A_1 = \int_0^{t_0} (\Delta y(t)) dt \therefore t_0 = \frac{A_0}{\Delta y(\infty)} \quad (4.7)$$

Prin urmare, constantele sistemului de ordinul 1 pot fi evaluate pe baza:

$$k = \frac{A_1}{0,368 \Delta y(\infty)} \quad (4.8)$$

$$\theta = t_0 - \tau \quad (4.9)$$

Verificarea preciziei modelului se face pe baza erorii medii pătratice [186]:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - P_t}{A_t} \right| \cdot 100 \quad (4.10)$$

Unde  $A_t$  reprezintă valoarea curentă,  $P_t$  valoarea anticipată și  $n$  numărul de plăci.

Implementarea algoritmului s-a realizat în MATLAB.

În primă fază se definesc variabilele de lucru. Acestea sunt importate în mediul de lucru sub formă de vectori, având notațiile:  $t$  pentru pasul de timp,  $u$  pentru amplitudinea semnalului de tip treaptă la intrarea în sistem și  $y$  valoarea temperaturilor măsurată experimental pentru fiecare pas de timp.

Tabelul 4.3 prezintă valorile  $K$ ,  $\theta$  și  $\tau$  obținute în urma procesării temperaturilor măsurate pentru cele 5 plăci aparținând setului 3. Eroarea medie pătratică ( $M$ ) este calculată pe baza răspunsului treaptă al sistemului raportat la valorile inițiale.

**Tabel 4.3** Factorul de amplificarea, întârzierea și constanta de timp pentru temperaturile măsurate setul 3

Placa	K	$\theta$	$\tau$	M[%]
7	57,5	21,1	37	0,45
8	53,2	23,1	32,8	0,46
9	48	20,1	27,5	0,51
10	41,8	25,1	25,9	0,39
11	34,9	21,1	24,5	0,32

Aceleași rezultate sunt procesate în tabelul 4.4 considerând variația temperaturilor în raport cu timpul pentru cele 5 plăci, obținută în urma studiului parametrizat.

**Tabel 4.4** Factorul de amplificare, întârzierea și constanta de timp pentru temperaturile din simulare setul 3

Placa	K	$\theta$	$\tau$	M
7	85,93	4,2	74,57	0,32%
8	73,72	4,2	59,43	0,33%
9	62,51	4,2	49,38	0,33%
10	52,42	4,2	40,68	0,32%
11	43,50	4,2	33,31	0,32%

**Evaluarea corecțiilor necesare**

Diferența dintre erorile constantelor sistemelor de ordin 1 determinate experimental cu Nishikawa și cele obținute prin procesarea simulărilor tot cu Nishikawa sunt prezentate în tabelul 4.5.

**Tabel 4.5** Eroarea dintre constantele sistemelor de ordin 1 experimentale și simulări

Placa	Eroare [%]		
	K	$\theta$	$\tau$
7	49,44	80,09	101,54
8	38,57	81,82	81,19
9	30,23	79,10	79,56
10	25,41	83,27	57,07
11	24,64	80,09	35,96

Compensarea acestor erori se poate realiza prin determinarea coeficienților de corecție pe baza relațiilor:

$$C_K = \frac{k_{\text{experimental}}}{k_{\text{simulare}}}; C_\theta = \frac{\theta_{\text{experimental}}}{\theta_{\text{simulare}}}; C_\tau = \frac{\tau_{\text{experimental}}}{\tau_{\text{simulare}}} \quad (4.11)$$

Unde: C reprezintă coeficienții de corecție. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 4.6 pentru fiecare placă sudată din setul 3.

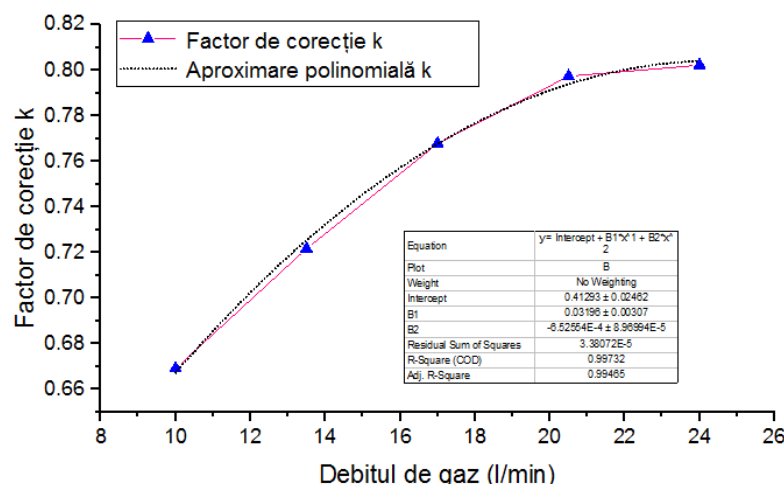
**Tabel 4.6** Coeficienții de corecție calculați

Placa	Coeficient de corecție		
	$C_K$	$C_\theta$	$C_\tau$
7	0,67	5,02	0,50
8	0,72	5,50	0,55
9	0,77	4,79	0,56
10	0,80	5,98	0,64
11	0,80	5,02	0,74

**Generalizarea coeficienților de corecție**

Generalizarea coeficienților de corecție presupune adaptarea acestora pentru a compensa erorile care apar între modelul de simulare și comportamentul real al procesului de depunere a materialului prin sudare robotizată pentru oricare valori ale intensității curentului și a debitului de gaz.

Reprezentarea grafică a coeficienților de corecție pentru factorul de amplificare K vs. debitul de gaz este ilustrată în figura 4.9.



**Fig. 4.9.** Reprezentarea grafică a relației dintre coeficientul de corecție pentru K și debitul de gaz

După reprezentarea grafică a factorilor de corecție pentru K se observă tendința de regresie polinomială a acestora. Pentru aproximarea lor se poate utiliza o funcție de gradul 2:

$$C_k = -0,0007 \cdot d_g^2 + 0,032 \cdot d_g + 0,4129 \quad (4.12)$$

Pentru estimarea valorilor  $\theta$  se poate utiliza o aproximare liniară:

$$C_\theta = 0,0136 \cdot d_g + 5,03 \quad (4.13)$$

Corecțiile pentru factorul  $\tau$  se află în regresie polinomială, putând fi descrise prin relația:

$$C_\tau = 0,0009 \cdot d_g^2 + 0,0158 \cdot d_g + 0,57 \quad (4.14)$$

În ecuațiile 4.12 – 4.14 variabila este reprezentată de debitul de gaz. Pentru generalizarea relației pentru încă un parametru al regimului de sudare, constantele sunt exprimate în funcție de intensitatea curentului de sudare.

Astfel, în cazul factorului de corecție pentru K relația 4.16 poate fi rescrisă ca:

$$C_k = -\frac{0,13}{I} \cdot d_g^2 + \frac{6,08}{I} \cdot d_g + \frac{78,45}{I} \quad (4.15)$$

Dând factor comun raportul dintre debit și intensitate, rezultă:

$$C_k = \frac{d_g}{I} \cdot \left( -0,13 \cdot d_g + 6,08 + \frac{78,45}{d_g} \right) \quad (4.16)$$

În forma canonică, relația 4.15 poate fi scrisă ca:

$$C_k = \frac{1}{I} \cdot \left( -0,13 \cdot d_g^2 + 6,08 \cdot d_g + 78,45 \right) \quad (4.17)$$

Similar, în cazul constantei de timp:

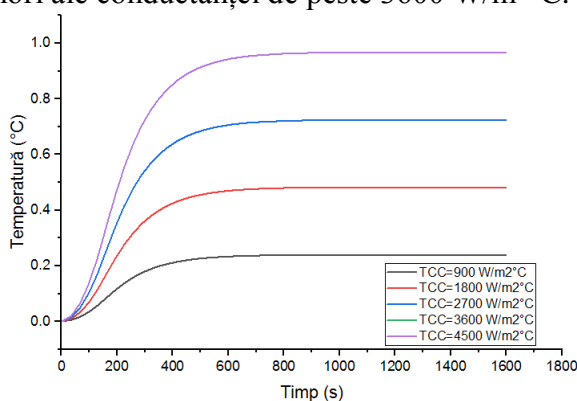
$$C_\tau = \frac{1}{I} \cdot \left( 0,17 \cdot d_g^2 + 3 \cdot d_g + 108,32 \right) \quad (4.18)$$

Metodologia prezentată este aplicabilă exclusiv sistemelor de ordin 1 cu întârziere. Cu toate acestea, este necesară o corelare a valorilor constantelor  $K$ ,  $\theta$  și  $\tau$  pentru includerea factorilor de corecție în modelul de simulare. În acest sens în simularea MEF s-au utilizat elemente unidimensionale de conductanță termică și adimensionale pentru capacitanță. S-a dezvoltat astfel un model de simulare pe care se poate studia sensibilitatea modelului și a transferului de căldură la includerea unor elemente de corecție pentru analiza termică în regim tranzitoriu.

În prima etapă contactul dintre cordonul de sudură și reper este înlocuit cu elemente 1D. Nodurile care se află pe planul de separație vor putea face schimb de căldură pe baza principiului rezistențelor termice. Pe de altă parte, nodurilor aferente zonei în care se face achiziția datelor de către pirometru se asociază un element 0D de tip "thermal mass".

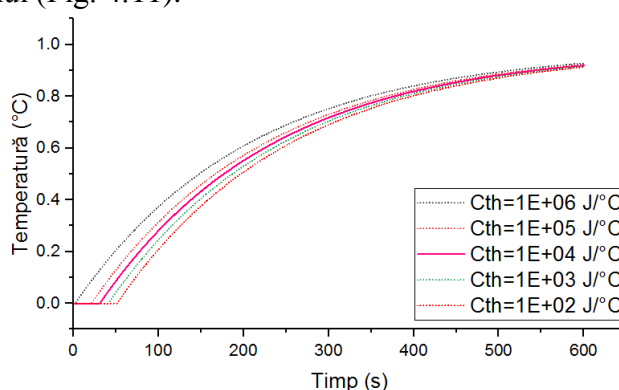
Acesta va impune atât o întârziere inițială a sistemului, cât și a timpului necesar pentru ca acesta să atingă starea de echilibru. Pe acest model s-a realizat un studiu parametrizat pentru evaluarea valorilor inițiale ale conductanței termice. În acest scop, temperaturile impuse la nivelul cordonului sunt setate la  $1^{\circ}\text{C}$ , în timp ce temperatura mediului ambiant este considerată  $0^{\circ}\text{C}$ . Transferul de căldură se face doar prin conducție și convecție liberă. Timpul de simulare este extins la 1600 de secunde.

Figura 4.10 prezintă rezultatele obținute pentru valori ale conductanței termice (notată cu TCC) cuprinse între 900 și  $4500\text{ W/m}^2\text{C}$ . Se observă faptul că temperatura de echilibru a sistemului nu mai variază la valori ale conductanței de peste  $3600\text{ W/m}^2\text{C}$ .



**Fig. 4.10.** Variația temperaturii în raport cu conductanța termică

Similar, în cazul capacității termice (notată cu  $C_{th}$ ), valoarea de  $1 \cdot 10^4\text{ J/}^{\circ}\text{C}$  satisface întârzierea necesară sistemului (Fig. 4.11).



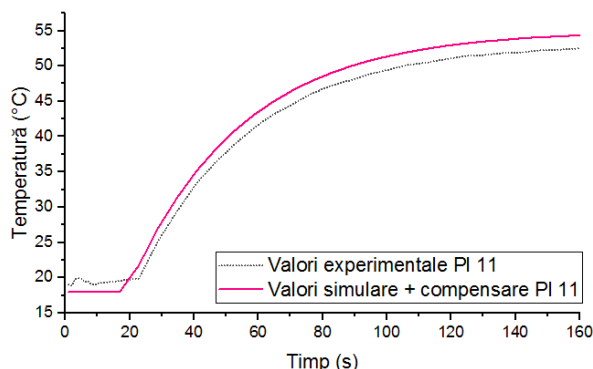
**Fig. 4.11.** Variația temperaturii în timp a sistemului în raport cu capacitanța termică

Astfel, factorii de corecție prezentați în tabelul 4.15 sunt înmulțiți cu 3600 pentru  $K$ , iar cei din tabelul 4.16 cu  $1 \cdot 10^4$  pentru  $\tau$ . Aceștia sunt transpuși apoi în mediul de simulare pentru compensarea erorilor modelului pentru orice caz studiat.

#### 4.6. Verificarea noului model de simulare propus

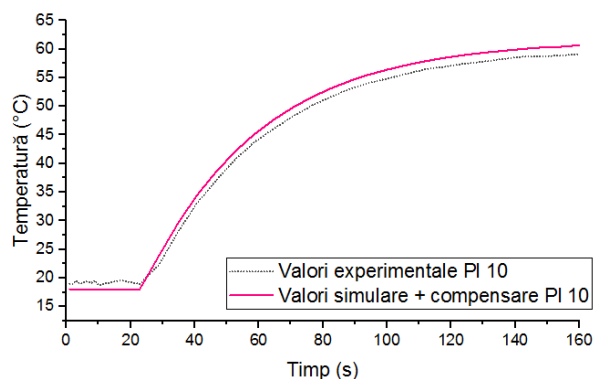
Verificarea abordării propuse se face inițial considerând setul 3 de plăci.

Figura 4.12 ilustrează curbele temperaturilor măsurate cu pirometrul alături de cele obținute prin simulare MEF (analiză termică în regim tranzitoriu) după aplicarea corecțiilor de conductanță și capacitanță în modelul cu elemente finite pentru placa 11 din setul 3.



**Fig. 4.12.** Variația temperaturii în raport cu timpul pentru placa 11. Experimental vs. MEF

Figura 4.13 prezintă curbele temperaturilor experimentale alături de cele obținute în urma aplicării corecțiilor de conductanță și capacitanță în modelul de simulare pentru placa 10 din setul 3.



**Fig. 4.13.** Variația temperaturii în raport cu timpul pentru placa 10. Experimental vs. MEF

Caracteristicile sistemului dinamic sunt prezentate în tabelul 4.7.

**Tabel 4.7** Caracteristicile sistemului dinamic pentru setul 3 – Placa 10 și Placa 11

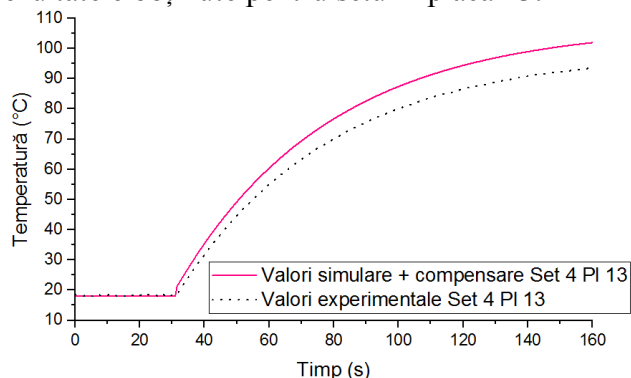
Caracteristica	PI 11			PI 10		
	Experimente	Simulări	$\Delta$ [%]	Experimente	Simulări	$\Delta$ [%]
<b>Vârf [°C]</b>	59,24	56,77	4,17	55,15	54,23	1,66
<b>Timp de creștere [s]</b>	105,90	103,54	2,22	105,24	101,92	3,15
<b>Timp de stabilizare [s]</b>	188,56	184,30		187,39	181,49	

Se observă faptul că eroarea temperaturii de vârf a scăzut la o valoare maximă de 1,66%, în timp ce în cazul timpului de urcare și al celui de stabilizare poate fi observată o eroare de 3,15%.



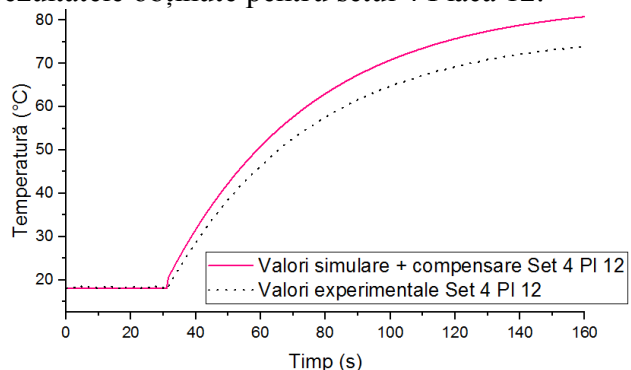
Rezultatele obținute atestă precizia modelului pentru cele 5 plăci studiate. Cu toate acestea, verificarea gradului de generalizare al modelului se poate face numai prin extinderea studiului pentru setul 4 de plăci.

Figura 4.14 prezintă rezultatele obținute pentru setul 4 placa 13.



**Fig. 4.14.** Variația temperaturii în raport cu timpul pentru placa 13. Experimental vs. MEF

Figura 4.15 prezintă rezultatele obținute pentru setul 4 Placa 12.



**Fig. 4.15.** Variația temperaturii în raport cu timpul pentru placa 12. Experimental vs. MEF

În cele două cazuri se observă o diferență între valorile experimentale și cele obținute în urma simulărilor. Caracteristicile sistemului dinamic sunt comparate în tabelul 4.8.

**Tabel 4.8** Caracteristicile sistemului dinamic pentru setul 4 – Placa 12 și Placa 13

Caracteristica	PI 12			PI 13		
	Experimente	Simulări	$\Delta$ [%]	Experimente	Simulări	$\Delta$ [%]
Vârf [°C]	59,00	53,03	10,12	80,70	72,22	10,50
Timp de creștere [s]	96,94	89,46	7,72	106,27	98,46	7,35
Timp de stabilizare [s]	172,62	159,29		189,23	175,32	

În acest caz, eroarea temperaturii de vârf este de 10,50%. Pe de altă parte, eroarea timpului de urcare și a celui de stabilizare este de 7,35%.

Se observă erori similare cu cele obținute în cazul plăcilor 12 și 13 din cadrul aceluiași set. Rezultatele obținute indică faptul că abordarea poate fi utilizată pentru a realiza predicții privind transferul de căldură pentru cazuri care nu au fost studiate inițial. Cu toate acestea, este necesară

atât extinderea cercetărilor pentru creșterea gradului de generalizare al modelului, cât și diminuarea erorilor. Aceste aspecte s-au analizat în capitolul 5 al Tezei de doctorat.

#### 4.7. Concluzii

Prezentul capitol a avut ca scop studiul influenței variației debitului de gaz asupra transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată.

Generalitatea modelului a fost verificată pentru setul 4. În acest caz, eroarea temperaturii de vârf este de 10,50%. Pe de altă parte, eroarea timpului de urcare și a celui de stabilizare este de 7,35%. Aceste valori sunt evident reduse față de cele inițiale. Cu toate acestea, este necesară atât extinderea cercetărilor pentru creșterea gradului de generalizare al modelului, cât și diminuarea erorilor. Aceste aspecte s-au analizat în capitolul 5 al Tezei de doctorat.

Rezultatele obținute au confirmat faptul că modelul de simulare poate fi folosit atât pentru plăcile studiate, dar și pentru anticiparea transferului termic la depunerile prin sudură robotizată pentru alte plăci și regimuri de sudare.

### **Capitolul 5. Influența variației debitului de gaz asupra macrostructurii și microstructurii reperelor la depunerea de material prin sudare robotizată**

#### 5.1. Introducere

Scopul acestui capitol a constat în realizarea analizelor vizuale și în profil a sudurilor în secțiune transversală, pentru a evidenția efectele parametrilor regimului de sudare asupra configurației geometrice a materialului depus.

Au fost investigate efectele individuale și combinate ale debitului de gaz de protecție și ale unghiului de înclinare a pistolului de sudare robotizat în raport cu axa sudurii.

S-au luat în considerare șase regimuri de sudare, cu pistolul robotizat poziționat perpendicular pe suprafața de sudare. Pentru aceleași regimuri, pistolul robotizat a fost înclinat la un unghi de aproximativ 15° față de normala la suprafața materialelor sudate.

În cadrul analizei macroscopice s-a efectuat o inspecție vizuală și măsurări cu șublerul electronic pe 26 plăci. Parametrii urmăriți în această analiză au inclus: numărul de stropi, crustele de zgură, neuniformitățile geometrice, craterul marginal, depunerile de pelicule solide, lățimea cordonului și înălțimea cordonului.

Pentru analiza microscopică s-au prelevat probe din opt seturi, din aceeași zonă a plăcilor, utilizând o mașină de debitat. Suprafețele inspectate au fost șlefuite cu o mașină specială, tratate chimic și curățate. Parametrii inspectați în analiza microscopică sunt: dimensiunile ZIT la suprafața cordonului și la rădăcina acestuia, aspectul sudurii și unghiul de racordare.

S-a acordat atenție calculării a doi parametri esențiali: diluțiile și ariile cordoanelor de sudură în secțiune. În partea finală a capitolului, s-a corelat variația mărimii de răspuns cu microstructura și macrostructura reperelor studiate.

Rezultatele studiului defectoscopic au fost utilizate pentru dezvoltarea unui model de regresie liniară multiplă. Acesta ține cont de variabile independente care prezintă o relație de liniaritate față de coeficienții de corecție ai conductanței și capacității identificați în Capitolul 4 al Tezei de doctorat.

O prezentare schematică a etapelor cercetărilor și a obiectivelor acestui capitol este ilustrată în Figura 5.1.

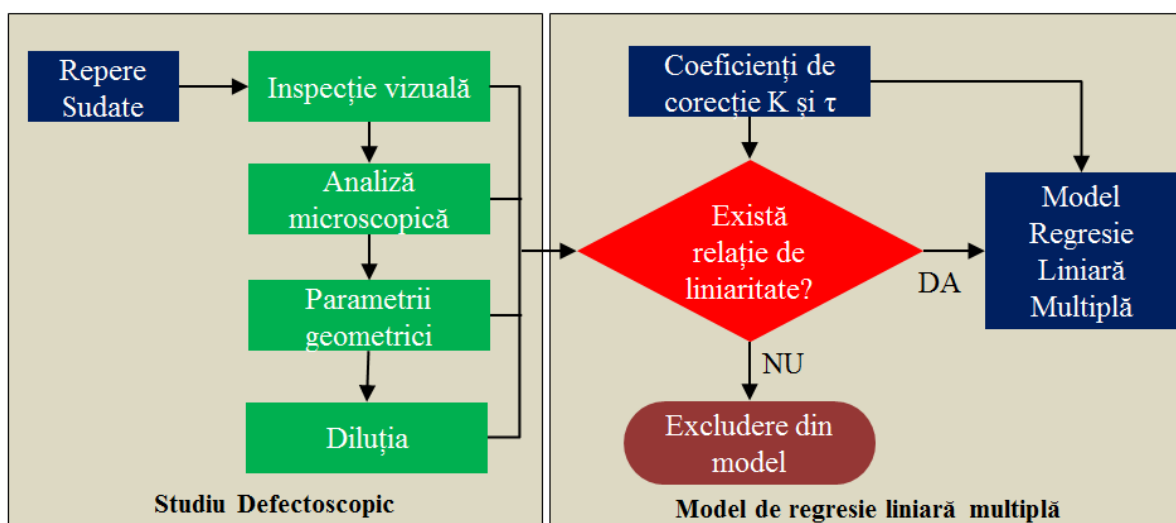


Fig. 5.1. Etapele cercetărilor din Capitolul 5

Scopul acestui capitol îl reprezintă rezolvarea obiectivului 5 al tezei de doctorat

- **OBIECTIV 5: Corelarea variației mărimii de răspuns cu micro și macrostructura reperelor studiate** – Modul în care are loc transferul de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată influențează în mod direct micro și macro structura materialului de bază. În acest sens, studiile defectoscopice oferă o perspectivă importantă privind relația dintre parametrii regimului de sudare, transferul termic și calitatea sudurii. Mărimea de ieșire este reprezentată de temperaturile măsurate cu pirometrul.

## 5.2. Analiza vizuală a cordonului de sudură

Analiza macroscopică a reperelor realizate prin depunere de material prin sudare presupune realizarea unei inspecții vizuale a acestora, imediat după ce sunt gata de a fi preluate de pe masa modulară, fără a se interveni asupra lor. Defectele urmărite în cadrul acestui subcapitol sunt cele din tabelul 5.1.

Tabel 5.1 Tipuri de defecte urmărite la inspecția vizuală

Denumire, localizare
NS – număr de stropi (pe cordon, pe zona de influență termică, la capetele sudurii, pe materialul de bază neinfluențat termic)
CZ – cruste de zgură (mici pelicule aderente și sticloase poziționate pe cordonul de sudură sau pe zonele de racordare cu materialul de bază);
NG – neuniformități geometrice ale cordonului (subțiere, îngroșare, reducere înălțime, supraînălțare excesivă, solzi de solidificare etc);
CM - Crater marginal (retasură de tip crater de solidificare) format de obicei la zonele de finalizare a sudurii, ca urmare a contracției la solidificare
Depuneri de pelicule solide rezultate din oxidarea/arderea elementelor chimice
B – Lățimea cordonului de sudură - Se măsoară cu șublerul electronic în aceeași poziție de pe placă
h – Înălțimea cordonului de sudură - Se măsoară cu șublerul electronic în aceeași poziție de pe placă

S-au efectuat examinări vizuale și măsurări pe 8 seturi de plăci. Al treilea set conține 5 plăci cu debite ale gazului de protecție de 10 l/min, 13,5 l/min, 17 l/min, 20,5 l/min și 24 l/min, iar celelalte seturi sunt compuse din 3 plăci, fiecare cu un regim de sudare diferit. Detaliile valorilor

parametrilor regimului de sudare utilizate în programul experimental pot fi găsite în tabelul 5.2 și tabelul 5.3.

**Tabel 5.2** Parametrii regimului de sudare pentru seturile 1-4

<b>PISTOLETUL ROBOTIZAT PERPENDICULAR PE SUPRAFAȚA PLĂCII</b>									
SET	PLACĂ	Tip arc	Debit gaz [l/min]	Intensitatea curentului [A]	Tensiunea [V]	Viteza de sudare [cm/min]	Diametrul Electrodeului [mm]	Viteza de avans [m/min]	Lungimea liberă a sârmei [mm]
1	1	Short arc	10	160	17,7	45	1,2	3,9	15
	2		17						
	3		24						
2	4	Spray arc	10	280	29,2	55	1,2	9	15
	5		17						
	6		24						
3	7	Short arc	10	190	18,9	45	1,2	4,7	15
	8		13,5						
	9		17						
	10		20,5						
	11		24						
4	12	Spray arc	10	320	31,7	55	1,2	11	15
	13		17						
	14		24						

**Tabel 5.3** Parametrii regimului de sudare pentru seturile 5-8

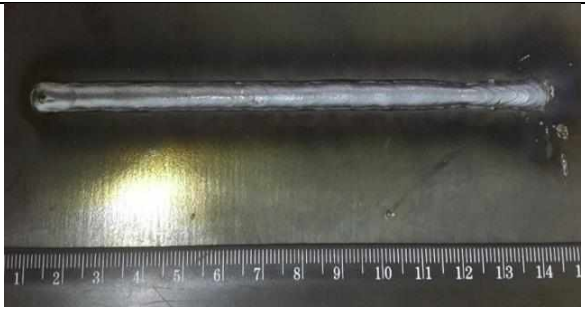

<b>PISTOLETUL ROBOTIZAT ÎNCLINAT CU 15 FAȚĂ DE NORMALA LA SUPRAFAȚA PLĂCII CU TRAGERE SPRE DREAPTA</b>									
SET	PLACĂ	Tip arc	Debit gaz [l/min]	Intensitatea curentului [A]	Tensiunea [V]	Viteza de sudare [cm/min]	Diametrul Electrodeului [mm]	Viteza de avans [m/min]	Lungimea liberă a sârmei [mm]
5	15	Short arc	10	160	17,7	45	1,2	3,9	15
	16		17						
	17		24						
6	18	Spray arc	10	280	29,2	55	1,2	9	15
	19		17						
	20		24						
7	21	Short arc	10	190	18,9	45	1,2	4,7	15
	22		17						
	23		24						
8	24	Spray arc	10	320	31,7	55	1,2	11	15
	25		17						
	26		24						


Pentru a asigura o corelare precisă între tipul de regim folosit și descrierea defectelor observate pe placă, informațiile relevante au fost centralizate în tabelul 5.4. Tipurile de defecte urmărite au fost preluate conform standardului SR EN ISO 6520-1:2009. Acesta se referă la sudarea electrică și la procedeele de sudare, oferind termeni și definiții standardizate utilizate în domeniul sudării, cu scopul de a asigura o înțelegere comună și clară a terminologiei folosite [187].

Următorii parametri sunt de interes în inspecția macroscopică:

1. **Numărul de stropi**
2. **Crusta de zgură**
3. **Neuniformitățile geometrice**
4. **Depunerile de pelicule solide**

**Tabel 5.4** Analiza vizuală a imperfecțiunilor la sudare a **celor 8 seturi**

Nr PL	Parametrii de sudare	Analiză sudură Conform SR EN ISO 6520-1:2009	
1	SHORT ARC Torță perpendiculară $d_g=10$ l/min $I=160$ A $U=17,7$ V $v_s=45$ cm/min $d_e=1,2$ mm $v_a=3,9$ m/min $l_{cl}=15$ mm	$B=5,29$ mm $h=2,45$ mm <b>Numărul de stropi</b> – Prezintă urme de stropi foarte fine de o parte și de alta de-a lungul cordonului, mai pronunțat fiind spre partea finală, cu stropi izolați mai mari, dar în număr redus; <b>Crusta de zgură</b> - Este prezentă pe suprafața cordonului sub formă de pelicule de culoare maronie de diferite dimensiuni și destul de pronunțată, de o parte și de alta pe zona de racordare; <b>Neuniformități geometrice</b> - Apar doar la începutul și la sfârșitul cordonului. La început avem o supraînălțare $h$ mai mare, iar spre sfârșit aceasta scade; <b>Depuneri de pelicule solide</b> - Sub 10% din suprafața plăcii	
13	SPRAY ARC Torță perpendiculară $d_g=17$ l/min $I=320$ A $U=31,7$ V $v_s=55$ cm/min $d_e=1,2$ mm $v_a=11$ m/min $l_{cl}=15$ mm	$B=9,23$ mm ; $h=3,59$ mm; <b>Număr de stropi</b> - Se menține dar mai mic decât la <b>12</b> ; <b>Cruste de zgură</b> - Urmele de pe suprafața exterioară a cordonului indică o suprafață mai mare acoperită de acestea, iar la baza cordonului este mai subțire decât la nr <b>12</b> ; <b>Neuniformități geometrice</b> - Doar la începutul și la sfârșitul cordonului; <b>Depuneri de pelicule solide</b> - Acoperă aproximativ 75% din suprafața plăcii.	

Nr PL	Parametrii de sudare	Analiză sudură Conform SR EN ISO 6520-1:2009	
26	<b>SHORT ARC</b> Înclinare torță 15° prin tragere spre dreapta $d_g=24$ l/min $I=160$ A $U=17,7$ V $v_s=45$ cm/min $d_e=1,2$ mm $v_a=3,9$ m/min $l_{cl}=15$ mm	$B=9,87$ mm ; $h=3,35$ mm; <b>Numărul de stropi</b> - Este mai scăzut decât la ambele plăci <b>24 și 25</b> ; <b>Cruste de zgură</b> - Se prezintă aceeași situație ca la depunerile de pe plăcile anterioare însă cu nivelul cel mai ridicat; <b>Neuniformități geometrice</b> - Doar la începutul și la sfârșitul cordonului; <b>Depuneri de pelicule solide</b> - Acoperă peste 75% din suprafața plăcii.	

Tabelele de variație prezentate au fost utilizate pentru a identifica tendințe, modul de materializare al unor influențe sau corelații între parametrii. Ele pun în evidență impactul unui factor asupra altora, sau asupra rezultatului final.

În contextul specific analizei sudurilor s-a realizat un tabel de variație sintetic pentru a evidenția modul în care diferiți parametri sau variabile, cum ar fi regimul de sudare, debitul de gaz de protecție sau unghiul de înclinare al pistolului de sudare influențează parametrii geometrici, defectele sau alte caracteristici ale sudurilor (Tabelul 5.5).

**Tabel 5.5** Tabel de variație a parametrilor inspecției vizuale a tuturor seturilor

Nr set	Număr de stropi	Cruste de zgură	Neuniformități geometrice	Depuneri pelicule solide	Lățime cordon	Înălțime cordon
1	↘	↗	—	↗	↗	↗
2	↘	↗	—	↗	↗	↗
3	↘	↗	—	↗	↗	↗
4	↘	↗	—	↗	↗	↗
5	↘	↗	—	↗	↗	↗
6	↘	↗	—	↗	↗	↗
7	↘	↗	—	↗	↗	↗
8	↘	↗	—	↗	↗	↗

După analiza macroscopică a celor **26 de probe** se pot formula următoarele observații:

Conform tabelului 5.12, variația debitului de gaz influențează lățimea cordonului, înălțimea cordonului, numărul de stropi, crustele de zgură, neuniformitățile geometrice astfel:

**1. Lățimea cordonului B:** s-a observat amplificarea lățimii cordonului o dată cu creșterea debitului de gaz

**2. Înălțimea cordonului h:** la regimuri cu intensități de curent mici se observă o ușoară tendință de creștere o dată cu creșterea debitului de gaz, însă această creștere este semnificativă la intensități mai mari ale curentului de sudare.

**3. Numărul de stropi:** stropii sunt mai pronunțați și mai numeroși pentru regimurile tehnologice în care debitul de gaz este scăzut. Astfel, putem afirma că există o stabilitate mai mare a arcului la debite mai mari.

**4. Crustele de zgură:** Apar atât pe suprafața cordonului cât și în zona de racordare dintre cordon și materialul de bază:

- Numărul de pelicule de pe suprafața cordonului este proporțional cu creșterea debitului de gaz, iar crusta care se formează în zona de racordare se subțiază o dată cu creșterea acestuia.
- La înclinarea pistolului robotizat cu  $15^\circ$  la intensități mari și debite mari, peliculele de pe cordon tind să se prelingă către zona de racordare și astfel să creeze împreună pe suprafețele laterale ale acestuia o crustă de arie mare.

**5. Neuniformitățile geometrice:** sunt aproximativ aceleași, la începutul și la sfârșitul cordonului, unde se poate observa o diferență de înălțime/lățime față de restul cordonului. La început raportul  $h/B$  este mai mare decât în restul cordonului, iar la sfârșitul cordonului un raport  $h/B$  mai mic decât în restul cordonului. În plus, netezimea cordonului (lipsa solzilor de solidificare) este mai mică față de cazul short arc cu torța perpendiculară pe suprafața plăcii.

**6. Depuneri de pelicule solide de pe suprafața plăcii:** cresc la debite mari de gaz:

- Sunt distribuite în cele mai multe cazuri aproximativ simetric, de o parte și de alta a cordonului.
- Sunt asimetrice raportate la lungimea plăcii.
- Sunt mai pronunțate în direcția opusă sensului de deplasare al torței.

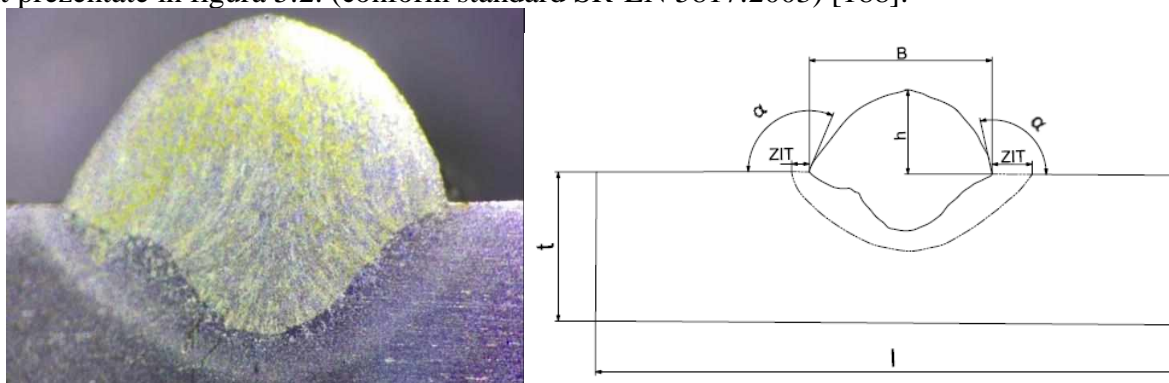
### 5.3. Analiza microscopică a sudurilor în secțiune transversală

Acest subcapitol își propune să analizeze comparativ structura microscopică a suprafețelor probelor. Au fost studiate defectele prezentate în tabelul 5.6.

**Tabel 5.6** Tipuri de defecte urmărite la analiza microscopică

Denumire și localizare
ZIT la suprafața cordonului
ZIT la rădăcina cordonului
Aspectul sudurii
Unghi de racordare

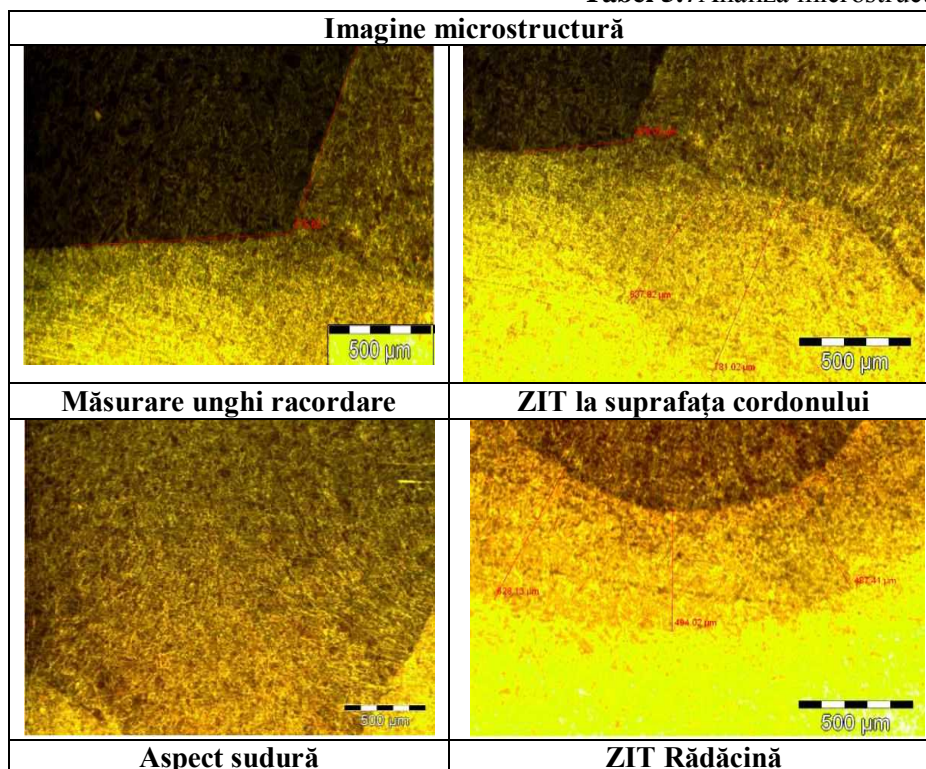
Elementele geometrice ale tipului de sudură analizat în cadrul programului experimental sunt prezentate în figura 5.2. (conform standard SR-EN 5817:2003) [188].



**Fig. 5.2** Elementele îmbinării sudate

Notațiile din Fig. 5.2 sunt: B - lățimea cusăturii sudate ; t - grosimea materialului de bază (plăcii); l - lățimea plăcii; h - înălțimea (supraînălțarea) cordonului ;  $\alpha$  - unghi de racordare ; ZIT - zona influențată termic.

Ca și în cazul analizei macroscopice, în fiecare din cele 8 seturi s-a optat pentru menținerea constantă a majorității valorilor parametrilor de sudare, exceptând debitul gazului de protecție.

**Tabel 5.7** Analiza microstructurală a setului 1

Tabelul 5.8 prezintă valorile măsurate ale unghiului de racordare.

**Tabel 5.8** Valori unghi de racordare

Nr set	Măsurare unghi racordare					
1	Placa 1	115,62°	Placa 2	124,78°	Placa 3	122,16°
2	Placa 4	115,20°	Placa 5	104,47°	Placa 6	120,85°
3	Placa 7	92,64°	Placa 8	98,91°	Placa 9	105,19°
4	Placa 12	122,96°	Placa 13	129,64°	Placa 14	120,05°
5	Placa 15	101,14°	Placa 16	98,78°	Placa 17	126,78°
6	Placa 18	99,78°	Placa 19	105,57°	Placa 20	58,63°
7	Placa 21	115,55°	Placa 22	114,15°	Placa 23	104,25°
8	Placa 24	114,72°	Placa 25	90,50°	Placa 26	104,30°

În tabelul 5.8 sunt prezentate valorile măsurate ale unghiului de racordare pentru cele 8 seturi

Pe baza măsurărilor se pot evidenția următoarele aspecte:

- Pentru **Setul 1**, valorile sunt dispuse după un grafic concav al unei funcții de grad 2.
- Pentru **Setul 2**, valorile sunt dispuse după un grafic convex al unei funcții de grad 2.
- Pentru **Setul 3**, valorile respectă o tendință crescătoare odată cu creșterea debitului de gaz.
- Pentru **Setul 4** valorile sunt dispuse după parabola unei funcții de grad 2 concave.
- Pentru **Setul 5** nu respectă o tendință anume
- Pentru **Setul 6** nu respectă o tendință anume
- Pentru **Setul 7** valorile respectă o tendință descrescătoare odată cu creșterea debitului de gaz
- Pentru **Setul 8** valorile sunt dispuse după un grafic convex al unei funcții de grad 2



**Tabel 5.9** Valori ZIT suprafață plăci

Nr. set	Extindere ZIT suprafața plăcii									
	1	Placa 1	478,03 $\mu\text{m}$	Placa 2	454,44 $\mu\text{m}$	Placa 3	360,19 $\mu\text{m}$			
2	Placa 4	680,19 $\mu\text{m}$	Placa 5	757,62 $\mu\text{m}$	Placa 6	676,67 $\mu\text{m}$				
3	Placa 7	621,04 $\mu\text{m}$	Placa 8	608,17 $\mu\text{m}$	Placa 9	601,25 $\mu\text{m}$	Placa 10	600,26 $\mu\text{m}$	Placa 11	605,22 $\mu\text{m}$
4	Placa 12	766,38 $\mu\text{m}$	Placa 13	631,27 $\mu\text{m}$	Placa 14	926,22 $\mu\text{m}$				
5	Placa 15	604,16 $\mu\text{m}$	Placa 16	720,14 $\mu\text{m}$	Placa 17	750,02 $\mu\text{m}$				
6	Placa 18	594,01 $\mu\text{m}$	Placa 19	1056,09 $\mu\text{m}$	Placa 20	984,10 $\mu\text{m}$				
7	Placa 21	665,88 $\mu\text{m}$	Placa 22	546,87 $\mu\text{m}$	Placa 23	860,67 $\mu\text{m}$				
8	Placa 24	764,26 $\mu\text{m}$	Placa 25	750,13 $\mu\text{m}$	Placa 26	677,20 $\mu\text{m}$				

Tabelul 5.9 sintetizează valorile măsurate ale ZIT la suprafață. Pe baza acestuia se pot formula următoarele observații:

- Pentru **Setul 1** - valorile descresc atunci când debitul de gaz crește.
- Pentru **Setul 2** - valorile sunt dispuse aproximativ după parabola unei funcții de grad 2 concave.
- Pentru **Setul 3** - ZIT fluctuează aproximativ după o parabolă convexă.
- Pentru **Setul 4** - ZIT termic este influențată cel mai puternic, deoarece acesta este cazul când debitul gazului de protecție este de 24 l/min (cel mai mare dintre cele considerate).
- Pentru **Setul 5** - diagrama reflectă proporționalitatea directă dintre ZIT și debitul de gaz.
- Pentru **Setul 6** - valorile sunt dispuse aproximativ după parabola unei funcții de grad 2 concave.
- Pentru **Setul 7** - valorile sunt dispuse după un grafic convex a unei funcții de grad 2.
- Pentru **Setul 8** - valorile respectă o tendință descrescătoare o dată cu creșterea debitului de gaz

**Tabel 5.10** Valori ZIT rădăcină plăci

Nr set	Extindere ZIT rădăcină									
	1	Placa 1	494,02 $\mu\text{m}$	Placa 2	552,27 $\mu\text{m}$	Placa 3	690,14 $\mu\text{m}$			
2	Placa 4	490 $\mu\text{m}$	Placa 5	536,01 $\mu\text{m}$	Placa 6	596,08 $\mu\text{m}$				
3	Placa 7	490 $\mu\text{m}$	Placa 8	513 $\mu\text{m}$	Placa 9	536,01 $\mu\text{m}$	Placa 10	566,04 $\mu\text{m}$	Placa 11	596,08 $\mu\text{m}$
4	Placa 12	534,03 $\mu\text{m}$	Placa 13	590 $\mu\text{m}$	Placa 14	466,11 $\mu\text{m}$				
5	Placa 15	596,08 $\mu\text{m}$	Placa 16	640,31 $\mu\text{m}$	Placa 17	534,03 $\mu\text{m}$				
6	Placa 18	796,36 $\mu\text{m}$	Placa 19	756,86 $\mu\text{m}$	Placa 20	680,19 $\mu\text{m}$				
7	Placa 21	530,54 $\mu\text{m}$	Placa 22	754,27 $\mu\text{m}$	Placa 23	620,16 $\mu\text{m}$				
8	Placa 24	570 $\mu\text{m}$	Placa 25	490 $\mu\text{m}$	Placa 26	678 $\mu\text{m}$				

Tabelul 5.10 prezintă valorile măsurate ale ZIT la rădăcină plăci. Pe baza acestuia se pot formula următoarele observații:

- Pentru **Setul 1** - se observă variația ascendentă a valorilor. Zona influențată termic la rădăcină crește o dată cu creșterea debitului de gaz.
- Pentru **Setul 2**, - valorile sunt dispuse aproximativ după parabola unei funcții de gradul 2 concave.

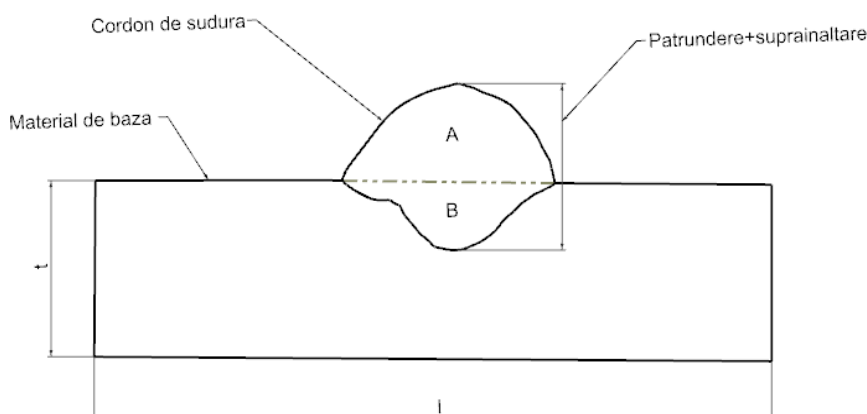
- Pentru **Setul 3** - din diagramă se surprinde tendința de creștere, proporțională cu valorile mai mari ale debitului de gaz.
- Pentru **Setul 4** - valorile sunt dispuse aproximativ după parabola unei funcții de gradul 2 concave.
- Pentru **Setul 5** - valorile sunt dispuse aproximativ după parabola unei funcții de gradul 2 concave.
- Pentru **Setul 6** - la ZIT de la rădăcină sunt valori diferite, dar și o tendință descrescătoare evidentă o dată cu creșterea debitului de gaz .
- Pentru **Setul 7** - valorile sunt dispuse aproximativ după parabola unei funcții de gradul 2 concave.
- Pentru **Setul 8** - valorile sunt dispuse aproximativ după parabola unei funcții de gradul 2 convexe.

#### 5.4. Diluțiile și ariile rosturilor în secțiune pentru fiecare regim de sudare

Diluția se referă la schimbarea compoziției chimice a materialului de adaos, cauzată de amestecul cu materialul de bază. Aceasta se măsoară în procente, iar relația de calcul pentru aceasta este:

$$Dilutia = \frac{B}{A+B} \cdot 100[\%] \quad (5.1)$$

Unde B-reprezintă aria băii de metal topit, A – aria materialului de adaos (Fig. 5.3).



**Fig. 5.3** A - aria materialului de adaos; B - aria băii de metal topit; t - grosime placă; l - lățime placă

Aria cordonului în secțiune  $A_s$ :

$$A_s = A + B \quad (5.2)$$

Cu toate acestea, se poate utiliza o abordare mai practică, ce presupune următorii pași: • s-a achiziționat de la microscop câte o imagine pentru fiecare probă; • fotografia a fost încărcată în programul NX1980; • deschiderea acesteia în modulul SCKETCH; • realizarea profilului cordonului; • modelarea parțială 3D a acestuia și scalarea 3D la dimensiunea reală a cordonului; • măsurarea ariei totale a cordonului;

În tabelul 5.11 sunt centralizate valorile măsurărilor și ale calculelor parametrilor urmăriți: valori dimensionale cumulative ale pătrunderii și supraînălțării, valori ale ariei de supraînălțare (A), valori ale ariei de pătrundere (B), valori ale ariei pentru suprafața totală în secțiune a cordonului ( $A_s$ ) și diluția.

**Tabel 5.11** Valorile diluțiilor și ariilor plăcilor

Nr placă	Pătrundere + Supraînălțare [mm]	As [mm <sup>2</sup> ]	A [mm <sup>2</sup> ]	B [mm <sup>2</sup> ]	Diluția [%]
1	4,37	15,4518	10,4704	4,9814	67,76168
2	4,41	16,8013	11,0527	5,7486	65,78479
3	3,93	14,0144	9,2133	4,8011	65,74167
4	5,90	35,0081	16,3516	18,6565	46,70805
5	6,01	33,3241	16,0058	17,3183	48,0307
6	6,31	38,2751	19,4855	18,7896	50,90908
7	4,74	19,1831	12,8105	6,3726	66,78013
8	4,76	18,99385	12,169	6,82485	64,06811
9	4,78	18,8046	11,5275	7,2771	61,30149
10	4,785	18,06865	11,4421	6,62655	63,32571
11	4,79	17,3327	11,3567	5,9760	65,52182
12	7,61	47,7519	22,8958	24,8561	47,94741
13	7,63	50,2379	22,8958	27,8817	45,09044
14	7,86	50,0451	22,6423	27,4028	45,24379
15	4,08	14,8539	9,664	5,1899	65,06035
16	4,49	15,5962	10,2601	5,3361	65,7859
17	4,55	12,4482	7,9518	4,4964	63,87912
18	6,50	37,4919	19,7107	17,7812	52,57322
19	6,60	39,3019	20,665	18,6369	52,58016
20	6,69	39,1873	21,2933	17,8940	54,33725
21	4,50	15,8143	10,2133	5,6010	64,58269
22	4,61	16,8595	11,3099	5,5496	67,08325
23	4,67	19,2171	13,0287	6,1884	67,79743
24	7,52	45,1558	23,361	21,7948	51,73422
25	7,58	48,1566	24,4476	23,7090	50,76687
26	7,64	44,5402	22,9449	21,5953	51,51504

Tendențele de variație ale caracteristicilor microscopice au fost centralizate în tabelul 5.12 pentru evaluarea tendințelor de liniaritate între valori. Se observă faptul că acestea se respectă în cazul pătrunderii și a supraînălțării, a unghiului de racordare, ZIT rădăcină cordon și diluție.

**Tabel 5.12** Tabel de variație a parametrilor geometrici, defecte microscopice și diluție

Nr set	Plăci	Pătrundere și Supraînălțare	Unghi de racordare	ZIT la suprafața plăcii	ZIT rădăcină cordon	Arie secțiune cordon	Diluția
1	1-2	↗	↗	↘	↗	↗	↘
	2-3	↘	↘	↘	↗	↘	↘
2	4-5	↗	↘	↗	↗	↗	↗
	5-6	↗	↗	↘	↗	↘	↗
3	7-8	↗	↗	↗	↗	↗	↘
	8-9	↗	↗	↗	↗	↗	↘
	9-10	↗	↗	↗	↗	↘	↗
	10-11	↗	↗	↗	↗	↘	↗
4	12-13	↗	↗	↘	↗	↗	↘
	13-14	↗	↘	↗	↘	↘	↗
5	15-16	↗	↘	↗	↗	↗	↗
	16-17	↗	↗	↗	↘	↘	↘
6	18-19	↗	↗	↗	↘	↗	↗

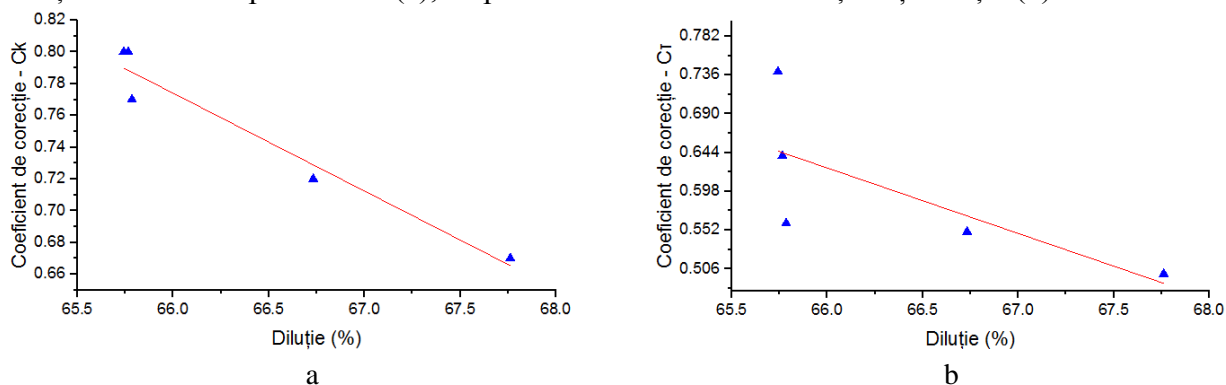
Nr set	Plăci	Pătrundere și Supraînălțare	Unghi de racordare	ZIT la suprafața plăcii	ZIT rădăcină cordon	Arie secțiune cordon	Diluția
	19-20	↗	↘	↘	↘	↘	↗
7	21-22	↗	↘	↘	↗	↗	↗
	22-23	↗	↘	↗	↘	↗	↗
8	24-25	↗	↘	↘	↘	↗	↘
	25-26	↗	↗	↘	↗	↘	↗

### 5.5. Corelarea parametrilor geometrici, a defectelor microstructurale și a diluției cu coeficienții de corecție ai sistemului dinamic

Tabelul 5.12 evidențiază faptul că debitul de gaz are o influență semnificativă asupra microstructurii reperelor obținute prin sudare robotizată. Pe de altă parte, debitul de gaz influențează în mod direct transferul de căldură al procesului. În acest sens, coeficienții de corecție aplicați sistemului de ordin 1 fac trecerea de la conducție termică perfectă la comportarea reală a procesului tehnologic.

#### Regresia liniară multiplă

În figura 5.4 se poate observa tendința care se manifestă între coeficientul de corecție  $K$  și diluția măsurată experimental (a), respectiv coeficientul de corecție  $\tau$  și diluția (b).



**Fig. 5.4** Variația liniară a coeficienților de corecție; (a) –  $C_K$  și (b)  $C_\tau$

Prin urmare, se poate realiza un studiu de regresie liniară multiplă pentru corelarea corecțiilor pentru  $K$  și  $\tau$  cu parametrii geometrici, defectele microstructurale și diluția rezultată în urma studiului. Astfel, se va ține cont de următoarele variabile dependente: • Geometrie: pătrundere + supraînălțare cordon, aria secțiunii cordonului; • Defecte microstructurale: unghi de racordare, ZIT la suprafața plăcii, ZIT la rădăcina cordonului; • Diluția;

Variabilele independente sunt reprezentate de coeficienții de corecție  $C_K$  și  $C_\tau$ .

Tabelul 5.13 sintetizează valorile care au fost incluse în studiu.

**Tabel 5.13** Valori dependente și independente

Valori dependente					Valori independente	
dg [l/min]	Diluția[%]	Pătrundere + Supraînălțare[mm]	Extindere ZIT rădăcină [μm]	Unghiul de racordare [°]	C <sub>K</sub>	C <sub>τ</sub>
10	66,78	4,74	490	92,64	0,67	0,5
13.5	64,06	4,76	513	98,91	0,72	0,55
17	61,30	4,78	536	105,19	0,77	0,56
20.5	63,32	4,78	566	105,78	0,8	0,64
24	65,52	4,79	596	106,38	0,8	0,74

În a doua etapă se realizează identificarea coeficienților  $\beta$  utilizând metoda biseției implementată în Microsoft Excel – Regression add-in Toolpack. Se utilizează valorile setului 3 pentru definirea modelului.

Tabelul 5.14 sintetizează erorile obținute la predicția coeficienților de corecție K și  $\tau$ .

**Tabelul 5.14** Statisticile regresiei

Placa	Erori C <sub>K</sub>			Erori C <sub>τ</sub>		
	C <sub>K</sub> real	C <sub>K</sub> estimat	$\epsilon$ (%)	C <sub>τ</sub> real	C <sub>τ</sub> estimat	$\epsilon$ (%)
1	0,67	0,65	3,25	0,5	0,49	2,56
2	0,72	0,70	2,63	0,55	0,52	6,42
3	0,77	0,75	2,14	0,56	0,54	2,69
4	0,8	0,77	3,99	0,64	0,63	1,99
5	0,8	0,78	1,96	0,74	0,72	3,22

Se poate observa faptul că eroarea maximă de estimare a coeficienților de corecție este de 3,99% în cazul C<sub>K</sub> și 6,42% în cazul C<sub>τ</sub>, fapt care confirmă precizia predicțiilor.

Tabelul 5.15 reprezintă valorile constantelor  $\beta$  obținute în urma studiului.

**Tabelul 5.15** Coeficienții  $\beta$ 

Coeficient	Semnificație	Valoare pentru C <sub>K</sub>	Valoare pentru C <sub>τ</sub>
$\beta_0$	Intercept	-0,23	-2,69
$\beta_1$	d <sub>g</sub>	0,01	0,01
$\beta_2$	Diluția [%]	0,01	0,03
$\beta_3$	Pătrundere + Supraînălțare [mm]	-0,08	0,04
$\beta_4$	Extindere ZIT rădăcină	0,00	0,00
$\beta_5$	Unghiul de racordare	0,01	0,01

#### Verificarea metodologiei pentru setul 4

Verificarea gradului de generalizare al metodologiei nu se poate realiza decât prin extinderea studiului pentru un set de repere care nu se află în setul inițial de date. Astfel, se ține cont de setul 4 de repere.

Tabelul 5.16 prezintă valorile incluse în modelul de regresie. S-au considerat constantele  $\beta$  din tabelul 5.26 pentru realizarea predicțiilor valorilor independente.

**Tabelul 5.16** Valori dependente și incluse în studiu pentru setul 4

Valori dependente				
$d_g$ [l/min]	Diluția [%]	Pătrundere+Supraînălțare [mm]	Extindere ZIT rădăcină [ $\mu$ m]	Unghiul de racordare [°]
10	47,94	7,61	534,03	122,96
17	45,09	7,63	590	129,64
24	45,24	7,86	466,11	120,05

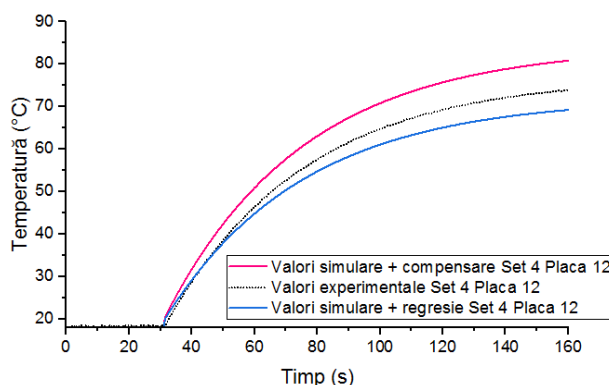
Tabelul 5.17 reprezintă valorile anticipate ale constantelor  $K$  și  $\theta$ . Se observă faptul că acestea diferă față de cele obținute în capitolul anterior.

**Tabelul 5.17** Valorile anticipate ale constantelor de corecție  $K$  și  $\theta$  pentru setul 4

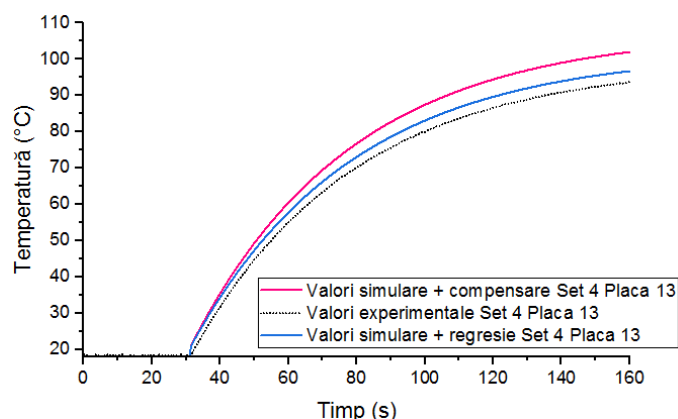
$d_g$ [l/min]	Valori anticipate set 4		Valori inițiale set 3	
	$C_k$	$C_r$	$C_k$	$C_r$
10,00	0,60	0,46	0,67	0,50
17,00	0,64	0,51	0,77	0,56
24,00	0,70	0,52	0,80	0,74

Noile constante au fost incluse apoi în modelul de simulare.

Figura 5.5 și 5.6 prezintă o comparație între rezultatele obținute utilizând două modele de simulare: unul bazat pe modelul de simulare din capitolul anterior și celălalt care include constantele de corecție anticipate de modelul de regresie. Prin analizarea acestor figuri, se poate evalua impactul adăugării constantelor de corecție asupra acurateței și validității modelului de simulare, oferind astfel informații importante în dezvoltarea și îmbunătățirea modelului de regresie în contextul specific al studiului.



**Fig. 5.5** Variația temperaturii în raport cu timpul pentru setul 4 – Placa 12 considerând valorile experimentale, din simulare cu compensare și cele rezultate prin utilizarea modelului de regresie



**Fig. 5.6** Variația temperaturii în raport cu timpul pentru setul 4 – Placa 13 considerând valorile experimentale, din simulare cu compensare și cele rezultate prin utilizarea modelului de regresie

Caracteristicile sistemului dinamic sunt prezentate în tabelele 5.18 și 5.19 pentru setul 4.

**Tabelul 5.18** Caracteristicile sistemului dinamic pentru setul 4 Placa 12 și Placa 13

Caracteristica	Set 4 Placa 12			Set 4 Placa 13		
	Experimente	Simulări	$\Delta$ (%)	Experimente	Simulări	$\Delta$ (%)
Vârf (°C)	59,00	57,38	2,75	80,70	78,85	2,29
Timp de creștere (s)	96,94	95,05	1,95	106,27	104,40	1,76
Timp de stabilizare (s)	172,62	169,25		189,23	185,90	

**Tabelul 5.19** Caracteristicile sistemului dinamic pentru set 4 Placa 14

Caracteristica	Set 4 Placa 14		
	Experimente	Simulări	$\Delta$ (%)
Vârf (°C)	105,70	102,68	2,85
Timp de creștere (s)	103,52	102,21	1,27
Timp de stabilizare (s)	184,34	182,00	

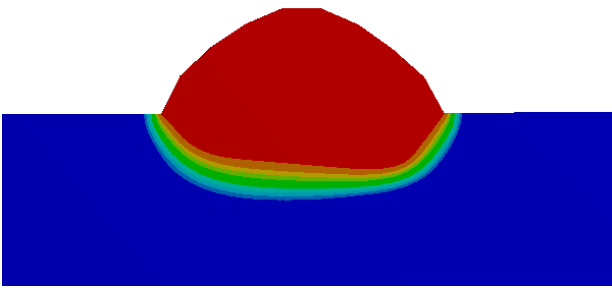
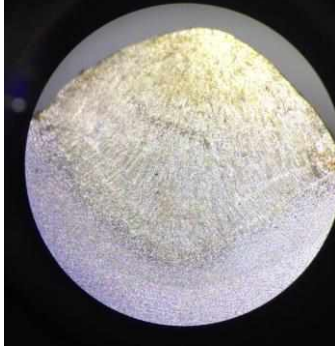
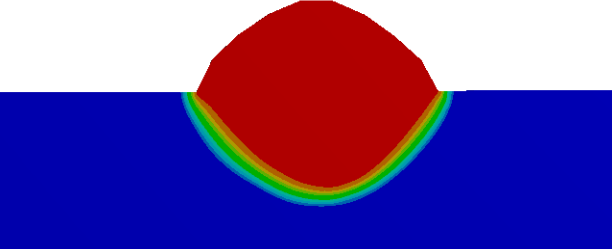
Se observă faptul că eroarea maximă a temperaturii de vârf este de 2,85%. Pe de altă parte, eroarea maximă a timpului de urcare și a celui de stabilizare este de 1,95%.

Valorile obținute atestă faptul că există o relație strânsă între parametrii geometrici, defectele microstructurale, diluția și corecțiile  $K$  și  $\tau$  aplicate modelului de simulare. Totodată, rezultatele atestă faptul că debitul de gaz influențează modul de realizare a transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată. La rândul său, acesta guvernează apariția defectelor la nivelul materialului depus.

Confirmarea acestor aspecte necesită și procesarea rezultatelor obținute la nivelul ZIT, având ca referință imagini surprinse cu ajutorul microscopului optic.

Tabelul 5.20 reprezintă secțiuni care au fost realizate la centrul cordonului de sudură pentru setul 4 – Placa 12.

**Tabelul 5.20** Secțiuni ZIT din modelul de simulare și observația la microscop pentru set 4 placa 12

	
<p><b>Secțiune simulare – Model de bază <math>\Delta t = 10</math> s</b></p>	
	<p><b>ZIT – Observat la microscop</b></p>
<p><b>Secțiune simulare – Model cu corecție prin regresie <math>\Delta t = 10</math> s</b></p>	

Se ține cont atât de modelul de simulare inițial, cât și de cel cu corecțiile aplicate prin regresie. În ambele cazuri timpul de simulare ales este de 10 secunde: 8,7 secunde necesare pentru generarea cordonului + 1,3 secunde pentru a permite formarea gradientului. Se observă faptul că în cazul modelului de bază gradientul de temperaturi este mai pronunțat la nivelul materialului de adaos, în timp ce o fracțiune din gradient este vizibilă la nivelul materialului de bază. Pe de altă parte, compensarea conductanței la interfață facilitează transferul de căldură la zona de interacțiune dintre corpuri. Astfel, gradientul termic de la nivelul reperului urmează aceeași tendință cu ZIT observată la microscop.

Rezultatele studiului evidențiază corelarea dintre parametrii geometrici, defectele microstructurale, diluția și corecțiile  $K$  și  $\tau$  atât prin procesarea valorilor la suprafață, cât și în profunzimea modelului.

## 5.6 Concluzii

Rezultatele indică faptul că debitul de gaz influențează modul de apariție a defectelor macroscopice, în următoarele moduri (conform tabelului 5.5):

- Înălțimea cordonului variază ușor la intensități mici și semnificativ la intensități mai mari.
- Numărul de stropi este mai mare la debite mai scăzute, indicând o stabilitate mai bună a arcului la debite mai mari.
- Numărul și grosimea peliculelor crustelor de zgură de pe cordon variază proporțional cu debitul de gaz.



- Neuniformitățile geometrice de la începutul și sfârșitul cordonului sunt de același tip, dar valorile raportului înălțime/lățime sunt mai mari la început și mai mici la sfârșit, aceste diferențe fiind mai accentuate mai ales la înclinarea pistolului.
- Depunerile de pelicule solide sunt influențate de debitul de gaz, însă nu poate fi observată o tendință clară.

Rezultatele graficelor de Pătrundere + Supraînălțare indică o variație a valorilor proporțională cu debitul de gaz, cu excepția primului grup de trei plăci (conform tabelului 5.12).

În ceea ce privește graficul ariei totale a secțiunii cordonului, se observă o tendință de proporționalitate directă între arie și debitul de gaz în patru din cele opt seturi analizate (conform figurii 5.9).

Configurația tendințelor pentru aria în secțiune a cordonului se menține similară cu cea a ariei totale în diagramele pentru fiecare set în parte (conform tabelului 5.12).

Prin analizarea variației valorilor din diagrama diluțiilor, grupate în trei respectiv cinci plăci, se emite ipoteza că acestea sunt interdependente cu debitul de gaz (conform tabelului 5.12).

Modelul de regresie a fost dezvoltat utilizând Microsoft Excel. Eroarea maximă a algoritmului a fost de 6,42% în cazul estimării coeficientului de corecție  $\tau$  pentru placa nr. 2 din setul 3.

S-a observat faptul că eroarea maximă a caracteristicilor sistemului dinamic a scăzut la 2,85% în cazul temperaturii de vârf pentru setul 4 placa 14.

*Rezultatele atestă faptul că există o strânsă legătură între parametrii, la depunerea de material prin sudare robotizată. Astfel, coeficienții de corecție materializează abaterea de la modelul de simulare în care interacțiunea dintre corpuri este una ideală. Pe de altă parte, acești coeficienți sunt influențați de debitul de gaz care la rândul său influențează forma materialului depus.*

Limitarea abordării constă în faptul că generalizarea modelului de regresie a fost realizată pe două seturi de plăci la care înclinarea torței este aceeași pentru ambele. Pe viitor, este necesar un studiu în care să se considere și înclinarea torței, deoarece s-a observat din capitolele 4 și 5, că influența variației debitului de gaz se manifestă atât asupra transferului de căldură, cât și asupra caracteristicilor macroscopice și microscopice, indiferent de înclinare la depunerea de material prin sudare robotizată.

## **Capitolul 6. Concluzii**

### **6.1 Concluzii generale**

În contextul actual al ingineriei industriale, depunerea de material prin sudare robotizată facilitează repararea sau readucerea într-o stare funcțională a componentelor sau pieselor uzate. Se evită în acest fel necesitatea fabricării de noi piese și implicit se reduce consumul de materie primă. Pe de altă parte, sudarea robotizată permite un mai bun control al procesului, reducând pierderile de căldură și minimizând consumul de energie. În plus, prin reutilizarea și recondiționarea componentelor, se evită necesitatea producerii și transportului de noi piese, ceea ce poate duce la economii pe întreg lanțul de aprovizionare.

Cu toate acestea, un dezavantaj al procesului de depunere a materialului prin sudare îl constituie **existența ZIT**. Aceasta modifică local caracteristicile microstructurale ale materialului de bază. Din acest motiv ZIT manifestă caracteristici mecanice inferioare față de materialul de bază, existând riscul de apariție și propagare a fisurilor.

**Parametrii regimului de sudare** la depunerea de material prin sudare robotizată au un impact semnificativ asupra ZIT și implicit asupra calității sudurii, proprietăților mecanice,

distribuției de temperaturi, eficienței energetice și a timpului de ciclu. Literatura prezentată referitoare la acest subiect propune recomandări în ceea ce privește tensiunea, intensitatea curentului și viteza optimă de sudare pentru diferite materiale și tehnologii.

Variația parametrilor regimului de sudare afectează modul în care are loc transferul de căldură la nivelul materialului de bază. Tensiunea de sudare influențează gradientul temperaturilor în ZIT deoarece determină cantitatea de energie electrică transferată către reper. O tensiune de sudare mai mare va disipa o cantitate mai mare de căldură. Pe de altă parte, intensitatea curentului contribuie la disiparea căldurii datorită rezistenței electrice. Există o multitudine de lucrări științifice care se axează pe acești parametri și pe influența micro și macro structurală care se manifestă la nivelul materialului depus.

Surprinderea gradientilor de temperatură în timpul procesului de sudare presupune utilizarea unor tehnici de măsurare fără contact. În acest sens, **Termografia prin infraroșu** este cel mai utilizat instrument deoarece asigură preluarea valorilor în game care surprind schimbările de fază. Totodată, în funcție de specificațiile sistemului de achiziție, se pot procesa și temperaturile de la nivelul arcului electric.

O etapă premergătoare dezvoltării modelelor de simulare a transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată o constituie **reprezentarea tridimensională a materialului de bază și a cordonului de sudură**. În literatura de specialitate acest ansamblu este reprezentat majoritar într-o formă ideală, neglijând abaterile care apar datorită stării de pregătire a suprafețelor, a modului de funcționare a echipamentului, sau a condițiilor din mediul tehnologic. Din acest punct de vedere, reconstrucția suprafețelor prin scanare 3D reprezintă o tehnică prin care se poate reproduce cu o precizie de ordinul milimetrilor forma reală a geometriei studiate. Deși în literatura de specialitate sunt prezentate tehnici de scanare 3D pentru repere sudate, acestea fac referire în general la utilizarea norilor de puncte pentru deservirea proceselor de defectoscopie nedistructivă.

**Simularea transferului de căldură** la depunerea de material prin sudare este studiată într-o gamă diversificată de lucrări. Problema poate fi descrisă prin două domenii majore: cel solid, care materializează materialul de bază și materialul depus și cel fluid, care reprezintă interacțiunea dintre gazul de protecție și reperul sudat. Pentru analiza CFD a transferului de căldură la sudarea cu arc electric, sunt necesare legi precum conservarea masei, energiei, impulsului, împreună cu legile Fourier și Newton ale transferului de căldură. Acestea facilitează modelarea fluxului gazului de protecție, a distribuției temperaturilor și a transferul de căldură care se manifestă la nivelul băii de sudură. Pe de altă parte, influența domeniului fluid poate fi aproximată și studiată pe baza coeficientului de convecție forțată. Acesta este influențat de interacțiunea dintre gazul de protecție și suprafețele exterioare ale reperului. Din această perspectivă, modelele de simulare MEF pot surprinde gradientul de temperaturi al procesului de depunere prin sudare robotizată prin rezolvarea ecuațiilor transferului de căldură prin conducție și convecție. Alternativ, simulările prin CFD și MEF pot fi corelate pentru sincronizarea condițiilor la limită din domeniile fluid și solid. Literatura de specialitate include o gamă extinsă de cercetări prin simulare. Cu toate acestea, generalizarea metodologiilor existente nu poate fi realizată deoarece fiecare studiu realizat descrie un caz care este validat prin intermediul unui stand experimental particularizat, fiind mereu necesare perspective noi.

**Debitul gazului de protecție** la depunerea de material prin sudare influențează transferul de căldură deoarece regimul turbulent de curgere al acestuia influențează în mod direct schimbul de căldură dintre cordonul de sudură și mediul ambiant prin convecție forțată. Pe de altă parte, presiunea exercitată asupra coloanei de metal topit modifică caracteristicile conductanței la joncțiunea dintre materialul de bază și cel depus. Deși modelele de simulare prezentate în literatura de specialitate dispun de flexibilitatea modificării parametrilor regimului de sudare, nu există lucrări în care să se studieze efectul gazului de protecție asupra transferului de căldură la nivelul reperului sudat. Pe de altă parte, rezultatele cercetărilor experimentale sunt utilizate de regulă doar pentru

verificarea rezultatelor modelelor de simulare, neexistând o sincronizare în două sensuri între procedurile de simulare și cele experimentale.

Orice modificare a parametrilor regimului de sudare are o influență directă asupra transferului de căldură. Pe de altă parte, transferul de căldură influențează micro și macrostructura reperelor sudate. Din acest punct de vedere, **corelarea dintre rezultatele analizei transferului de căldură și studiul defectoscopic** al unor eșantioane constituie un punct de plecare pentru înțelegerea legăturii dintre cele două fenomene. În acest sens, inspecția vizuală a numărului de stropi, aproximarea dimensiunilor crustelor de zgură și a neuniformităților cordonului constituie etape esențiale în studiul macroscopic. Pe de altă parte, dimensiunile ZIT la suprafața și rădăcina cordonului, aspectul sudurii, unghiul de racordare și diluția oferă informațiile necesare pentru realizarea studiului microscopic.

**Relevanța științifică** a subiectului poate fi asociată cu directiva europeană privind eficiența energetică (2012/27/UE). Aceasta urmărește adoptarea unor practici și tehnologii mai eficiente pentru reducerea consumului energetic și implicit a materiilor prime asociate. Prin corelarea fenomenelor termice ale procesului de depunere cu cele micro și macrostructurale s-au formulat concluzii utile referitoare la parametrii optimi ai debitului de gaz care să asigure un echilibru între consumul acestuia, gradientii de temperatură și calitatea sudurii.

Rezultatele au **un impact potențial pentru sudarea robotizată** prin propunerea unor recomandări tehnologice care să eficientizeze procesul. Pe de altă parte, corelarea dintre metodologiile experimentale cu cele de simulare și eficientizarea fluxului informațional dintre cele două medii a permis extinderea abordării propuse pentru orice set de parametri și orice tip de reper sau tehnologie de sudare utilizate. De asemenea, din punct de vedere metodologic simulările CFD-MEF au fost îmbunătățite succesiv prin introducerea de date obținute experimental.

## Metodologia cercetărilor

În figura 6.1 este reprezentată metodologia de cercetare în formă algoritmică. Pe lângă etapele principale se observă intercorelarea și sincronizarea cercetărilor de modelare-simulare cu studiul la nivel macro și microscopic

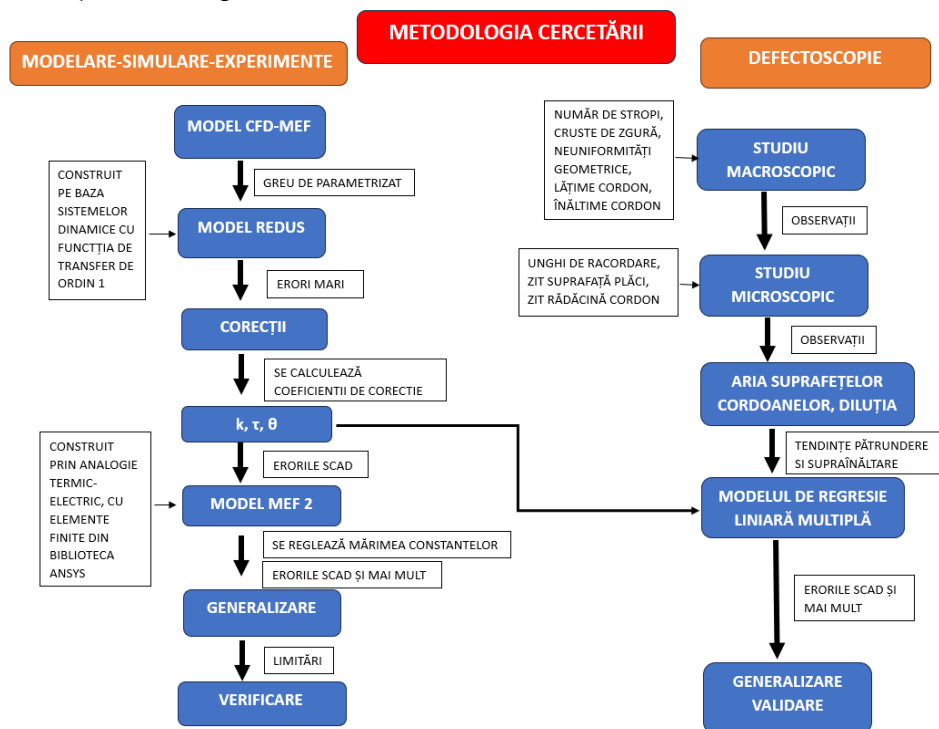


Fig .6.1 Metodologia cercetării

Originalitatea tezei este susținută de lipsa unor formulări clare din literatura de specialitate referitoare la influența debitului de gaz asupra transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată. Prezenta lucrare aduce un număr de 28 contribuții originale:

- 12 contribuții teoretice
- 5 contribuții pe parte de metodologie
- 8 contribuții pe privind experimentele
- 3 contribuții majore privind modelarea și simularea

Pentru atingerea obiectivelor principale ale tezei au fost identificate o serie de obiective specifice:

- Realizarea unui stand experimental pentru procesul de depunere de material prin sudare robotizată și echiparea cu sisteme de achiziție
- Utilizarea sistemelor de achiziție a temperaturilor fără contact considerând două game distincte de măsurare și două echipamente specifice
- Concepția unui model de simulare CFD pentru calcularea coeficientului de convecție forțată la interfața dintre gazul de protecție și domeniul solid
- Dezvoltarea unui model de simulare MEF pentru calcularea distribuției de temperaturi utilizând date experimentale și coeficientului de convecție interpolat din analiza CFD
- Parametrizarea modelului de simulare prin utilizarea funcțiilor de transfer
- Realizarea unor modele analitice pentru identificarea relației dintre variația parametrilor regimului de sudare și constantele sistemului de ordinul I
- Cercetări prin defectoscopie pentru analiza micro și macrostructurii a eşantioanelor studiate

**Capitolul 3** a avut ca scop dezvoltarea unui model original de simulare a transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată.

În prima etapă s-au realizat cercetări experimentale privind transferul de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată. Materialul de bază l-a reprezentat o placă din oțel S235JR. Aceasta a fost supusă procesului de depunere a materialului prin sudare robotizată MIG/MAG. Gazul de protecție ales a fost un amestec de argon – dioxid de carbon (82% Ar 18% CO<sub>2</sub>). Parametrii regimului tehnologic au fost stabiliți în concordanță cu tipul și particularitățile procedurii de sudare robotizată. Standul experimental s-a construit pe baza unei celule de sudare robotizată.

Determinarea experimentală a temperaturilor s-a realizat utilizând două sisteme de achiziție fără contact: o cameră de termografieră cu domeniul de măsurare (+500 până la +2000 / 2300 °C) și un pirometru cu domeniul de măsurare (-50 °C până la +800 °C). Primul sistem de măsurare surprinde temperaturile din timpul ciclului de sudare, în timp ce al doilea realizează măsurarea într-o locație aflată în afara ZIT, pentru întreaga secvență de sudare - răcire. Rezultatele experimentale au fost procesate sub formă de grafice, fiind utilizate ulterior pentru dezvoltarea și verificarea acurateții modelului de simulare.

Geometria reală a reperului sudat a fost scanată 3D. În acest mod s-a obținut forma reală a cordonului de sudură și a abaterilor care apar la nivelul materialului de bază. Reconstruirea geometriei s-a realizat printr-o procedură de inginerie inversă, utilizând mediile de lucru ANSYS SpaceClaim și DesignModeler.

Dezvoltarea modelului de simulare a presupus divizarea problemei transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată în două domenii: cel fluid (materializat de

interacțiunea dintre gazul de protecție și reperul sudat) și cel solid (compus din materialul de bază și cordonul de sudură).

Efectul de răcire al gazului de protecție a fost surprins prin intermediul analizei CFD. Aceasta s-a realizat în domeniul de curgere delimitat de pereți, o zonă de intrare a gazului (duza torței) și o zonă de ieșire. Discretizarea a fost realizată prin rafinarea modelului în zonele de interacțiune, în timp ce restul domeniului a fost discretizat grosier. Condițiile de simulare au fost definite în concordanță cu debitul și caracteristicile gazului de protecție. Rezultatele de interes au fost: vectorul vitezelor fluidului, graficul de convergență al reziduurilor și reprezentarea tabelară a coeficientului de convecție forțată.

Analiza termică în regim tranzitoriu MEF a avut ca scop calculul distribuției de temperatură la nivelul domeniului solid. În acest caz discretizarea a fost realizată dominant cu hexaedre, cu un grad ridicat de rafinare la nivelul cordonului și în zona de interacțiune a acestuia cu materialul de bază. Definirea condițiilor de simulare s-a realizat în concordanță cu viteza de sudare și cu valorile maxime ale temperaturilor care au fost măsurate experimental pentru 27 de segmente ale cordonului. Activarea acestora în timpul simulării s-a realizat prin tehnica "Birth and Death". S-a ținut cont de schimbul de căldură dintre reperul sudat și mediul ambiant prin definirea convecției forțate (obținută din analiza CFD) și a celei libere (din teoria suprafețelor orizontale). Rezultatele de interes au fost: distribuția de temperatură pe fețele exterioare ale elementelor depunerii sudate și în secțiunea cordonului.

Validarea modelului de simulare s-a realizat prin compararea curbei de temperatură obținută experimental cu cea obținută în urma simulărilor. Statisticile celor două curbe au indicat o bună potrivire la echilibrul termic ( $\varepsilon=2.11\%$  în cazul valorii maxime). Diferențele de 4.8% dintre valorile minime au apărut din cauza zgomotului din datele experimentale (vizibil în primele 15 secunde, datorită interferențelor electromagnetice generate de amorsarea arcului electric, care nu au fost luate în considerare în simulare).

S-a constatat însă că există o eroare de 11.08% în timpul de stabilizare a sistemului. Aceasta poate fi explicată prin faptul că modelul nu ține cont de dependența în raport cu temperatura a caracteristicilor de material (aceste informații nu sunt furnizate de producător). Prin urmare, corecția răspunsului dinamic se poate obține prin ajustarea capacității sistemului.

Deși modelul de simulare a fost validat pentru un set de parametri, obiectivul cercetărilor a fost acela de a obține generalizarea modelului, considerând diferite valori ale debitului de gaz. Totodată, a fost importantă și îmbunătățirea răspunsului dinamic al sistemului simulat prin reducerea erorii timpului de stabilizare. Aceste aspecte au fost analizate în capitolul următor.

**Capitolul 4** a avut ca scop studiul influenței variației debitului de gaz asupra transferului de căldură la depunerea de material prin sudare robotizată.

S-au considerat 6 seturi de plăci, fiecare set incluzând câte 3 plăci metalice, exceptând setul 3, care a inclus 5 plăci metalice. Setul 3 a fost folosit pentru parametrizarea modelului de simulare și pentru verificarea rezultatelor obținute.

Pentru fiecare set parametrii regimului de sudare au fost constanți, exceptând debitul de gaz care a avut valori de: 10; 13,5; 17; 20,5 și 24 l/min. Procedura experimentală a fost identică cu cea prezentată în capitolul anterior, excepție făcând sincronizarea timpilor ciclului de sudare cu cei de achiziție a datelor.

Procesarea caracteristicilor sistemelor dinamice rezultate în urma studiului a pus în evidență faptul că transferul de căldură este îmbunătățit în cazul valorilor mari ale debitului de gaz, în timp ce temperaturile măsurate în afara ZIT scad la valori reduse ale debitului de gaz (conform studiului realizat în paragraful 4.3).

Parametrizarea modelului de simulare a presupus în prima fază delimitarea cordonului de sudură în 27 de secțiuni transversale. Geometria poate fi modificată/eșantionată astfel pentru orice fișier preluat în urma scanărilor 3D.

Pentru parametrizarea debitului de gaz s-a realizat un studiu în care viteza fluidului a fost crescută progresiv de la 1,08 la 2,16 m/s. S-a observat faptul că traseul de curgere nu a fost afectat de aceste schimbări (conform figurii 4.10). Pe de altă parte, valoarea coeficientului de convecție a crescut o dată cu viteza fluidului în toate locațiile modelului. S-a propus apoi utilizarea regresiei polinomiale pentru determinarea factorului de scalare al coeficientului de convecție în raport cu debitul de gaz.

Modelul de simulare a fost verificat pentru setul de repere studiat. S-au observat discrepanțe mari în răspunsul dinamic al sistemului, erorile fiind de 28% în cazul temperaturilor de vârf și de 52,7% în cazul timpului de urcare și stabilizare. În consecință, abordarea nu se putea utiliza ca atare.

Explicarea teoretică a erorilor obținute în urma studiului s-a făcut pe baza teoriei conducției termice. Aceasta este influențată de presiune exercitată de gazul de protecție asupra băii de sudură. Astfel, o fracțiune mai mare din energia cedată de materialul de adaos este transferată către cel de bază, rezultând temperaturi mai ridicate în afara ZIT.

Determinarea corecțiilor necesare modelului de simulare s-a putut realiza eficient prin utilizarea sistemelor de ordinul 1 cu întârziere. Acestea au fost utilizate pentru modelarea răspunsului dinamic al sistemului studiat, neglijând ecuațiile care guvernează transferul de căldură din analiza termică.

Identificarea constantelor funcției de transfer cu un singur pol care guvernează sistemele de ordinul 1 s-a realizat utilizând metoda suprafeței propusă de Nishikawa. Algoritmul a fost implementat în mediul de calcul numeric MATLAB.

Diferențele dintre factorii de amplificare, constantele de timp și întârzierea sistemului obținute prin compararea valorilor experimentale cu cele rezultate în urma simulărilor au determinat coeficienții de corecție. Identificarea relației dintre debitul de gaz și valorile acestor coeficienți a permis generalizarea modelului pentru orice caz dat.

Implementarea procedurii în mediul de simulare a presupus realizarea unui studiu de sensibilitate (conform figurilor 4.20 și 4.21). Rolul acestuia a fost acela de a determina conductanța pentru care temperatura sistemului nu mai variază și a capacității pentru care întârzierea răspunsului dinamic corespunde cu cea experimentală.

Verificarea strategiei propuse a fost realizată într-o primă fază pentru setul 3. În acest caz s-au obținut erori de 4,17% în ceea ce privește temperatura de vârf și de 3,15% pentru timpul de creștere și cel de stabilizare.

Gradul de generalizare a fost verificat pentru setul 4. În acest caz, eroarea temperaturii de vârf a fost de 10,12%, eroarea timpului de creștere și a celui de stabilizare au fost de 7,35%. Aceste valori au fost evident reduse față de cele inițiale. Cu toate acestea a fost necesară atât extinderea cercetărilor pentru creșterea gradului de generalizare al modelului, cât și diminuarea erorilor. Aceste aspecte s-au analizat în capitolul 5 al Tezei de doctorat.

Rezultatele obținute au confirmat faptul că modelul poate fi folosit cu succes pentru cazuri care au fost incluse în model, dar și pentru anticiparea modului de transfer al căldurii pentru cazuri care nu au fost studiate inițial.

**Capitolul 5** a avut ca scop principal studiul defectoscopic al reperelor obținute prin depunere de material prin sudare robotizată pentru diferite regimuri de sudare.

În prima parte a fost prezentată inspecția vizuală a plăcilor preluate de pe standul experimental. Parametrii de interes în acest studiu au fost: numărul de stropi, crustele de zgură, neuniformitățile geometrice ale cordonului, craterul marginal, depunerile de pelicule solide rezultate în urma arderii, lățimea în secțiune a cordonului de sudură și înălțimea în secțiune a cordonului de sudură.

Toate aceste defecte au fost centralizate în tabelul 5.4. Analiza și observațiile s-au făcut comparativ pe plăcile fiecărui set, pentru a se evidenția influența debitului de gaz. S-au studiat în total 8 seturi, fiecare set fiind compus din câte trei, respectiv cinci plăci.

Rezultatele au indicat faptul că debitul de gaz influențează modul de apariție a defectelor macroscopice, în următoarele moduri (conform tabelului 5.5):

- Înălțimea cordonului variază clar cu debitul de gaz. Acest lucru este și mai evident la intensități mari ale curentului de sudare
- Numărul de stropi este mai mare la debite mai scăzute, indicând o stabilitate mai bună a arcului la debite mai mari.
- Numărul și grosimea peliculelor crustelor de zgură de pe cordon variază proporțional cu debitul de gaz.
- Neuniformitățile geometrice de la începutul și sfârșitul cordonului sunt de același tip, dar valorile raportului înălțime/lățime sunt mai mari la început și mai mici la sfârșit, aceste diferențe fiind mai accentuate mai ales la înclinarea pistolului.
- Depunerile de pelicule solide sunt influențate de debitul de gaz, însă nu poate fi observată o tendință clară.

În cea de-a doua parte a studiului s-au analizat microscopic elemente precum: unghiului de racordare, aspectul sudurii, extinderea ZIT la suprafața plăcii și la rădăcina cordonului.

Studiul acestor defecte s-a realizat în laboratorul LAMET (Sala CK 106), din cadrul Universității Politehnica din București, din care s-a utilizat: mașina pentru debitare de mare precizie a probelor metalografice (ISOMET 4000 Buehler), mașina pentru șlefuire și lustruire automată a probelor metalografice (Vector și Alpha Beta Polisher Buehler).

Pentru inspecția defectelor microscopice (conform tabelului 5.6), din plăcile obținute prin depunere de material prin sudare robotizată au fost prelevate probe utilizând mașina ISOMET 4000 Buehler. Ulterior, suprafețele acestor probe au fost prelucrate pe mașina de șlefuire și lustruire automată.

Surprinderea defectelor urmărite a fost făcută prin pregătirea suprafețelor. Acest proces s-a realizat utilizând un reactiv chimic pe bază de Nital (2%).

Procesul defectoscopic s-a realizat utilizând microscopul optic Olympus GX 51. În valorile rezultatelor elementelor analizate s-au observat diferențe între plăcile comparate. De asemenea, s-a remarcat faptul că la baza cordonului apar mici locașuri lipsite de material în cazul utilizării unor debite mari de gaz, sau când pistolul robotizat este înclinat. Aceste locașuri pot fi potențiale amorse pentru apariția fisurilor în cusătură.

În cea de-a treia parte a capitolului analiza s-a concentrat pe studiul ariei suprafețelor cordoanelor în secțiune și studiul diluției. Pentru început s-au preluat imagini de la ocularul microscopului utilizând un aparat foto. Acestea au fost importate în programul de proiectare 3D, NX, fiind supuse procesului de scalare la dimensiunile reale. Ariile suprafețelor cordoanelor în secțiune au fost măsurate pe modelele rezultate (conform figurii 5.3).

În final, s-a determinat valoarea diluției pe baza ariilor calculate pentru fiecare secțiune transversală de cordon.

Rezultatele graficelor de Pătrundere+Supraînălțare au indicat o variație a valorilor proporțională cu debitul de gaz, cu excepția primului grup de trei plăci (conform tabelului 5.12).

În ceea ce privește graficul ariei totale a secțiunii cordonului, s-a observat o tendință de proporționalitate directă între arie și debitul de gaz în patru din cele opt seturi analizate (conform tabelului 5.12).

Configurația tendințelor pentru aria în secțiune a cordonului se menține similară cu cea a ariei totale în diagramele pentru fiecare set în parte (conform tabelului 5.12).

Prin analizarea variației valorilor din diagrama diluțiilor, grupate în trei respectiv cinci plăci, s-a emis ipoteza că acestea sunt interdependente cu debitul de gaz (conform tabelului 5.12).

În ultima parte, a fost dezvoltat un model de regresie liniară multiplă în vederea corelării coeficienților de corecție identificați în capitolul anterior cu parametri geometrici, defectele microstructurale și diluția evaluată în acest capitol.

În prima fază au fost eliminate din studiu variabilele care nu au reprezentat o relație de liniaritate față de corecțiile  $K$  și  $\tau$  (conform tabelului 5.12). Acestea au fost: ZIT la suprafața cordonului și aria plăcilor. Modelul de regresie a fost dezvoltat utilizând Microsoft Excel. Eroarea maximă a algoritmului a fost de 6,42% în cazul estimării coeficientului de corecție  $\tau$  pentru placa nr. 2 din setul 3.

Generalitatea corelării obținute prin regresie liniară multiplă a fost verificată pentru setul de plăci 4. În acest caz coeficienții de corecție anticipați au fost incluși în modelul de simulare dezvoltat în capitolul 4.

S-a observat faptul că eroarea maximă a caracteristicilor sistemului dinamic a scăzut la 2,85% în cazul temperaturii de vârf pentru setul 4 placa 3.

Rezultatele au confirmat faptul că la depunerea de material prin sudare robotizată există o strânsă legătură între coeficienții de corecție  $K$  și  $\tau$  cu parametrii geometrici, defectele microstructurale și diluția. Astfel, coeficienții de corecție materializează abaterea de la modelul de simulare în care interacțiunea dintre corpuri este una ideală. Pe de altă parte, acești coeficienți sunt influențați de debitul de gaz care la rândul său influențează forma materialului depus.

Limitarea corelării constă în faptul că generalizarea modelului de regresie a fost realizată pe două seturi de plăci la care înclinarea torței a fost aceeași. Pe viitor este necesar un studiu în care să se ia în considerare și înclinarea torței, deoarece s-a observat din capitolele 4 și 5, că la depunerea de material prin sudare robotizată influența variației debitului de gaz se manifestă atât asupra transferului de căldură, cât și asupra caracteristicilor macroscopice și microscopice.

## 6.2 Contribuții originale ale tezei de doctorat

Pe baza concluziilor acestor capitole, pot fi evidențiate următoarele contribuții:

- Contribuții **teoretice**:
  1. Utilizarea histogramelor pentru filtrarea zgomotului produs de arcul electric în cazul termografiei în infraroșu a proceselor de sudare robotizată
  2. Procesarea echilibrului termic și al timpului de stabilizare a curbelor experimentale / din simulare pe baza prelucrării statistice a semnalelor
  3. Procesarea caracteristicilor dinamice a curbelor termice obținute în urma experimentelor și a simulărilor
  4. Identificarea legii de variație a coeficientului de convecție în funcție de debitul gazului din analiza CFD
  5. Compensarea erorilor sistemelor de ordin I prin calcularea coeficienților de corecție
  6. Generalizarea relației dintre debitul de gaz și coeficienții de corecție
  7. Studiul comparativ al ZIT atât la suprafața plăcilor, cât și la rădăcina acestora
  8. Calcularea diluției, pătrunderii și a supraînălțării în secțiune, a cordoanelor obținute pentru mai multe regimuri de sudare
  9. Analiza comparativă a unghiurilor de racordare specifice plăcilor studiate
  10. Dezvoltarea unui model de regresie liniară multiplă pentru generalizarea relației dintre caracteristicile geometrice, defectele microstructurale, diluția și coeficienții de corecție  $k$  și  $\tau$ .
- Contribuții **experimentale**:
  1. Stabilirea parametrilor regimului tehnologic și a gazului de protecție pentru depunerea de materialului prin sudare robotizată a unei plăci din oțel



2. Programarea traiectoriilor robotului industrial pentru realizarea procesului
  3. Procesarea experimentală a temperaturilor pe baza a două sisteme de măsurare fără contact
  4. Scanarea 3D a reperului sudat și reconstrucția suprafețelor prin tehnici de Inginerie invers
  5. Variația debitului de gaz pentru mai multe seturi de plăci
  6. Sincronizarea timpilor din procedurile de achiziție a temperaturilor (pirometru și camera de termografierie) cu programul de lucru al robotului  
Efectuarea unei inspecții vizuale dublată de măsurări ale probelor obținute prin depunere de material prin sudare robotizată pentru: determinarea numărului de stropi, determinarea crustei de zgură, neuniformități geometrice, craterele marginale, depunerile de pelicule solide, lățime cordon sudură, înălțime cordon sudură
  7. Utilizarea mașinilor de debitat și șlefuit pentru prelevarea probelor, respectiv lustruirea suprafețelor acestora
  8. Pregătirea suprafețelor probelor prelevate prin aplicarea unui reactiv chimic pe bază de Nital 2%
  9. Analiza reperelor cu microscop optic și procesarea rezultatelor cu ajutorul unui program specializat
- Contribuții **metodologice**:
    1. Utilizarea valorilor experimentale pentru definirea condițiilor de simulare și verificarea rezultatelor obținute în urma analizelor termice
    2. Corelarea mediilor de simulare CFD – MEF pentru a surprinde interacțiunea dintre mediul fluid și cel solid.
    3. Parametrizarea modelului geometric prin scalarea secțiunilor transversale ale cordonului
    4. Implementarea în mediul de lucru MATLAB a metodologiei Nishikawa pentru identificarea constantelor sistemelor de ordin 1
    5. Sincronizarea valorilor corecțiilor de conductanță și capacitanță anticipate de algoritmul de regresie cu modelul de analiză termică în regim tranzitoriu
    6. Corelarea parametrilor geometrici, a defectelor microstructurale și a diluției cu coeficienții de corecție ai sistemului dinamic prin regresie multiplă liniară
  - Contribuții de **modelare-simulare**:
    1. Dezvoltarea unui model de simulare CFD pentru evaluarea coeficientului de convecție forțată produsă de fluxul gazului de protecție
    2. Dezvoltarea unui model de simulare MEF pentru evaluarea distribuției de temperatură la depunerea de material prin sudare robotizată
    3. Studiul de sensibilitate al modelului de simulare la variația conductanței și a capacității
    4. Îmbunătățirea modelului de simulare prin introducerea datelor experimentale

### 6.3 Direcții de continuare a cercetărilor

Pe baza studiului de fundamentare al tezei de doctorat, precum și a concluziilor și observațiilor din timpul derulării cercetărilor au fost formulate următoarele direcții de continuare a cercetărilor :

1. Extinderea cercetărilor experimentale pentru mai multe clase de oțeluri, incluzând diferite grosimi ale materialului de bază

2. Utilizarea unor amestecuri diferite ale gazului de protecție pentru extinderea gradului de generalizare a modelului
3. Prelucrarea datelor privind regimul de curgere al gazului de protecție pe baza înregistrărilor cu camera de mare viteză
4. Studiul răcirii active între două treceri consecutive și consecințele asupra proprietăților materialului
5. Aplicarea algoritmilor de inteligență artificială în studiul influenței debitului de gaz la fabricația aditivă prin sudare cu arc electric.

### Bibliografie selectivă

- [1] Chen, S., Zhou, C., Tarn, T. (2007). *Robotic Welding, Intelligence and Automation*. Germania: Springer.
- [2] Hong, T. S., Ghobakhloo, M., & Khaksar, W. (2014). Robotic welding technology. *Comprehensive materials processing*, 6(February), 77-99.
- [3] Nicolescu, A. F., Dobrescu, T. G., Ivan, M., Avram, C. G., Brad, S., Doroftei, I., & Grigorescu, S. *Roboti Industriali, Tehnologii si Sisteme de Productie Robotizate, Ed Academiei Oamenilor de Stiinta din Romania, 2011*. ISBN 978-606-8371-48-1.
- [4] Alexandru, T. G., **Verdete, B. M.**, Pupăză, C., & Nicolescu, A. F. (2019). New FEM approach including technological patterns for automotive spot welding parts. *Proceedings in Manufacturing Systems*, 14(4), 163-168.
- [5] Alexandru, T. G., & **Verdete, B. M.**, (2020). Knowledge-based engineering approach for facilitating weld design with the support of machine learning. 36<sup>th</sup> IBIMA international Conference, 36, 1-6.
- [172] Burca, M., Negoîtescu, S. – *Sudarea MIG/MAG*, Editura Sudura(2004), ISBN 973-8359-22-8, Timișoara.
- [174] **Verdete, B. M.**, Rontescu, C., & Alexandru, T.G. (2022). Capturing the temperature gradients of GMAW hardfacing processes by employing CFD and FEM simulation procedures. In *MATEC Web of Conferences* (Vol. 373). EDP Sciences, 65-77.
- [181] Kuijper, M. (2012). *First-order Representations of Linear Systems*. Germania: Birkhäuser Boston.
- [182] Bi, Q., Cai, W. J., Lee, E. L., Wang, Q. G., Hang, C. C., & Zhang, Y. (1999). Robust identification of first-order plus dead-time model from step response. *Control Engineering Practice*, 7(1), 71-77.
- [183] Kumar, A., Rana, S., Gori, Y., & Sharma, N. K. (2021). Thermal Contact Conductance Prediction Using FEM-Based Computational Techniques. In *Advanced Computational Methods in Mechanical and Materials Engineering* (pp. 183-217). CRC Press.
- [184] **Verdete, B. M.**, Pupaza, C., & Alexandru, T. G. (2023). Reduced order model for evaluating the temperature gradients of the surfacing weld process. *Romanian Journal of Information Technology and Automatic Control*, 33(1), 7-20.
- [185] Nishikawa, H. (2007). A first-order system approach for diffusion equation. I: Second-order residual-distribution schemes. *Journal of Computational Physics*, 227(1), 315-352.
- [186] Stoicuta, O., & Mandrescu, C. (2012), *Identificarea sistemelor*, România: Editura Universitas din Petroșani
- [187] Riabcev, I. A., Rosert, R., Senczenkov, I. K., & Turyk, E. (2017). Welding Imperfections in Surfaced Layers. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 61(3), 17-28.
- [188] \*\*\*, Standard SR-EN 5817:2003.