

Teză de doctorat

Teză de doctorat

Teză de doctorat

CONTRIBUȚII LA MODELAREA ȘI SIMULAREA PROCESELOR DE SUDARE CU ARC ELECTRIC ÎN MEDIU DE GAZE PROTECTOARE (Ar, CO₂) (Sinteză)

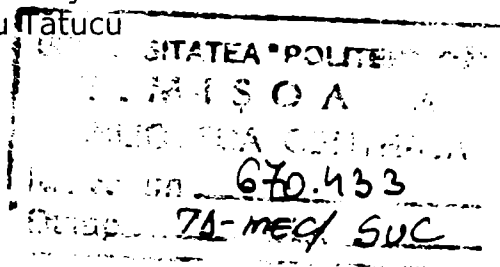
Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor la
Universitatea „Politehnica” din Timișoara
În domeniul INGINERIE MECANICĂ
de către

ING. LENUȚA SUCIU

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing.,Dr.Doc.Șt.,D.H.C.
Aurel Nanu

Referenți științifici: Prof.univ.dr.ing. Dorin Dehelean
Prof.univ.dr.ing. Traian Fleșer
Conf.univ.dr.ing. Iancu Tătuțu

Ziua susținerii tezei: 27.04.2007



Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2007

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele de doctorat în cadrul Facultății de Mecanică a Universității „Politehnica” din Timișoara.

Aduc mulțumiri deosebite, d-lui, Prof.dr.ing.,Dr.Doc.Șt., D.H.C. Aurel NANU pentru onoarea de a-mi fi conducător de doctorat, care datorită înaltului profesionalism cumulat de-a lungul multor ani de cercetare, mi-a îndrumat cu competență continuarea cercetărilor până la realizarea tezei de față.

Doresc să mulțumesc și distinsului Conf.univ.Dr.ing. Iancu TĂTUCU, pentru tot sprijinul oferit de-a lungul etapelor de pregătire și elaborare a tezei.

Autorul își exprimă gratitudinea și aduce sincere mulțumiri referenților pentru onoarea de a recenza această lucrare, care în urma unei analize complete au contribuit la îmbunătățirea conținutului și formei finale.

Țin să mulțumesc și distinsului Conf.univ.Dr.ing. Constantin MARTA, și d-nei Ș.l.drd.ing. Mihaela RĂDUCA, pentru ajutorul dat în legătură cu redactarea tezei de doctorat.

Mulțumesc de asemenea tuturor colegilor mei din cadrul Facultății de Inginerie a Universității „Eftimie Murgu” din Reșița, care au crezut în mine, pentru fructuoasele schimburi de idei purtate asupra temei, pentru observațiile interesante și sugestiile oferite.

Nu în ultimul rând, țin să mulțumesc familiei mele, prietenilor pentru sprijinul moral acordat, pentru orele și zilele oferite ducerii la bun sfârșit a acestei lucrări.

Timișoara,
martie 2007

Lenuța Suci

Suciu, Lenuța

Contribuții la modelarea și simularea proceselor de sudare cu arc electric în mediu de gaze protectoare(Ar, CO₂). Sinteza

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9.Nr. 7 , Editura Politehnica, 2007, 206 pagini, 130 figuri și 35 tabele.

ISSN: 1842-4937

ISBN: 978-973-625-442-0

Cuvinte cheie: sudare în mediu de gaze protectoare, model geometric, modelare matematică, discretizarea modelului, simulare, validare.

Rezumat,

Lucrarea prezintă determinarea câmpului termic din componentele de sudat, considerând arcul electric ca fiind întâi sursă fixă de sudare, apoi sursă mobilă, cu ajutorul programului soft de modelare și simulare Ansys, și compararea mărimilor simulate cu mărimile rezultate în urma determinărilor experimentale. Necesitatea cunoașterii câmpului termic din îmbinările sudate are o deosebită importanță în studiul tensiunilor reziduale și deformațiilor ce apar în structura sudată.

Rezolvarea modelelor matematice ale arcului electric de sudare, cu metoda elementelor finite, este al doilea obiectiv ce se urmărește în redactarea tezei.

De asemenea, deducerea modelului numeric elemental, pentru fiecare model matematic, este un alt obiectiv vizat. Se urmărește ca relațiile respective să fie explicite, și să poată fi implementate pe un calculator electronic, cu orice limbaj de programare. Se vor stabili și operațiile ce trebuie efectuate pentru asamblarea modelelor numerice elementale într-un singur model numeric global.

CUPRINS

1	NOIUNI INTRODUCTIVE.....	7
1.1	Oportunitatea și obiectivele tezei	7
2	REGIMUL DE SUDARE	9
2.1	Clasificarea parametrilor tehnologici de sudare și influența lor asupra geometriei cusăturii.....	9
2.2	Rezultate obținute experimental	9
2.3	Influența gazelor de protecție asupra cusăturii sudate	10
2.4	Materialele folosite la sudare	13
2.4.1	Alegerea sârmelor pentru sudarea în mediu de gaz protector	14
2.4.2	Alegerea gazelor de protecție	14
2.4.3	Tehnologia de sudare	15
3	MODELE MATEMATICE.....	16
3.1	Analize cuplate	16
4	ANALIZA TERMICĂ A ARCULUI ELECTRIC.....	18
4.1	Condiții inițiale și de frontieră	19
4.2	Ecuțiile modelului pentru domeniul studiat.....	19
5	MODELAREA ȘI SIMULAREA CÂMPULUI TERMIC CU SURSĂ FIXĂ LA SUDAREA CU ARC ELECTRIC ÎN MEDIU PROTECTOR DE CO ₂	21
5.1	Definirea modelului geometric	21
5.2	Stabilirea proprietăților de material	22
5.3	Analiza conducției electrice a arcului electric.....	22
5.4	Analiza curgerii gazului de protecție	25
5.5	Analiza câmpului termic din componente.....	33
5.6	Analiza magnetică	41
6	MODELAREA ȘI SIMULAREA CÂMPULUI TERMIC CU SURSĂ DE SUDARE MOBILĂ	42
6.1	Modelarea sursei termice	42
6.2	Stabilirea modelului geometric.....	48
6.2.1	Stabilirea proprietăților de material.....	49
6.3	Stabilirea modelului cu elemente finite	50
6.4	Evoluția în spațiu și în timp a câmpului termic	51
6.4.1	Variația în spațiu a temperaturii	58
6.4.2	Variația în timp a temperaturii.....	66
7	VERIFICĂRI EXPERIMENTALE	69
7.1	Efectuarea încercărilor	69
7.2	Compararea rezultatelor măsurate cu rezultatele experimentale	71
8	CONCLUZII FINALE.....	75
9	CONTRIBUȚII PERSONALE	77
	BIBLIOGRAFIE.....	78

1

1 NOȚIUNI INTRODUCTIVE

1.1 Oportunitatea și obiectivele tezei

Dezvoltarea sudării, ca proces tehnologic de îmbinare a materialelor metalice în ultimii 10-15 ani este indisolubil legată de dezvoltarea sudării în mediu de gaze protectoare în general și de sudarea MIG-MAG, și WIG.[16]

Studiile întreprinse în țările puternic industrializate ale lumii, ca S.U.A. Japonia sau Comunitatea Europeană, privind dinamica de dezvoltare a proceselor de sudare prin topire în ultimii 25 de ani și ponderea acestor procedee la sfârșitul secolului al XX-lea și începutul mileniului al treilea arată fără echivoc că sudarea în mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil MIG-MAG este procedeul cu cea mai spectaculoasă dinamică, respectiv cu cel mai mare volum de aplicare la ora actuală.[21].

Reducerea timpului de dezvoltare pentru noile modele de mașini, nevoia de reducere a costurilor și creșterea cerințelor privind siguranța măresc necesitatea unor unelte de simulare sofisticate. Modelarea și simularea au devenit un ajutor important pentru cunoașterea proprietăților produsului, pentru optimizarea detaliilor de construcție și a proceselor de producție, cât și pentru reducerea costurilor de dezvoltare și ale produsului și mărirea calității produsului.[14]

Un recurs este simularea proceselor de sudare și îmbinare printr-un set de ecuații matematice care reprezintă procesele fizice esențiale ale sudării. Elementele modelării sudării urmează direcțiile următoare, asociate cu diferite fenomene fizice, care apar în timpul sudării prin diferitele procedee de sudare MIG-MAG sau WIG, cu fascicul și în puncte:

- Sursă de căldură – interacțiune metal
- Câmp termic și curgere fluid
- Microstructură solidificare sudură
- Transformare de fază – microstructură sudură
- Tensiuni reziduale și deformații
- Proprietăți mecanice – geometria sudurii

Diferite programe de simulare au fost dezvoltate pentru a calcula una sau mai multe din elementele menționate. Munca este încă în desfășurare.[14]

Obiectivul acestei lucrări este determinarea câmpului termic din componentele de sudat, considerând arcul electric ca fiind întâi sursă fixă de sudare, apoi sursă mobilă, cu ajutorul programului soft de modelare și simulare Ansys, și compararea mărimilor simulate cu măsurile rezultate în urma determinărilor experimentale. Necesitatea cunoașterii câmpului termic din îmbinările sudate are o deosebită importanță în studiul tensiunilor reziduale și deformațiilor ce apar în structura sudată.

Stabilirea unui model matematic complet pentru arcul electric constituie al doilea obiectiv al lucrării. În acest scop, spre deosebire de lucrările de specialitate, arcul

electric nu va fi privit doar ca un sistem termic, ci ca unul în care se produc simultan procese electromagnetice, mecanice și termice.

De asemenea, deducerea modelului numeric elemental, pentru fiecare model matematic, este un alt obiectiv vizat. Se urmărește ca relațiile respective să fie explicite, și să poată fi implementate pe un calculator electronic, cu orice limbaj de programare. Se vor stabili și operațiile ce trebuie efectuate pentru asamblarea modelelor numerice elementale într-un singur model numeric global.

Aplicarea metodei elementelor finite, pentru o îmbinare sudată în mediu de gaz protector și verificarea experimentală a rezultatelor, este ultimul obiectiv al lucrării. În acest scop, mai întâi, se va stabili succesiunea operațiilor ce trebuie efectuate pentru aplicarea metodei.

Analiza conducției electrice oferă posibilitatea determinării distribuțiilor densității de curent și a puterii calorice specifice în regiuni cu o formă geometrică complexă, care practic nu pot fi determinate pe altă cale.

Tensiunile reziduale sunt tensiunile introduse de procesul de sudare. Aceste tensiuni se echilibrează în ansamblul îmbinării sudate, nemodificând valoarea eforturilor ce iau naștere în structura sudată prin acțiunea sarcinilor exterioare. Tensiunile reziduale apar local în imediata vecinătate a cusăturii sudate și se datorează neuniformității transformărilor structurale determinate de distribuția neuniformă a temperaturii. Tensiunile reziduale nu pot fi evitate, ele putând fi însă diminuate. Scăderea nivelului tensiunilor reziduale se poate realiza prin folosirea materialelor de adaos cu limită de scurgere scăzută, soluție nu totdeauna posibilă economic. Tensiunile reziduale se pot micșora și ca rezultat al aplicării unui tratament termic prin încălzirea uniformă a îmbinării sudate, ca urmare a faptului că prin mărirea temperaturii limita de curgere se micșorează. Micșorarea tensiunilor reziduale pe calea încălzirii reduce într-o oarecare măsură rezistența metalului și anulează ecruisajul format în zonele învecinate cusăturii, în urma sudării.

Spre deosebire de majoritatea lucrărilor de specialitate din domeniul sudării prin topire, în care arcul electric este studiat doar din punct de vedere termic, în lucrarea de față acesta este privit ca un sistem în care au loc simultan procese electromagnetice, termice, mecanice și de curgere a fluidelor, ce se influențează reciproc.

Sudarea MIG-MAG are un grad mare de universalitate, putându-se suda în funcție de varianta de sudare (gazul de protecție) o gamă foarte largă de materiale, oțeluri nealiate, cu puțin carbon, oțeluri slab aliate sau înalt aliate, metale și aliaje neferoase, atât în industria constructoare de mașini, energetică, navală, etc.[21]

2 REGIMUL DE SUDARE

2.1 Clasificarea parametrilor tehnologici de sudare și influența lor asupra geometriei cusăturii

Tehnologia sudării unei structuri este un ansamblu de informații necesare pentru realizarea îmbinării astfel ca aceasta să satisfacă condițiile de calitate și de economicitate, impuse prin caietul de sarcini. Aceste informații se exprimă cu ajutorul unor mărimi numite parametri tehnologici de sudare.

2.2 Rezultate obținute experimental

Pentru o cusătură sudată de colț, s-au modificat pe rând următorii parametri principali ai regimului de sudare: tensiunea arcului, curentul de sudare, viteza de avans a sârmei electrod, pentru a se putea observa influența lor asupra aspectului cusăturii sudate, cunoscut fiind faptul că acești parametri influențează în mod favorabil sau nu calitatea îmbinării sudate.

S-au sudat probe de oțel X60, cu dimensiunile 10x15x200mm, cu procedeul de sudare MAG, gazul de protecție folosit este dioxidul de carbon. Probele au fost prelevate din subansamble sudate, în cadrul S.C. U.C.M. S.A. Reșița, Platforma Sudaje.

Modificarea principalilor parametri ai regimului de sudare a condus la următoarele concluzii:

- Se observă că tensiunea arcului electric U_a acționează asupra lățimii cusăturii b , în sensul că odată cu creșterea lui U_a crește și b , celelalte elemente geometrice fiind influențate nesemnificativ.

- Lățimea cusăturii crește liniar cu U_a , iar supraînălțarea h scade liniar cu U_a .

- Pentru obținerea unui arc stabil și asigurarea unui transfer de metal cu stropiri minime, între cei doi parametri principali de sudare curent de sudare și tensiunea arcului trebuie să existe o corelație optimă, cunoscută prin relația:

$$U_a = 14 + 0,05I_s$$

Relația este valabilă în cazul sudării în CO₂.

- Scăderea vitezei de avans a sârmei, prin scăderea implicită a curentului de sudare, sub valoarea optimă determină creșterea tensiunii prin scăderea pătrunderii și reciproc, creșterea vitezei de avans a sârmei, determină reducerea tensiunii prin scurtarea lungimii arcului și implicit reducerea lățimii cusăturii corelată cu creșterea supraînălțării, dar fără a se observa o creștere vizibilă a pătrunderii datorită curgerii băii în fața arcului electric de sudare.

- Curentul de sudare I_s influențează asupra pătrunderii p a cusăturii, în sensul că odată cu creșterea lui I_s crește și p , și are o influență redusă asupra celorlalte elemente geometrice ale cusăturii.

Rezultă că secțiunea cusăturii crește odată cu creșterea curentului de sudare.

- Pentru obținerea unei cusături sudate de calitate, intensitatea I_s a curentului de sudare trebuie corelată cu diametrul d_e al electrodului și cu grosimea g a componentelor de îmbinat.

- La sudarea cu un curent mai mic decât cel recomandat, arcul electric este instabil și rezultă o cusătură de calitate redusă, cu întreruperi. Sudarea cu un curent electric de intensitate mai mare decât cea recomandată conduce la încălzirea excesivă a electrozilor, cu degradarea învelișului de protecție și la apariția de defecte în cordonul de sudare.

- În general, cu cât I_s și U_a vor fi mai mari, cu atât căldura provenită din sudare va fi mai mare și cu cât se va suda cu V_s mai mare, cu atât cantitatea de căldură în îmbinare va scădea, ținându-se seama de faptul că în componentele ce se assemblează prin sudare cantitatea totală de căldură provine din căldura de preîncălzire și din cea dezvoltată în arcul electric.

- Reglarea curentului de sudare la sudarea MIG-MAG se face prin modificarea vitezei de avans a sârmei electrod, viteză de avans redusă – curent de sudare mic; viteză de avans ridicată – curent mare. Atingerea unor valori ridicate ale curentului de sudare, și implicit ale vitezei de avans a sârmei electrod, conduce la un consum mare de sârmă, cunoscându-se faptul că sârma subțire are un preț de cost mai mare decât cea groasă.

- Viteza de avans V_e acționează asupra supraînălțării (înălțimii) h a cusăturii, aceasta crescând la o viteză de sudare mai mică, prin depunerea abundentă de metal și scăzând cu creșterea vitezei de avans a electrodului. De asemenea, odată cu creșterea lui V_e scad pătrunderea p și lățimea b , ale cusăturii.

- Creșterea vitezei de sudare V_e determină scăderea tuturor elementelor geometrice ale cusăturii.

- Viteza de avans a sârmei electrod depinde de materialul sârmei, dar și de diametrul acesteia.

- Viteza de avans a sârmei electrod nu este influențată de gazul de protecție

- Creșterea capătului liber al electrodului, conduce la creșterea vitezei de avans a sârmei

- Energia liniară variază proporțional cu baia de metal topit și implicit cu zona influențată termic. La creșterea energiei liniare, scade viteza de răcire a îmbinării sudate.

2.3 Influența gazelor de protecție asupra cusăturii sudate

Gazele de protecție au rolul de a realiza o izolare a coloanei arcului electric de mediul exterior, ferind-o de acțiunea dăunătoare a acestuia, și contribuind la realizarea unei îmbinări sudate de calitate corespunzătoare.[1], [41].

La sudarea WIG se folosesc gaze inerte: argon, heliu, amestecuri argon-heliu și amestecuri argon-hidrogen (1-10% H_2). Alegerea gazului de protecție se face având în vedere cele ce se prezintă mai jos.

Potențialul de ionizare al heliului (24,5V) este considerabil mai mare decât al argonului (15,7V). Din acest motiv, la sudarea cu același curent I_s și aceeași lungime de arc, tensiunea arcului U_a este mai mare în heliu decât în argon, așa cum se arată în fig.2.1. Ca urmare, puterea arcului electric este mai mare în heliu decât în argon, ceea ce face ca pătrunderea să fie mai mare în cazul sudării în heliu decât cea care se obține în cazul sudării în argon. Însă, arcul electric este mai stabil în cazul sudării în argon decât în heliu.

Argonul se utilizează, în general, la sudarea oricăror materiale metalice. Protecția gazoasă trebuie asigurată pe tot parcursul arderii arcului electric, însă și după întreruperea acestuia, până la răcirea electrodului nefuzibil. În caz contrar, apar defecte de sudare, și se degajă vapori de wolfram cu efect nociv.

Gazul de protecție folosit la sudarea MIG/MAG depinde de materialul componentelor ce se sudează, conform tabelului 2.6

Alegerea gazului de protecție se face având în vedere influența sa asupra procesului de sudare. Însușirile fizice ale gazului de protecție influențează forma cusăturii și mărimea pătrunderii, viteza de sudare utilizată, ușurința de amorsare și stabilitatea arcului electric.[1]

Cu cât potențialul de ionizare este mai redus, este necesară o energie mai mică pentru ionizare, ceea ce face posibilă o amorsare mai ușoară a arcului electric și o creștere a stabilității acestuia.

Energia de disociere a gazelor biatomice (bioxid de carbon, hidrogen) influențează în mod favorabil bilanțul termic în zona cusăturii.[21]

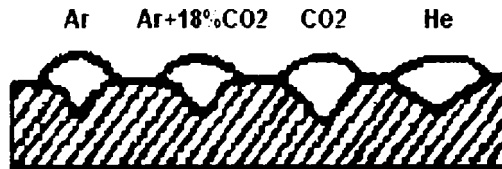


Fig.2.3

Un gaz cu o conductibilitate termică mai mare înseamnă un transfer mai bun a căldurii dezvoltate la electrozi, și deci o căldură dezvoltată în arc mai mare, ceea ce conduce la o creștere a pătrunderii, așa cum se observă în fig.2.3

Ca urmare, conductibilitatea termică a gazului are efecte asupra temperaturii băii topite, formei sudurii, precum și asupra vitezei de sudare aplicabile. Se remarcă în acest sens efectul heliului la sudarea aluminiului (material cu conductibilitate termică înaltă) sau a hidrogenului în amestec cu argonul la sudarea oțelurilor inoxidabile.[1]

Însușirile chimice ale gazului de protecție influențează comportarea metalurgică a acestuia, precum și suprafața sudurii. Astfel, de exemplu, prezența oxigenului conduce la arderea unor elemente de aliere, și la mărirea fluidității băii prin micșorarea tensiunii superficiale a acesteia. O atmosferă conținând bioxid de carbon are ca efect o aliere cu carbon ii, și în același timp, o creștere a supraîncălzirii cusăturii.

Mixtura cea mai folosită este Corgon, care este un amestec de 18% bioxid de carbon și 82% argon și în fig.2.4 se prezintă forma cusăturii obținute cu o astfel de mixtură, comparativ cu cea obținută în cazul folosirii numai a bioxidului de carbon.

Se observă că în ultimul caz se obține o pătrundere laterală mai mare decât în primul caz. O mare influență o are gazul de protecție asupra tipului de transfer a picăturilor de metal lichid prin coloana arcului electric.

În primul rând, având în vedere cele precizate mai sus, gazele cu conductibilitate termică mare dau un transfer în picături mari, astfel, dacă pentru azot picăturile au diametrul de 1,6mm, la heliu acestea ajung la 3,8mm. Picături mari se obțin în arcul de bioxid de carbon (4,0mm diametru) și la cel în hidrogen (4,2mm). În cazul folosirii azotului se obțin picături cu diametrul de 2,2mm.

Se menționează că influența conductibilității termice a gazului de protecție depinde de temperatură.

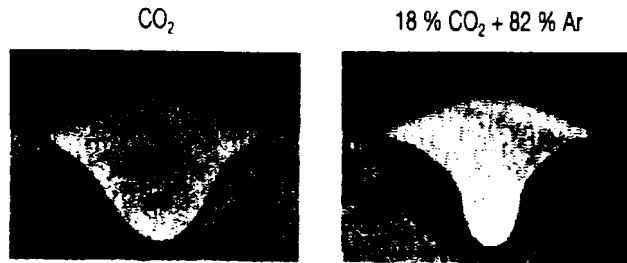


Fig. 2. 4

La temperaturi mari argonul este slab conductor termic și slab conductor electric, iar la temperaturi mai scăzute nu mai este ionizabil termic, deci nu mai este conductor electric. Curentul electric poate trece de la sârmă la piesă numai în zona argonului cald, adică în miezul coloanei arcului electric și pe zone mai largi în punctele de atac ale arcului (fig.2.5.a).

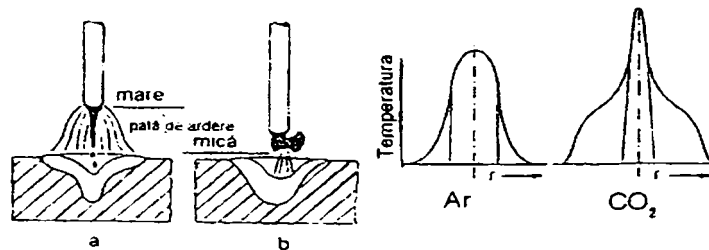


Fig. 2. 5

Situația este diferită în cazul folosirii bioxidului de carbon sau amestecuri de argon cu peste 25% bioxid de carbon, care disociază la temperatura de 3000°C, pentru care conductibilitatea termică și electrică a amestecului sunt foarte bune. Pentru conducerea curentului electric este suficient ca la capătul sârmei să existe o pată de ardere mică (fig.2.5.b). Căldura este transmisă doar la această pată anodică, și capătul

sârmei este mult mai cald decât un punct aflat la o anumită distanță de capătul sârmei. Ca urmare a temperaturii mai scăzute, forța Pinch nu poate determina desprinderea picăturii și nu este posibilă o separare ordonată a picăturilor. Trecerea picăturilor se face adesea prin scurtcircuitări, rezultând o stropire puternică.[2]

2.4 Materialele folosite la sudare

La ora actuală, standardele românești în domeniul materialelor pentru sudare s-au aliniat la standardele europene în domeniu, sau sunt în curs de aliniere. De aceea, ne vom referi atât la unele, cât și la celelalte, simbolizându-le cu prefixul EN.[48],[57],[58],[59],

Oțeluri pentru țevi X60. Sudare prin procedeul MAG cu electrod fuzibil

a) Metalul de bază

Metalul de bază al țevilor din care se realizează conductele magistrale trebuie să fie oțel X60 conform API 5 L sau L415 NB conform EN 10208-2.

Analiza pe oțel lichid trebuie să satisfacă condițiile din tabelul 2.9, respectiv cele din API 5L și EN 10208-2.

Tabelul 2.9

Simbolizare oțel Standard	Conținut maxim [%]							CE
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Ti	
X60 API5L	0,26	---	1,40	0,036	0,030	---	0,04	Max 0,43
L415LNB EN10208-2	0,21	0,45	1,6	0,025	0,020	0,05	0,04	Prin acord

$$CE=C+Mn/6+(Cr+Mo)/5+(Cu+Ni)/15$$

Suma V+Nb+Ti nu va depăși 0,15%

În tabelul 2.11 se prezintă caracteristicile mecanice care trebuie să le îndeplinească țevile din oțel X60 sau L 415NB în conformitate cu prevederile din API 5L și EN 10208-2.

Țevile se livrează în stare normalizată.

Tabelul 2.11.

Simbolizare oțel / standard	Limită de curgere [N/mm ²]	Rezistență la rupere [N/mm ²]	Alungire %	Energia de rupere [J] la încercare prin șoc la 0°C
X60 API 5L	min. 414	517-758	---	min. 27
L 415NB EN 10208	415-565	min. 520	min. 18	min. 40

La sudarea conductelor realizate din țevi, din oțel X60 trebuie să se utilizeze următoarele procedee de sudare:

- pentru rădăcina îmbinării: sudarea cu arc electric cu electrozi fuzibili în medii de gaz activ, sudare MAG (135).

- pentru straturile de umplere: sudare MAG cu sârmă tubulară (136). Corespunzător procedeele de sudare se aleg și materialele pentru sudare. Astfel, pentru sudarea MAG a rădăcinii trebuie să se utilizeze:
 - sârmă plină, tip G3 Si1, conform EN 440
 - gaz de protecție : CO₂(C₁-EN 439).
 Compoziția chimică pentru sârma plină G3Si1 trebuie să satisfacă cerințele din EN 440.

2.4.1 Alegerea sârmelor pentru sudarea în mediu de gaz protector

Sârmele de sudare se fabrică într-o gamă largă de diametre:[59]
 $d_e = 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2; 2,5$ [mm].

Suprafața sârmelor este acoperită cu un strat de Cu care protejează sârma împotriva oxidării și în același timp asigură un contact electric bun.

La sudarea rădăcinii se utilizează sârmă plină tip G3Si1-EN 440, $\Phi 1,0$ mm și gaz de protecție C1 (EN 439).

Straturile de umplere se realizează utilizând sârma tubulară cu autoprotecție tip T 46 2 PC 1H5. Sârme tubulare pentru sudarea MAG (136) tip T 46 2 PC 1H5, conform SR EN 758, cu diametrul de 1,2 mm, în cuplu cu gaz de protecție tip C1, conform SR EN 439.

2.4.2 Alegerea gazelor de protecție

Gazele de protecție care fac obiectul lucrării sunt: CO₂, simbolizat prin C1, conform SR EN 439 și amestecul de gaze Corgon 18 (18 % CO₂ + 82 % Ar) simbolizat prin M2.1, conform SR EN 439.[57].

Compoziția chimică și unele proprietăți fizice ale acestor gaze de protecție trebuie să corespundă cu valorile prezentate în tabelul 2.14.

Tabelul 2.14

Denumirea caracteristicii	Prescripții SR EN 439	
	C1	M2.1
Compoziția chimică, %	CO ₂ min. 99,7	CO ₂ 18 + Ar 82
Umiditate maximă	200ppm	200ppm
Punct de rouă, max. la 1,013 bar în °C	-35	-35

Condițiile tehnice de livrare pentru gazele de protecție trebuie să satisfacă cerințele stipulate în SR EN 439.

Sârmele pline și tubulare trebuie să asigure o comportare la sudare bună, în condițiile utilizării procedeele de sudare de mare productivitate cu caracteristici performante (rată de depunere ridicată, caracteristici mecanice corespunzătoare pentru structuri navale). Stropirea trebuie să fie redusă, aspectul depunerii regulat.

Țevile având capetele prelucrate conform figurii 2.9, se poziționează pentru sudare.

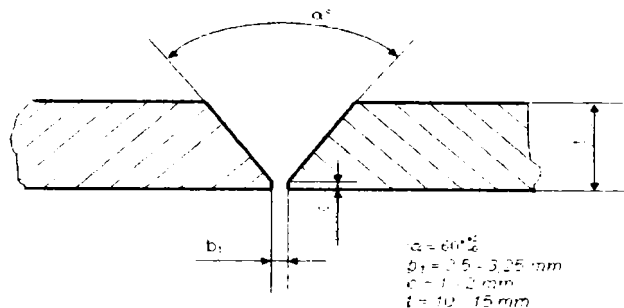


Figura 2.9. Pregătirea pieselor de îmbinat, recomandată la sudarea semimecanizată MAG [62]

Componentele se vor alinia și fixa fără a fi forțate, deformată la cald sau la rece. Ele se vor alinia cu o abatere de 1 mm la un metru limiar măsurată în două plane perpendiculare trecând prin axa conductei.

Poziționarea țevilor se va executa cu dispozitive de centrare-poziționare. Aceste dispozitive vor fi de tipul celor utilizate la realizarea procedurilor de sudare. Poziționarea se face astfel încât alinierea la interiorul țevilor să fie plană și ea se verifică cu nivela cu bulă de aer.

La poziționarea țevilor se va asigura rostul pentru sudare prescris prin procedurile de sudare calificate. Deschiderea rostului se verifică cu calibre adecvate. Înainte de poziționarea țevilor se efectuează o polizare la lucru metalic a rostului și a zonelor adiacente acestuia. După poziționarea țevilor cu ajutorul dispozitivelor de centrare și aliniere se face prinderea în puncte de sudură, puncte realizate diametral opus, în număr de cel puțin 8 realizate echidistant, lungimea lor fiind de 40-50 mm.

Sudurile de prindere vor fi examinate vizual, cele fisurate se vor elimina prin polizare, fără a mai fi resudate, eliminarea lor efectuându-se la sudarea rădăcinii. Prinderile provizorii nefisurate vor fi incluse în sudura de rădăcină.

2.4.3 Tehnologia de sudare

Cuprinde principalii parametri de sudare, și este prezentată în tabelul 2.15

Tabelul 2.15

Rând	Procedeu	Dimensiunea metalului de adaos [mm]	Intensitatea curentului [A]	Tensiunea [V]	Tip curent polaritate	Viteza de avans a sârmei [m/min]	Energia termică introdusă [J/cm] max.
1	135	Ø 1	320	17-18	cc ⁺	5,3	11500
2-3	136	Ø 2	215-220	18-19	cc ⁺	4,4	8500
4-5	136	Ø 2	245-250	19-20	cc ⁺	5,1	10000

Debitul gazului de protecție: 18 l/min

3 MODELE MATEMATICE

3.1 Analize cuplate

În timpul unei operații de sudare cu arc electric, patru tipuri de procese sunt cuplate :

- 1) procese termice
- 2) procese mecanice
- 3) procese metalurgice
- 4) procese electromagnetice

În cadrul unei analize cuplate se studiază mai multe procese, care în principiu, pot fi din orice domeniul al fizicii. Pentru aplicațiile frecvent utilizate în practica industrială, intervin procese de natură: electrică, magnetică, termică, mecanică (structurală). Pentru fiecare proces, se definește câte o analiză, iar anumite mărimi de ieșire (rezultate) ale unei analize sunt transferate ca mărimi de intrare (sarcini) pentru o altă analiză.[55]

În cazul proceselor menționate, succesiunea analizelor și mărimilor ce se transferă sunt prezentate în fig.3.1.

Se începe cu analiza conducției electrice, care se realizează pentru o temperatură egală cu temperatura mediului ambiant, iar ca sarcină se poate folosi fie intensitatea I a curentului electric printr-o secțiune a unei regiuni conductoare a domeniului, fie căderea de tensiune electrică U , pe una sau mai multe regiuni conductoare. Valorile obținute pentru densitatea JA a curentului de aducție (de excitație) sunt transferate ca sarcină pentru analiza magnetică. În general, în cazul unui regim nestaționar, prin această analiză se determină densitatea curenților electrice induși, care se cumulează cu JA obținând densitatea totală JT , care este transferată ca mărime de intrare pentru analiza conducției electrice. Cu această densitate, prin analiza conducției electrice, se determină puterea calorică specifică PS , care este transferată ca sarcină pentru analiza termică, ce începe cu o temperatură inițială TI . Temperatura T în punctele domeniului, obținută în urma analizei termice, este transferată ca mărime de intrare pentru analiza conducției electrice și pentru analiza magnetică. Proprietățile de material sunt reactualizate pentru noua valoare a temperaturii, și în continuare lucrurile se repetă. Dacă se realizează și o analiză structurală, atunci ca mărime de intrare sunt transferate: temperatura T , obținută din analiza termică și forțele magnetice F , obținute din analiza magnetică. Prin analiza structurală, se determină deformațiile D ale domeniului, care sunt transferate pentru celelalte analize.

În prima variantă se execută separat fiecare analiză, în ordinea menționată. Pentru fiecare analiză se folosesc elemente finite ce au ca și necunoscute principale (grade de libertate) mărimile corespunzătoare modelului matematic, ce descrie procesul respectiv, iar matricea de rigiditate și vectorul termenilor liberi trebuie să aibă forma menționată în capitolele precedente, pentru modelul matematic considerat.

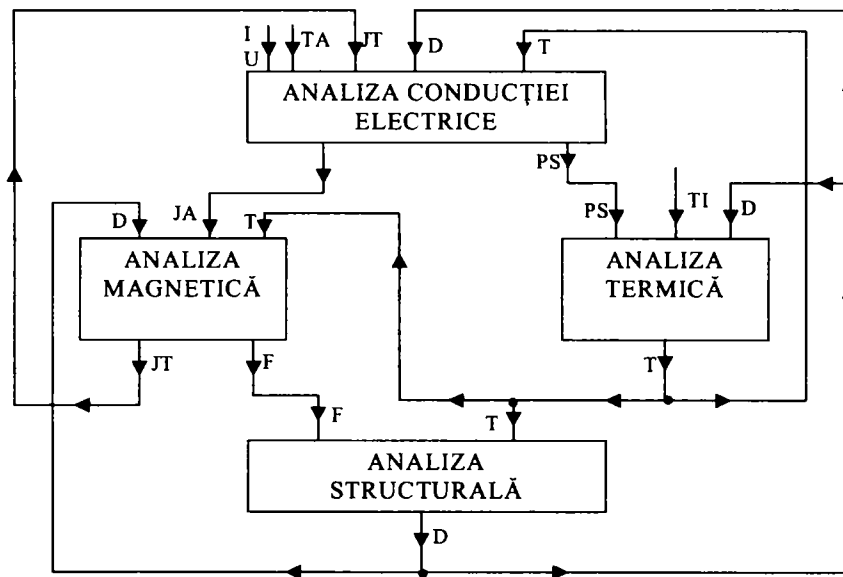


Fig.3.1 Modelul analizelor cuplate

UNIV. "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

4 ANALIZA TERMICĂ A ARCULUI ELECTRIC

Studiul termic al unei îmbinări sudate urmărește determinarea evoluției în timp a temperaturii din punctele componentelor ce se sudează, deoarece de această evoluție depinde atât calitatea îmbinării, cât și structura metalografică a cusăturii.

Ca urmare, scopul final al studiului termic, la care se referă prezentul capitol, constă în aflarea câmpului termic scalar nestaționiar $T(t, \vec{r})$. [9],[17],[36],

Arcul electric este privit ca fiind sursa de căldură, ce determină încălzirea componentelor de sudat. Se impune cunoașterea câmpului termic din punctele arcului electric, pentru a putea calcula căldura transmisă de la acesta la componentele ce se sudează.

Însă câmpul termic al arcului electric este influențat de gazul de protecție și studiul acestuia se face pentru a putea determina căldura pierdută prin convecție de arcul electric.

În concluzie, domeniul ce se analizează este constituit din componentele de sudat, arcul electric și gazul de protecție utilizat.

Având în vedere că gazul de protecție este în mișcare, se va considera cazul cel mai general al unui fluid, privit ca un mediu continuu, aflat în mișcare față de un sistem de referință ce se admite ca fiind imobil. [47]

Ecuatiile modelului trebuie astfel stabilite încât să permită determinarea câmpului termic, dintr-un punct oarecare P al domeniului ocupat de fluid, adică a câmpului scalar

nestaționiar $T=T(t, \vec{r})$, unde \vec{r} este vectorul de poziție al lui P față de originea unui sistem de coordonate, ales astfel încât să fie fix față de sistemul de referință respectiv.

Pentru studiul fluidului se utilizează metoda Euler, ceea ce înseamnă că, în domeniul fluidului, sunt definite următoarele câmpuri:

- un câmp vectorial al vitezelor $\vec{v} = \vec{v}(t, \vec{r})$, unde \vec{v} este viteza din P ;

- un câmp scalar al temperaturilor $T = T(t, \vec{r})$, unde T este temperatura din P .

Fluidul se admite a fi un mediu izotrop, cu proprietățile definite prin câmpurile scalare, în general nestaționare: al densității $\rho = \rho(t, \vec{r})$; al căldurii specifice $c = c(t, \vec{r})$; al conductivității termice $\lambda = \lambda(t, \vec{r})$.

Pentru a realiza un studiu mai exact al transferului de căldură prin convecție, de la arcul electric la gazul de protecție, fluidul considerat se presupune a fi vâscos, proprietate caracterizată prin câmpul scalar al coeficientului de vâscozitate dinamică: $\eta = \eta(t, \vec{r})$.

În domeniul ocupat de fluid se alege un volum de material V^* , care, la un moment oarecare t , coincide cu un volum de control V , mărginit de o suprafață închisă S , iar P se presupune a fi un punct oarecare al volumului de control.

Ecuatiile modelului se obțin prin aplicarea, pentru volumul de material considerat, a unor legi de conservare: legea conservării energiei (ecuația energiei), ecuația

conservării masei (ecuația de continuitate), ecuația impulsului mecanic (ecuațiile mișcării) dar și ecuația radiației termice.

4.1 Condiții inițiale și de frontieră

Considerând cunoscute proprietățile fizice ale mediului din domeniul considerat, cele 5 ecuații ale modelului, permit determinarea a 5 necunoscute:

- valorile componentelor vitezei, adică $v_x=v_x(t, \bar{r})$, $v_y=v_y(t, \bar{r})$, $v_z=v_z(t, \bar{r})$;
- presiunea, adică $p=p(t, \bar{r})$;
- temperatura, adică $T=T(t, \bar{r})$.

În cazul unui fluid, dacă se cunoaște ecuația barometrică, adică funcția scalară $\rho=\rho(p)$, atunci se poate determina și densitatea fluidului, adică $\rho=\rho(t, \bar{r})$.

Însă, în general, $\bar{H} = \int_V \rho \bar{v} dV$

Condițiile inițiale se referă la valorile mărimilor în momentul inițial $t_0=0$, și în general se exprimă sub forma:

$$\bar{v}(t, \bar{r}) = \bar{v}_0(\bar{r}) = \bar{F}_v(\bar{r}); \quad p(t, \bar{r}) = p(\bar{r}) = F_p(\bar{r}); \quad T(t, \bar{r}) = T(\bar{r}) = F_T(\bar{r}),$$

unde $\bar{F}_v(\bar{r})$, $F_p(\bar{r})$, $F_T(\bar{r})$ trebuie să fie funcții cunoscute.

Condițiile de frontieră constau în a impune ca fiecare mărime să aibă o anumită distribuție în punctele frontierei S a domeniului considerat.

De obicei, pentru viteză și presiune, condițiile de frontieră sunt de tip Dirichlet, care, în general, se exprimă prin:

$$\bar{v}(t, \bar{r}) \Big|_S = \bar{v}_s(t, \bar{r}); \quad p(t, \bar{r}) \Big|_S = p_s(t, \bar{r}), \quad (4.54)$$

unde $\bar{v}_s(t, \bar{r})$, $p_s(t, \bar{r})$ trebuie să fie funcții cunoscute.

4.2 Ecuațiile modelului pentru domeniul studiat

După cum s-a precizat, domeniul de studiu este constituit din: electrod, arcul electric, componentele ce se sudează și gazul de protecție. Pentru a reduce volumul de calcul, și având în vedere scopul prezentei lucrări, se fac anumite ipoteze simplificatoare, ce se prezintă în cele ce urmează.

Se presupune că electrodul este în stare solidă, pe tot parcursul procesului de sudare, ceea ce înseamnă că se face abstracție de starea lichidă a metalului din baia de sudare și de picăturile de metal lichid ce se formează în vârful electrodului, și care se transferă în baia de sudare prin coloana arcului electric.

Deoarece toate cele trei regiuni sunt parcurse de curentul electric de sudare, puterea calorică specifică $q_d \neq 0$, pentru orice punct al fiecărei regiuni. Distribuția spațială precum și variația în timp a lui q_d se determină pe baza modelului potențialelor electromagnetice al câmpului electromagnetic menționat, aplicat pentru ansamblul celor trei regiuni.

Gazul de protecție este considerat ca un fluid izotrop și omogen, aflat în mișcare față de sistemul de referință menționat. Studiul gazului de protecție urmărește determinarea coeficientului de transmisie a căldurii prin convecție de la coloana arcului electric la mediul ambiant. În acest scop, pentru regiunea ocupată de gazul de protecție se folosesc toate ecuațiile modelului, prezentate în paragraful anterior. Însă, la un procedeu de sudare în mediu de gaz protector, amorsarea arcului electric se face după ce gazul de protecție ajunge într-un regim de curgere laminară. Pe această bază, și neglijând regimul tranzitoriu, ce intervine imediat după amorsarea arcului electric, ecuațiile modelului se vor particulariza pentru cazul unei curgeri laminare.[41],[49]

Întrucât gazul de protecție are o curgere exterioară, se va considera cazul general al unui corp solid, aflat într-un curent de fluid. Se notează cu S suprafața închisă ce mărginește corpul solid, care se va numi perete, și cu T_p temperatura într-un punct oarecare M al lui S , ce se va numi temperatura peretelui.

De asemenea, datorită vâscozității fluidului apar forțe tangențiale între straturile de fluid care fac ca, în lungul normalei în M la S , valoarea vitezei să crească. Prandtl a emis ipoteza că vâscozitatea fluidului se manifestă numai într-o zonă din jurul punctului S , pe care a numit-o strat limită hidrodinamic, în rest fluidul poate fi considerat ideal (fără vâscozitate) și având o mișcare laminară, izostaționară (potențială)

De asemenea, apare un schimb de căldură între solid și fluid, care, în ipoteza că fluidul nu conține surse de căldură și că $T_p > T_f$, are sensul de la solid la fluid. Acest schimb de căldură face să crească temperatura fluidului, astfel că într-un punct oarecare al fluidului temperatura T este mai mare decât valoarea corespunzătoare câmpului $T_f(\bar{r})$ din acel punct.

Prin analogie cu stratul limită hidrodinamic, se face ipoteza că prezența solidului modifică temperatura fluidului numai într-o porțiune din jurul solidului, numită strat limită termic, iar în restul fluidului se poate face abstracție de existența solidului.

Ca urmare, în lungul normalei dusă în M la S , temperatura scade de la valoarea T_p în M la valoarea corespunzătoare câmpului $\bar{v}_T(\bar{r})$ dintr-un punct M'' , iar în restul punctelor de pe normală temperatura are valoarea corespunzătoare câmpului $T_f(\bar{r})$ din punctele respective.

În cazul considerat, corpul solid este arcul electric, ce s-a admis de forma unui cilindru drept, iar curgerea gazului de protecție are direcția axei de simetrie, ceea ce înseamnă că l este lungimea arcului electric.

5 MODELAREA ȘI SIMULAREA CÂMPULUI TERMIC CU SURSĂ FIXĂ LA SUDAREA CU ARC ELECTRIC ÎN MEDIU PROTECTOR DE CO₂

5.1 Definirea modelului geometric

Modelul geometric este constituit din probe de oțel X60, sudate cap la cap, având dimensiunile 10x15x200mm, prin procedeul MAG, gazul de protecție este dioxidul de carbon. Sârma de sudare de tip G3Si1 are diametrul, $d_e=1,2\text{mm}$, lungimea liberă a electrodului 12mm, tensiunea arcului 33V, curentul de sudare 395 A, viteza de sudare 47cm/min. Pe baza datelor de mai sus s-a obținut modelul geometric prezentat în fig.5.1.

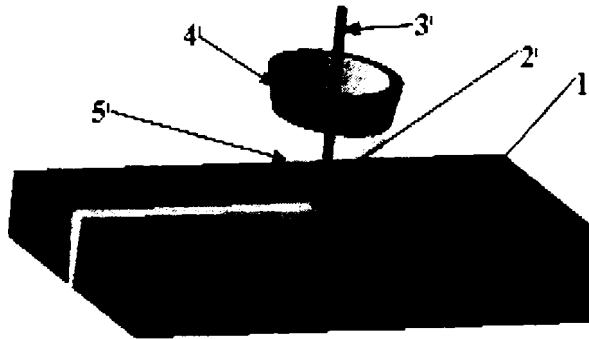


Fig. 5.1. Modelul geometric

Deci, domeniul considerat este constituit din următoarele subdomenii (regiuni):

- 1- componente;
- 2- arc electric;
- 3- sârma electrod;
- 4- duza pentru gaz;
- 5- spațiul ocupat de gazul de protecție.

Aceste zone formează domeniul principal al analizei, însă dacă nu se cunosc precis condițiile de frontieră se mai folosesc încă două regiuni. Cu una dintre ele se modelează aerul din jurul domeniului principal și se numește spațiu liber. Cealaltă este folosită pentru a modela scăderea la zero a inducției magnetice, respectiv scăderea temperaturii la o valoare egală cu temperatura mediului ambiant și formează spațiul

infinat al analizei. Fiecare dintre aceste regiuni este aleasă de forma unui cilindru drept, coaxial cu axa de simetrie a modelului principal, de rază și înălțime suficient de mare. Pentru a nu complica desenul, cele două regiuni nu s-au mai reprezentat în fig.5.1.

5.2 Stabilirea proprietăților de material

Analiza electromagnetică implică ca, pentru fiecare mediu ce intervine, să se cunoască: permeabilitatea magnetică relativă μ_r și rezistivitatea electrică ρ_{resv} . [10],[11].

Analiza termică poate fi realizată numai dacă, pentru mediul din fiecare subdomeniu, se cunoaște conductivitatea termică K , în caz că se admite un regim termic staționar. Pentru a putea studia un regim termic nestaționar mai trebuie cunoscute: densitatea, dens și căldura specifică c .

De asemenea, în situația că intervin schimbări de fază, trebuie cunoscută și entalpia ent. Pentru studiul curgerii bioxidului de carbon trebuie cunoscut coeficientul de vâscozitate dinamică η și exponentul adiabatic γ .

Se subliniază faptul că acuratețea rezultatelor obținute depinde de precizia cu care se cunosc proprietățile de material menționate, proprietățile de material pentru aer, dar și pentru arcul electric de sudare. Totodată, rezultatele obținute sunt cele mai apropiate de cele reale, dacă se cunosc dependențele acestor proprietăți de temperatură.

5.3 Analiza conducției electrice a arcului electric

Scopul final al metodei prezentate este determinarea câmpului termic din componentele ce se sudează. Pentru aceasta, se utilizează două variante.

În prima variantă arcul electric este privit ca un mediu, aflat la temperatură constantă, fără inerție termică, care dezvoltă căldură prin efectul termic al curentului de sudare, pe care o transmite, prin conducție termică componentelor și sârmei electrod.

În a doua variantă, se iau în considerare și inerția termică precum și dependența de temperatură a proprietăților de material, pentru arcul electric.

În cazul primei variante, procesele se studiază separat. Mai întâi se determină puterea calorică specifică, la temperatură constantă, care este folosită ca sarcină pentru analiza termică.

Modelul geometric este constituit doar din două componente: arcul electric și sârma electrod.

Având în vedere că se poate considera că există o simetrie plană în lungul cusăturii și transversal pe aceasta, și ținând cont de posibilitățile de care a dispus autorul, se folosește modelul redus la 1/4, prezentat în fig.5.2. Rețeaua de discretizare este realizată cu elemente finite 3D, de formă tetraedrală, ce au forma prezentată în fig.5.3.



Fig.5.2 Model geometric simplificat

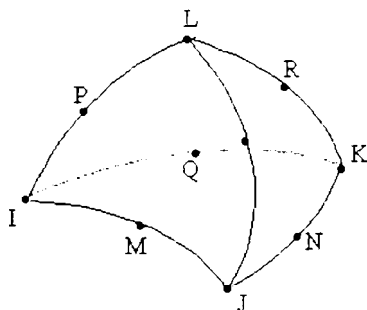


Fig.5.3. Element finit

S-a obținut o rețea de discretizare de forma prezentată în fig.5.4.

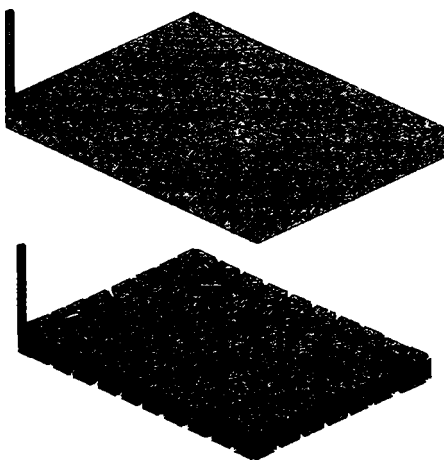


Fig.5.4. Rețeaua de discretizare

Singura proprietate de material ce interesează este rezistivitatea electrică.

Ca sarcină s-a definit intensitatea curentului de sudare, prin suprafața superioară a sârmei electrod, la valoarea de 98,75 A, deoarece se utilizează un model redus la 1/4.

Ca și condiție de frontieră s-a impus valoarea zero pentru potențialul electric pe suprafața inferioară a componentelor, care, de altfel, sunt conectate la masă.

Deoarece sursa de alimentare este de curent continuu, analiza conducției electrice se execută pentru un regim staționar.

Distribuția densității de curent, obținută pentru cele două cazuri este prezentată în fig.5.5.

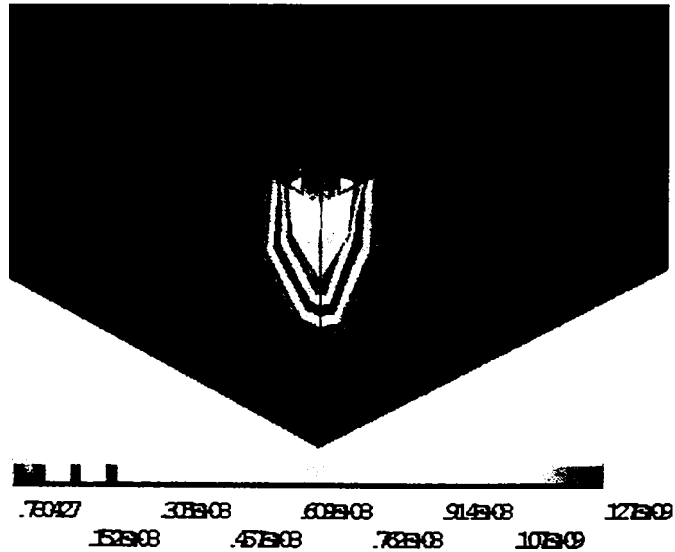


Fig.5.5. Distribuția densității de curent

În fig.5.6 s-a reprezentat variația densității de curent după o dreaptă ce trece prin axa de simetrie a arcului electric, în funcție de distanța măsurată de la suprafața inferioară, se observă că densitatea de curent are valoarea maximă, constantă, egală cu $1,25 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$, respectiv 125 A/mm^2 , în coloana arcului electric, valoare ce corespunde celei indicate în literatura de specialitate, precum și celei calculate.

Distribuția puterii calorice specifice în coloana arcului electric, precum și variația sa cu distanța, este redată în fig.5.6.

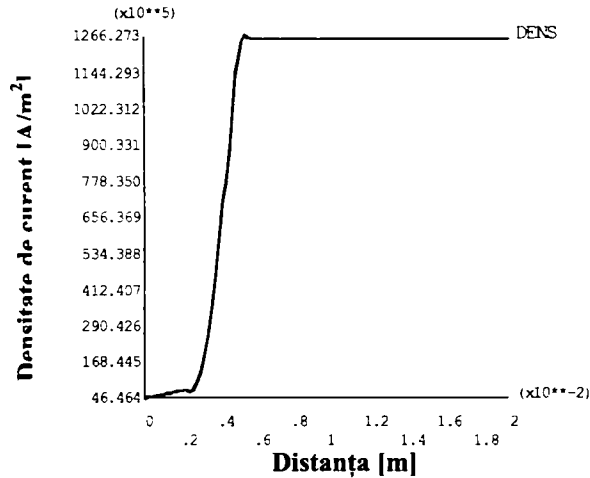


Fig.5.6

Este de remarcă că, pentru al doilea caz căderea de tensiune electrică pe coloana arcului electric are valoarea cea mai apropiată de cea impusă la proiectarea îmbinării (33V).

Toate cele de mai sus conduc la concluzia că rezultatele obținute pentru al doilea caz sunt cele mai apropiate de datele teoretice și experimentale, prezentate în literatura de specialitate.

Din acest motiv, în cele ce urmează, pentru arcul electric, se vor folosi proprietățile de material corespunzătoare temperaturii $T=25000\text{K}$, adică $\text{resv}=3,5 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{m}$; $c=7000\text{J/kg}\cdot\text{K}$; $\text{dens}=5 \cdot 10^{-2}\text{kg/m}^3$, $K=7\text{W/mK}$.

5.4 Analiza curgerii gazului de protecție

Curgerea gazului de protecție se studiază cu scopul de a determina coeficientul de schimb al căldurii prin convecție α , dintre arcul electric și stratul de bioxid de carbon din jurul acestuia.[75]

Deoarece interesează curgerea gazului de protecție de la ieșirea din duza de gaz, limita superioară a domeniului considerat este suprafața de ieșire a duzei de gaz, considerată circulară, cu raza $RD=10\text{mm}$. Aceasta este raza de intrare (inlet) a modelului folosit pentru studiul curgerii, pentru care se impune viteza de intrare V_{in} , ce s-a calculat cu relația:

$$V_{in} = \frac{Q}{S},$$

unde Q este debitul de gaz, iar S este aria suprafeței de ieșire a duzei. Înlocuind s-a obținut $V_{in}=1 \text{ m/s}$.

În mod riguros, domeniul trebuie să conțină sârma electrod, arcul electric, componentele, precum și o anumită porțiune din spațiul din jurul acestora. Însă, deoarece interesează doar schimbul de căldură prin convecție dintre arcul electric și

gazul de protecție și ținând cont de posibilitățile utilizatorului, limita superioară a domeniului s-a stabilit la extremitatea superioară a arcului electric, iar limita inferioară pe suprafața superioară a componentelor.

Din aceleași motive și având în vedere că amorsarea arcului electric se face după ce gazul de protecție a ajuns într-un regim de curgere staționară, stratul din jurul arcului electric s-a admis de formă cilindrică, cu raza RD, coaxial cu arcul electric.

În aceste ipoteze, se poate admite o simetrie coaxială, și deci se poate lucra într-un plan ce trece prin axa de simetrie a arcului electric, domeniul având forma prezentată în fig.5.10. iar limita inferioară pe suprafața superioară a componentelor.

Din aceleași motive și având în vedere că amorsarea arcului electric se face după ce gazul de protecție a ajuns într-un regim de curgere staționară, stratul din jurul arcului electric s-a admis de formă cilindrică, cu raza RD, coaxial cu arcul electric. Cu L1 este notată zona cilindrică din jurul arcului electric cu raza RD. Pentru a nu limita studiul curgerii doar la această zonă, s-a prevăzut o zonă de expansiune, de forma unui corp de revoluție ce secțiunea axială trapezoidală, notată cu A2.

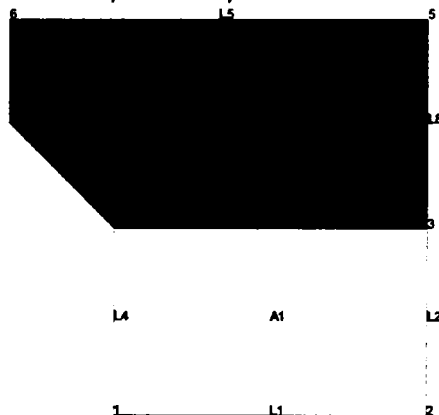


Fig.5.10

După cum s-a precizat în capitolele precedente, studiul transferului de căldură prin convecție implică un model matematic ce conține toate ecuațiile prezentate. Aceasta necesită folosirea unei analize de curgere fluidelor cuplată cu o analiză termică și deci folosirea unor elemente finite, ce au atașate un model elemental format din matricea de rigiditate și vectorul termenilor liberi, deduse, așa cum s-a arătat, pentru fiecare dintre următoarele ecuații: ecuația momentului cinetic, ecuația de continuitate și ecuația conservării energiei.

Se folosesc elemente plane, patrulatere, cu 4 noduri, rețeaua de discretizare având forma prezentată în fig.5.11.

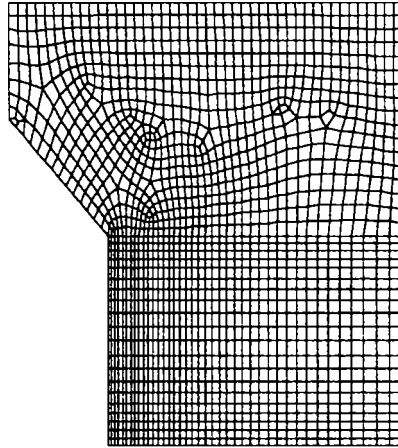


Fig.5.11

Ca sarcină se poate introduce puterea calorică specifică din zona arcului electric, determinată la analiza precedentă. Însă, pentru a putea determina pe α , trebuie să se definească temperatura pe suprafața exterioară a arcului electric, adică temperatura T_s , din relațiile prezentate. Aceasta impune ca, din domeniul considerat să se excludă zona ocupată de arcul electric și astfel suprafața exterioară a acestuia devine frontieră pentru domeniul considerat, și este reprezentată prin linia L_1 .

În ceea ce privește mediul domeniului, acesta este constituit din gazul de protecție, care inițial se admite că ocupă zona de rază RD , și aerul în restul domeniului. Însă, având în vedere că nu există diferențe prea mari între proprietățile aerului și cele ale bioxidului de carbon, s-a admis că acesta din urmă ocupă tot domeniul considerat. Fiecare dintre proprietățile acestuia s-a definit printr-un tabel cu două coloane, în prima fiind înscrise valorile temperaturii, iar în a doua valorile corespunzătoare ale proprietății respective.

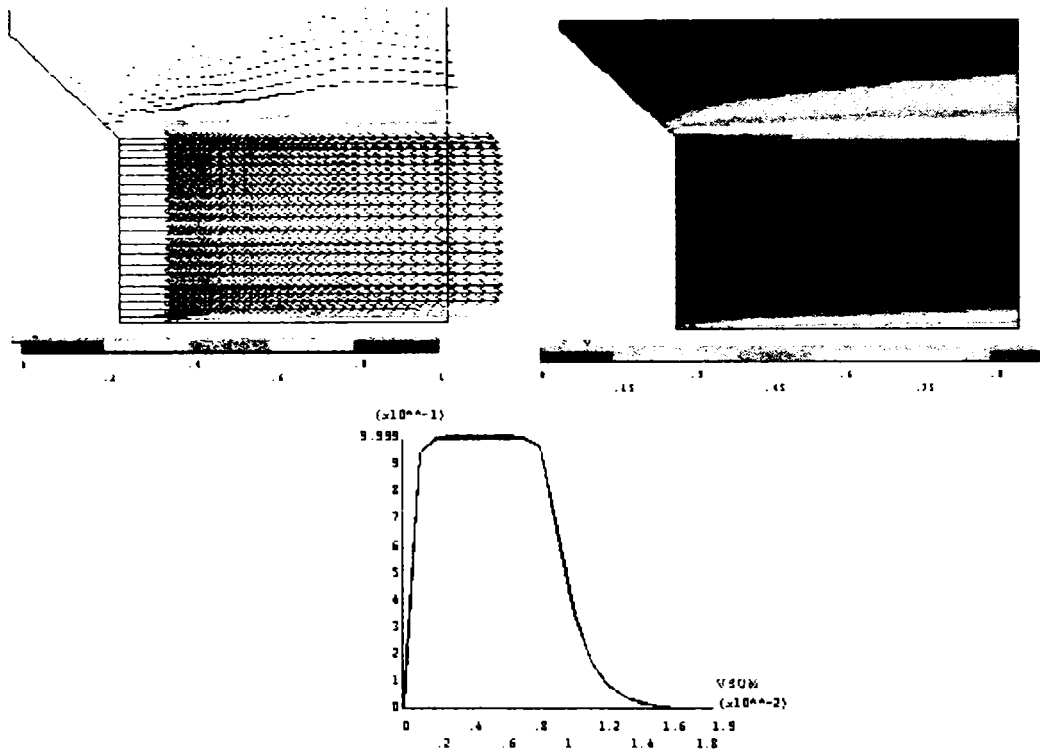


Fig.5 12

Ca și condiție de frontieră, impusă de studiul curgerii, se definește presiunea pe suprafața de ieșire (outlet) a domeniului curgerii, egală cu presiunea atmosferică.

Se poate admite că, la distanță suficient de mare de zona curgerii, aerul este liniștit. Pentru a fi îndeplinită această condiție, raza zonei de expansiune Re trebuie aleasă cât mai mare. Practic, condiția este îndeplinită dacă se alege $Re=2RD$. Această ipoteză permite ca, pe suprafața exterioară a zonei de expansiune să se definească, ca și condiție de frontieră presiunea egală cu presiunea atmosferică.

De asemenea, datorită aderenței, viteza este nulă în punctul de pe suprafața exterioară a arcului electric, care se impune ca și condiție de frontieră pe linia L_1 , ce este frontieră a domeniului curgerii.

Ca și sarcină termică se definește temperatura T_S în punctele liniei L_1 , pentru care se aleg valori egale cu temperatura din zona vizibilă a arcului electric, menționate anterior. S-au ales următoarele valori: 5.000K, 10.000K, 15.000K, 20.000K, 25.000K, 30.000K, 35.000K.

Pentru a stabili regimul curgerii, s-a ales ca stare inițială aceea când în tot domeniul considerat temperatura este egală cu cea a mediului ambiant $T_a=20^\circ\text{C}$, iar curgerea este adiabatică.

În fig.5.12 s-au reprezentat rezultatele obținute pentru: distribuția vectorilor viteze, prin săgeți, distribuția valorilor vitezei, sub formă de contururi, precum și profilul

vitezei în zona de ieșire, după o direcție radială, distanța fiind măsurată de la suprafața arcului electric.

Practic, curgerea se produce numai în domeniul de rază egală cu RD , în care viteza are valoarea egală cu V_{in} . Însă, din profilul vitezei, rezultă un regim turbulent, mai ales în zona de ieșire din duză, ceea ce era de așteptat, având în vedere valoarea criteriului Reynolds.

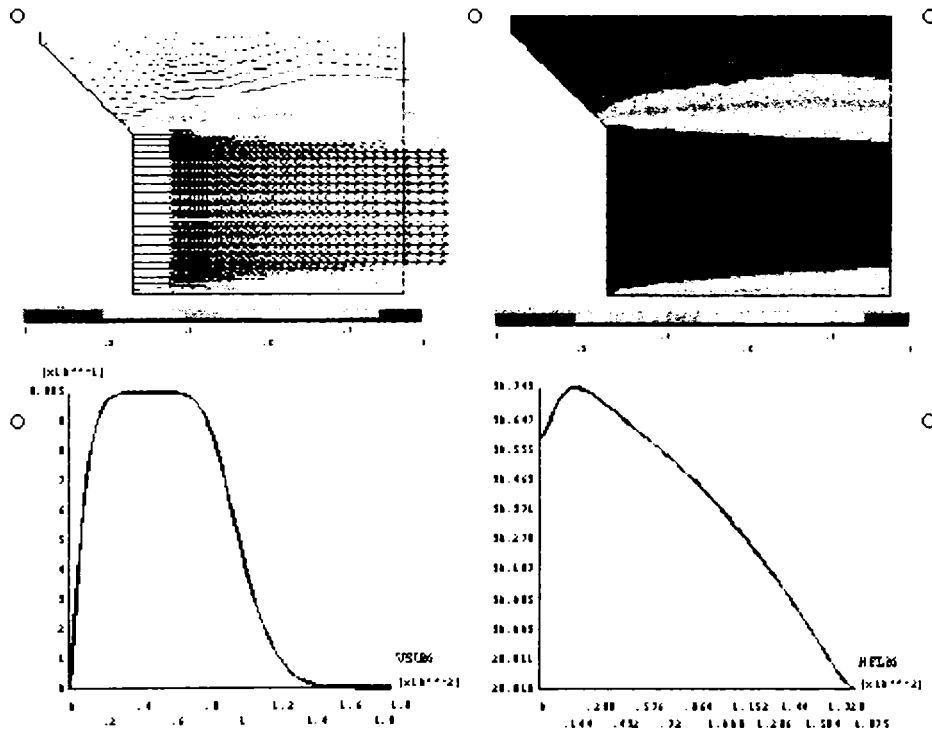


Fig.5.13

După cum s-a menționat, în cazul de mai sus curgerea s-a presupus adiabatică, adică s-a făcut ipoteza că temperatura este constantă în tot domeniul curgerii și s-a studiat doar mișcarea gazului de protecție, determinată de valoarea impusă a vitezei de intrare. S-au utilizat doar ecuațiile mișcării fluidului.

În continuare se consideră că o curgere termică, adică se are în vedere variația temperaturii în domeniul curgerii, determinată de temperatura impusă T_s , pe suprafața arcului. Pe lângă ecuațiile mișcării se folosește și ecuația conservării energiei.

Ca referință, pentru T_s s-a ales o valoare egală cu $50\text{ }^\circ\text{C}$, și, în fig.5.13, pe lângă reprezentările menționate mai sus, s-a obținut și variația coeficientului α după aceeași direcție radială. După cum era de așteptat, se obțin aceleași rezultate ca în starea inițială.

S-au realizat mai multe analize, câte una pentru fiecare valoare a lui T_s , dintre

cele menționate și s-au obținut rezultatele precizate mai sus.

Însă, pentru ca volumul lucrării să nu fie exagerat de mare, s-au ales numai acele valori ale lui T_s pentru care apar modificări semnificative ale rezultatelor.

Pentru $T_s=5.000\text{ }^\circ\text{C}$

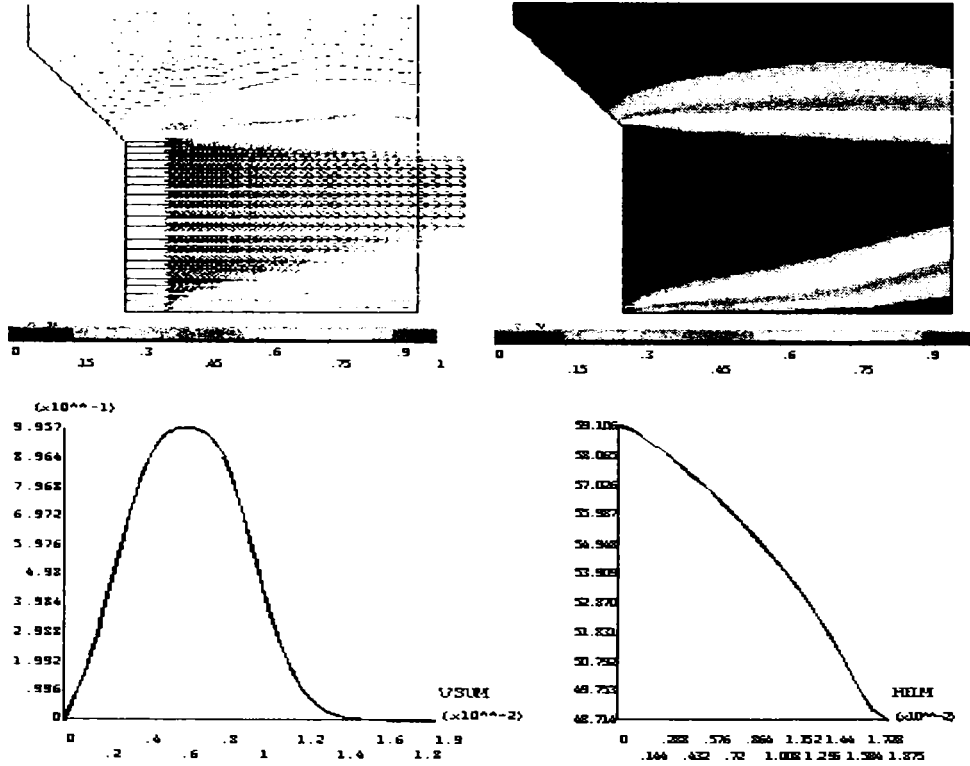


Fig.5.14

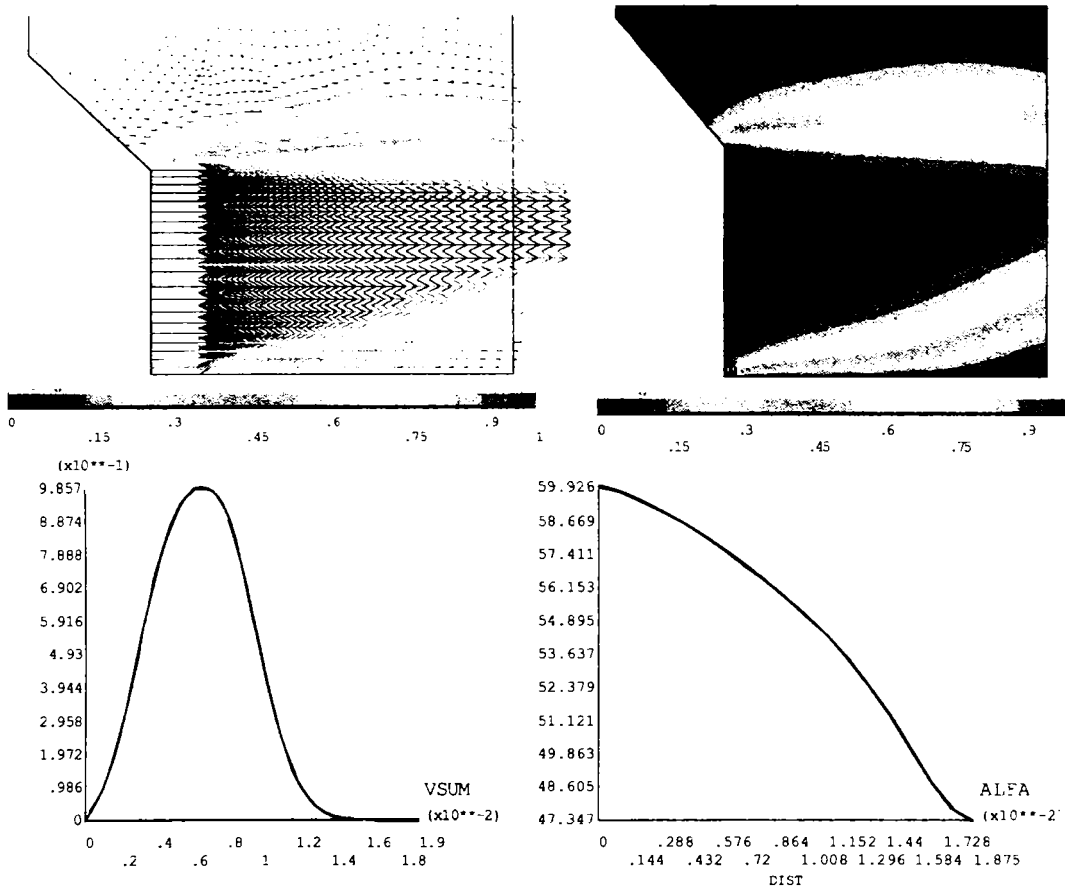
Pentru $T_s = 10.000 \text{ } ^\circ\text{C}$ 

Fig.5.15

Se observă că, la temperatura de 5.000 °C, zona de curgere uniformă, cu viteză constantă egală cu cea de intrare, se restrânge spre ieșire, crește zona de lângă suprafața arcului electric în care viteza este nulă, ceea ce conduce la o creștere a densității de flux termic transmis prin convecție, având ca efect mărirea coeficientului α . De asemenea, curgerea se extinde și în afara domeniului de rază RD ajunge până la ieșire.

Pentru $T_s=25.000\text{ }^\circ\text{C}$

Pe măsură ce crește temperatura, aceste efecte devin tot mai pronunțate, astfel încât la temperatura de $25.000\text{ }^\circ\text{C}$ zona de curgere uniformă nu mai.

De asemenea, graficul vitezei de ieșire arată că, pentru toate temperaturile,

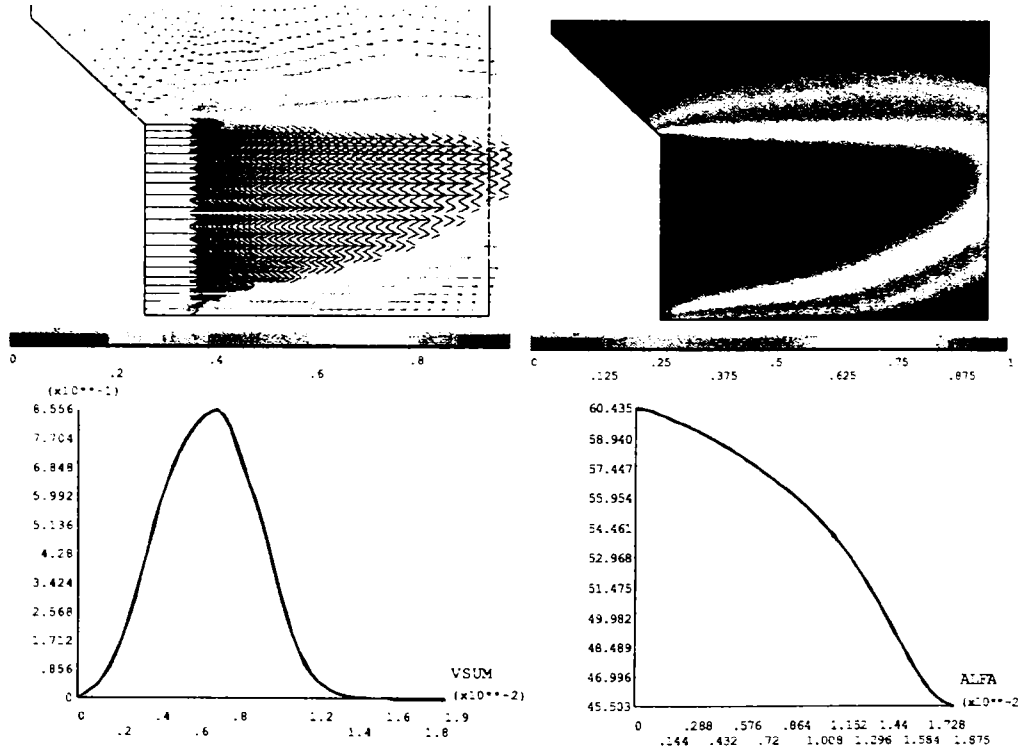


Fig.5.16

curgerea este laminară, zona de viteză maximă devenind tot mai îngustă.

În tabelul 5.10 sunt date valorile lui α în nodurile de pe suprafața exterioară a arcului electric (linia L1) pentru toate valorile lui T_s . Numerotarea nodurilor s-a făcut dinspre zona de intrare.

Tabelul 5.10

Nod T	50	5.000	10.000	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000
1	30,59	59,1	60,49	60,38	60,35	60,44	60,5	60,54
2	29,82	48,71	45,16	51,33	45,39	45,5	45,16	44,88
3	30,59	59,08	60,47	60,35	60,33	60,42	60,48	60,52
4	30,62	59,07	60,46	60,35	60,32	60,4	60,46	60,51
5	30,65	59,04	60,42	60,33	60,28	60,37	60,42	60,47
6	30,68	58,97	60,35	60,29	60,21	60,3	60,36	60,40
7	30,7	58,89	60,27	60,23	60,13	60,21	60,27	59,92
8	30,72	58,8	60,118	60,25	60,03	60,12	60,18	58,12
9	30,73	58,7	60,08	60,06	59,94	60,02	60,08	55,4
10	30,744	58,6	59,98	59,97	59,84	59,92	59,98	47,17
11	30,741	58,5	59,88	59,86	59,74	59,82	59,81	45,19

Valoarea maximă a lui α este de 60,5 W/m °C și apare la temperatura de 35.000 °K, pentru nodul 3. În literatura de specialitate se precizează că, pentru curgerea forțată a gazelor, valorile lui α sunt cuprinse între 10 W/m °C, și 300 W/m °C, iar valorile obținute se încadrează între aceste limite.

5.5 Analiza câmpului termic din componente

În general, la o analiză termică, ca sarcină (mărime de intrare) se poate folosi puterea calorică specifică, din zonele în care se produc transformări ale unor forme de energie în energie internă, sau valori impuse ale temperaturii în anumite zone ale domeniului considerat.

În prezenta lucrare se folosește prima variantă, și deci ca sarcină se utilizează puterea calorică specifică din zonele conducătoare electric, dar mai ales din coloana arcului electric. Deoarece aceasta se obține din analiza conducției electrice, prin esență orice analiză termică este o analiză cuplată.

În cadrul unei analize cuplate se studiază mai multe procese, care în principiu, pot fi din orice domeniul al fizicii. Pentru aplicațiile frecvent utilizate în practica industrială, intervin procese de natură: electrică, magnetică, termică, mecanică (structurală). Pentru fiecare proces, se definește câte o analiză, iar anumite mărimi de ieșire (rezultate) ale unei analize sunt transferate ca mărimi de intrare (sarcini) pentru o altă analiză.[71]

Se începe cu analiza conducției electrice, care se realizează pentru o temperatură egală cu temperatura mediului ambiant, iar ca sarcină se poate folosi fie intensitatea I a curentului electric printr-o secțiune a unei regiuni conductoare a domeniului, fie căderea de tensiune electrică U , pe una sau mai multe regiuni conductoare. Valorile obținute pentru densitatea J_A a curentului de aducție (de excitație) sunt transferate ca sarcină pentru analiza magnetică. În general, în cazul unui regim nestaționar, prin această analiză se determină densitatea curenților electrice induși, care se cumulează cu J_A obținând densitatea totală J_T , care este transferată ca mărime de intrare pentru analiza conducției electrice. Cu această densitate, prin analiza conducției electrice, se determină puterea calorică specifică PS , care este transferată ca sarcină pentru analiza termică, ce începe cu o temperatură inițială T_I .

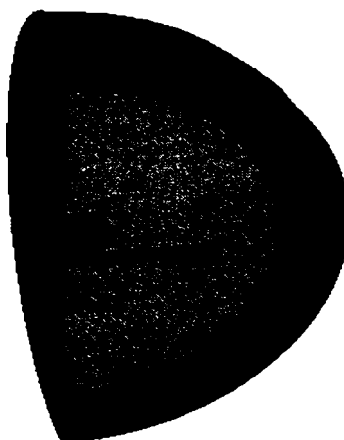


Fig.5.18 Sistemul model

Temperatura T în punctele domeniului, obținută în urma analizei termice, este transferată ca mărime de intrare pentru analiza conducției electrice și pentru analiza

magnetică. Proprietățile de material sunt reactualizate pentru noua valoare a temperaturii, și în continuare lucrurile se repetă. Dacă se realizează și o analiză structurală, atunci ca mărime de intrare sunt transferate: temperatura T , obținută din analiza termică și forțele magnetice F , obținute din analiza magnetică. Prin analiza structurală, se determină deformațiile D ale domeniului, care sunt transferate pentru celelalte analize.

Modelul geometric al noului sistem folosit este prezentat în fig.5.18.

Se observă că, pe lângă modelul geometric folosit în analiza conductiei electrice, intervin încă două regiuni, prin care se modelează aerul din jurul elementelor respective, precum și spațiul infinit. Acestea se aleg de formă sferică, cu razele R_S , respectiv R_I . Acuratețea rezultatelor este cu atât mai bună cu cât razele R_S , R_I au valori mai mari, însă aceasta duce la creșterea domeniului studiat, precum și la dificultăți în realizarea rețelei de discretizare. Din acest motiv, și având în vedere că în jurul elementelor nu intervin piese din material feromagnetic, s-a ales R_S egal cu lungimea considerată a componentelor, iar $R_I = 2R_S$.

Rețeaua de discretizare s-a realizat cu elemente de același tip cu cele folosite la analiza electrică cu restricția că, în stratul infinit, pe direcția radială, să existe un singur strat de elemente, ca în fig.5.19.

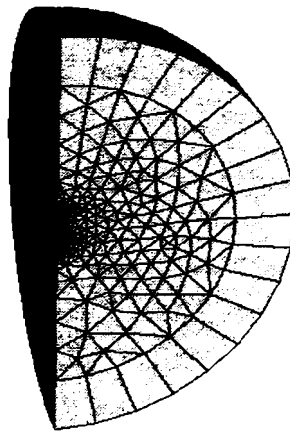


Fig.5.19. Discretizarea rețelei

O chestiune deosebită o constituie faptul că arcul electric este o sursă de energie termică, mobilă, care se deplasează în lungul rostului cu viteza de sudare V_s .

Se va numi zonă oarecare în lungul îmbinării o poziție oarecare a arcului electric deci o suprafață circulară de rază R_A , situată pe suprafața superioară a componentelor și dispusă simetric față de axa longitudinală a îmbinării. O astfel de zonă poate fi considerată ca un singur tot, deoarece, practic, în orice moment, temperatura are aceeași valoare, în toate punctele zonei, egală cu temperatura de la baza arcului electric.

S-a ales zona situată la mijlocul lungimii componentelor. Deoarece, la viteza de sudare folosită, arcul electric parcurge într-o secundă în jur de 8 mm, s-a admis că influența arcului electric se face simțită începând dintr-o poziție situată la această distanță de dinainte de a ajunge în zona considerată, și până într-o poziție simetrică, de după ce arcul electric a trecut de zona respectivă. Din acest motiv s-a ales $\Delta t=0,5$ s.

S-au realizat mai multe analize cuplate, electro-termice, atât secvențiale cât și directe (simultane).

Pentru fiecare analiză s-a determinat câmpul termic din componente sub formă de contururi. S-a reprezentat numai câmpul termic pentru temperaturi mai mari decât o limită inferioară, impusă de 1300 °C, care este apropiată de temperatura de topire a componentelor. În felul acesta, linia corespunzătoare temperaturii de 1300 °C delimitează zona în care metalul este în stare topită, iar pe direcția normală pe componente reprezintă chiar adâncimea de pătrundere.

De asemenea, pentru a stabili dacă după timpul $\Delta t=0,5$ s se atinge adâncimea de pătrundere estimată, durata fiecărei analize s-a ales dublă, deci de o secundă.

S-a început cu o analiză cuplată secvențială, în care s-a neglijat inerția termică a arcului electric.

În fig.5.20 se reprezintă câmpul termic din componente, obținut după 0,5 s.

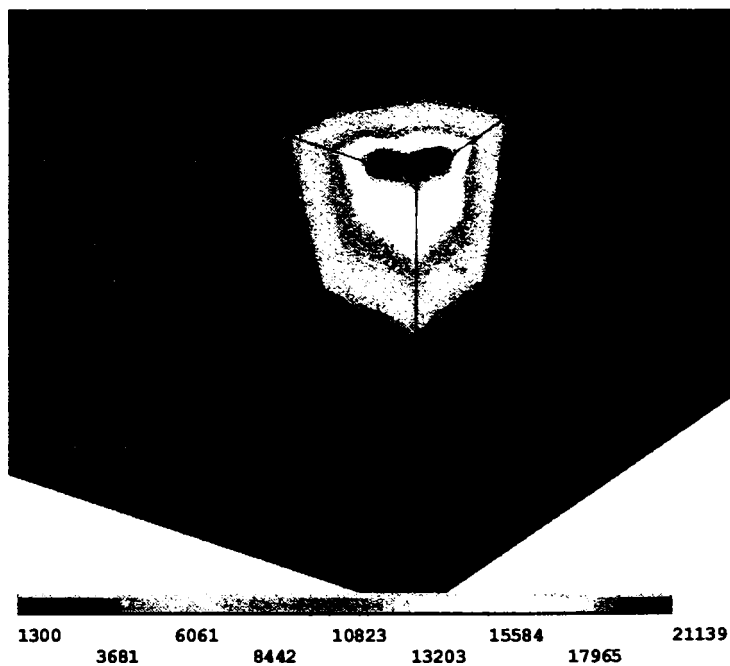


Fig.5.20

În fig.5.21 se reprezintă același câmp termic, obținut după 1s.

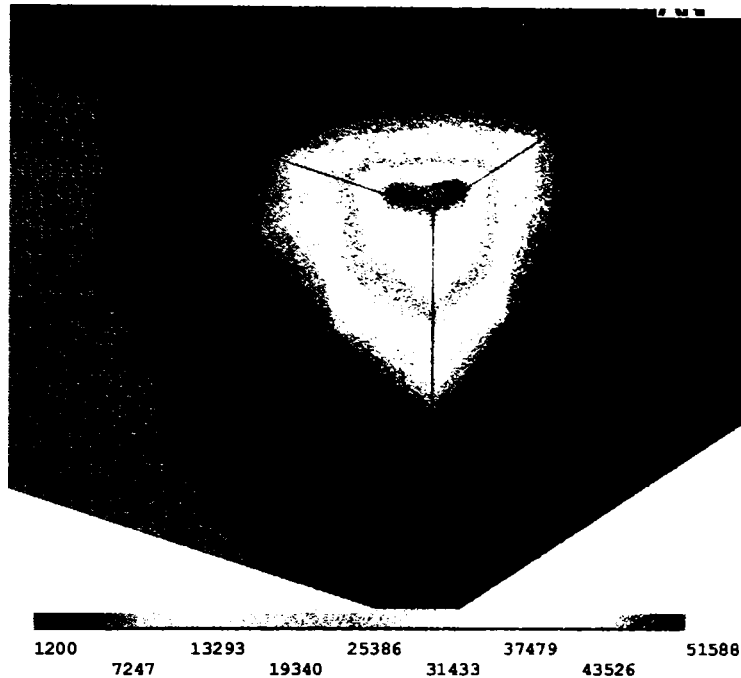


Fig.5.21

Din examinarea celor două figuri de mai sus, rezultă că după o secundă, adâncimea de pătrundere se extinde pe toată înălțimea componentelor, iar după 0,5 s aceasta se reduce la jumătate.

Deoarece îmbinarea se realizează în două treceri, înseamnă că, aproximativ, la o trecere adâncimea de pătrundere este egală cu jumătate din înălțimea componentelor, ceea ce se produce chiar după timpul $\Delta t=0,5$ s ales la început.

De asemenea, după timpul $\Delta t=0,5$ s, în zona arcului electric se atinge temperatura de aproximativ 21.000 K, care este mai apropiată de valoarea indicată în literatura de specialitate, față de valoarea de 52.000 K la care se ajunge după un timp dublu.

În continuare s-a executat aceeași analiză, însă luând în considerare și inerția termică a arcului electric. Deoarece constanta de timp termică a arcului electric este mult mai redusă decât a materialului componentelor, deosebirile sunt neesențiale și nu s-au mai reprezentat câmpurile termice obținute.

În fig.5.22.a s-a reprezentat variația temperaturii după înălțimea componentelor, în funcție de distanța măsurată de la suprafața superioară a acestora, după timpul $\Delta t=0,5$ s.

Pentru ca desenul să fie mai clar, s-a reprezentat variația temperaturii numai pe jumătate din înălțime, și deci punctul aflat la distanța de 5 cm este chiar cel care corespunde adâncimii de pătrundere stabilită anterior pentru $\Delta t=0,5$ s. se observă că, într-adevăr, după 0,5 s, în acest punct se atinge temperatura de topire.

În fig.5.22.b este reprezentată variația în timp a temperaturii din același punct, din care se remarcă că temperatura ajunge la cea de topire după un timp de aproximativ 0,5s. În scopul de a verifica rezultatele obținute până în acest moment, s-a realizat o analiză cuplată, electro-termică, directă.

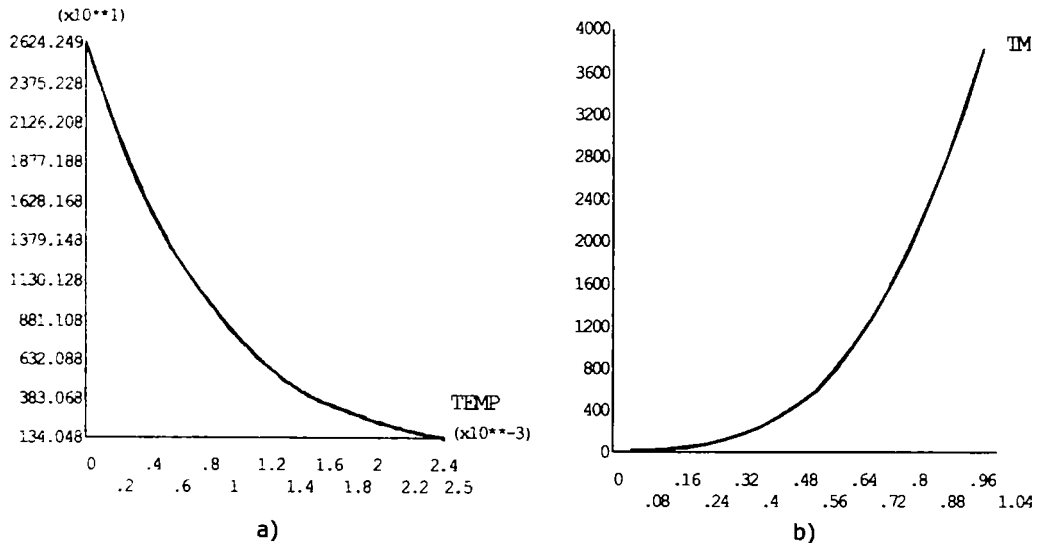


Fig.5.22

Ca sarcini se definesc: intensitatea curentului electric prin suprafața superioară a sârmei electrod, egală cu 98,75 A, temperatura inițială T_I , egală cu temperatura mediului ambiant $T_A=20$ °C și potențialul electric egal cu zero pe suprafața inferioară a componentelor.

Datorită simulării spațiului infinit, nu este necesar să se impună nici o condiție de frontieră. După rularea analizei s-au reprezentat distribuțiile densității de curent, puterii calorice și căderii de tensiune pe arcul electric.

S-a constatat că acestea sunt foarte apropiate de cele obținute în urma analizei conducției electrice, însă, pentru a nu mări volumul lucrării nu se mai prezintă.

În fig. 5.23 se prezintă câmpul termic din componente.

Se observă că se obțin aceleași rezultate ca la analizele precedente, cu remarcă că temperatura maximă din zona arcului electric ajunge numai la aproximativ 19.000 K, o valoare ce este mult mai apropiată de cea precizată în literatura de specialitate.

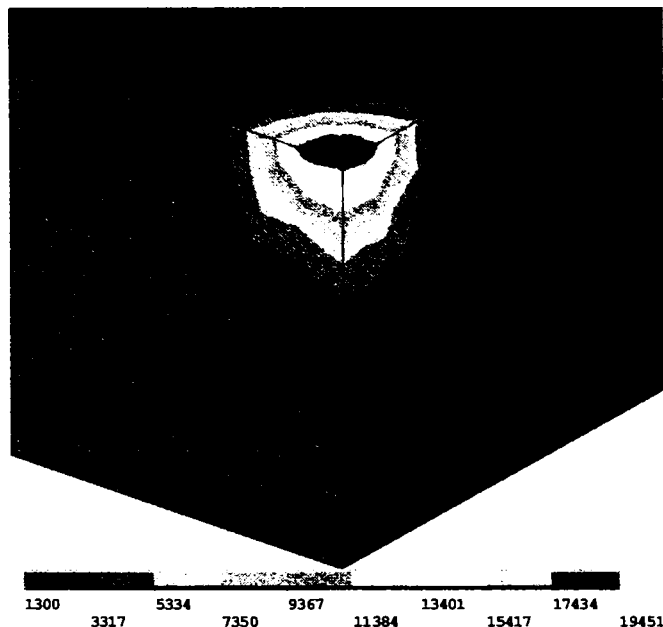


Fig.5.23

În fig.5.24, prin săgeți, s-a reprezentat vectorul densitate de flux termic, pentru întregul sistem și numai pentru componente.

În final s-a determinat câmpul termic pentru întreg ciclul de încălzire și răcire.

S-a folosit o analiză cuplată, directă, electro-termică, care s-a executat în trei faze (pași) de încărcare consecutive.

Prima fază de încărcare este similară analizei de încălzire precedente, și s-a ales un pas de timp de 0,05 s, ceea ce permite obținerea rezultatelor în 10 momente de timp distincte.

Pentru a doua fază de încărcare ca sarcină s-a introdus valoarea zero pentru puterea calorică specifică și durata este tot $\Delta t=0,5$ s. De asemenea, s-a impus ca puterea calorică specifică să scadă liniar în timp, de la valoarea maximă atinsă la finele fazei precedente, la valoarea zero, ce s-a impus ca sarcină. S-au folosit tot 10 pași de timp. Prin această fază se realizează subfaza de răcire cu durata Δt_{r1} .

În ultima fază de încărcare, puterea calorică specifică se menține la valoarea zero și astfel se obține subfaza de răcire cu durată Δt_{r2} , care s-a ales de 3 minute.

Ceea ce prezintă interes este variația în timp a temperaturii din punctele componentelor. Variația în timp a temperaturii din acest punct pentru întregul ciclu este prezentată în fig.5.25.a.

Pentru claritate, în fig.5.25.b este reprezentată variația în timp a temperaturii numai pentru primele două faze. Datorită inerției termice a componentelor, descreșterea temperaturii nu va începe chiar în momentul inițial al primei subfaze de răcire, ci cu o anumită întârziere.

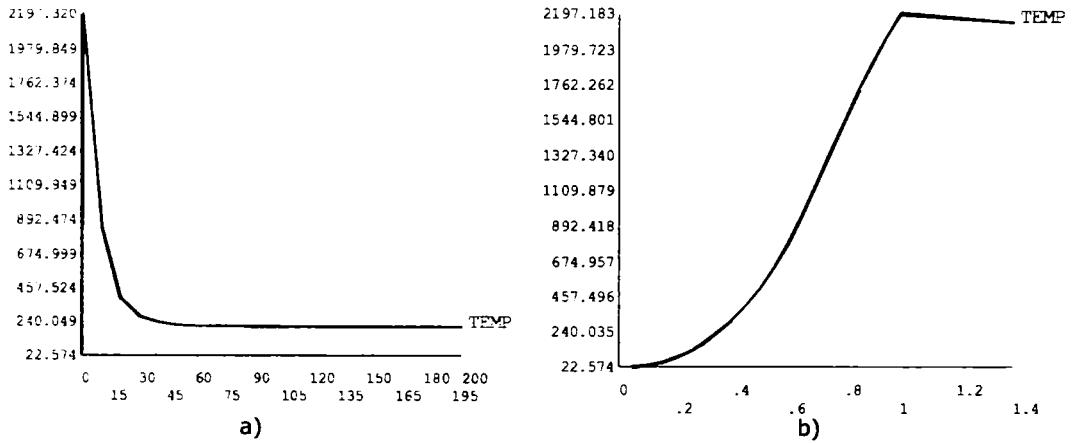
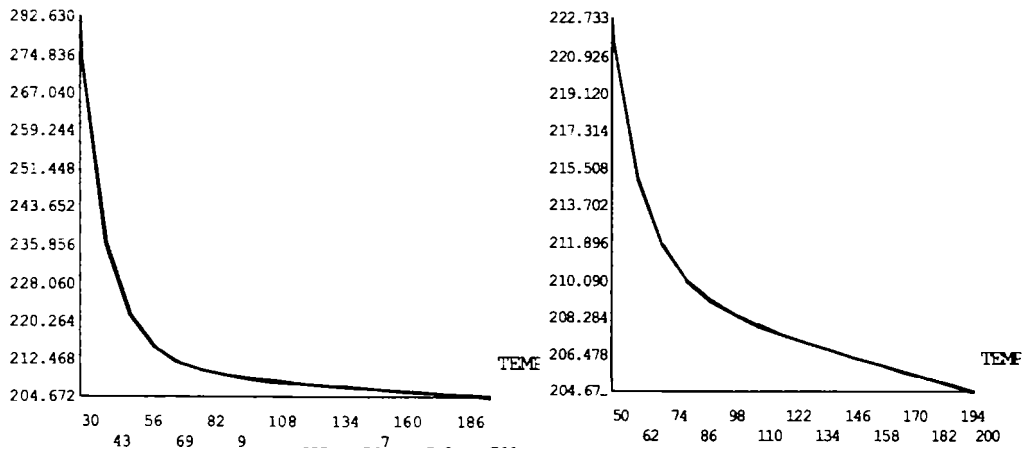


Fig.5.25

Tot în scopul clarității, în fig.5.26 se prezintă variația temperaturii pentru diferite subintervale din cursul ultimei subfaze de răcire.

Rezultă că la sfârșitul ciclului considerat temperatura scade la 200 °C.



Fia.5.26

5.6 Analiza magnetică

În principal, prin analiza magnetică s-a urmărit obținerea forțelor magnetice ce acționează asupra sârmei electrod.

S-a folosit același model geometric ca în cazul analizei termice și elemente finite, cu aceeași formă geometrică, însă ce au ca și necunoscute principale valorile componentelor A_x , A_y , A_z , ale potențialului magnetic vector.

În fig.5.27 se prezintă prin săgeți, vectorii forțe magnetice ce acționează asupra sârmei electrod.

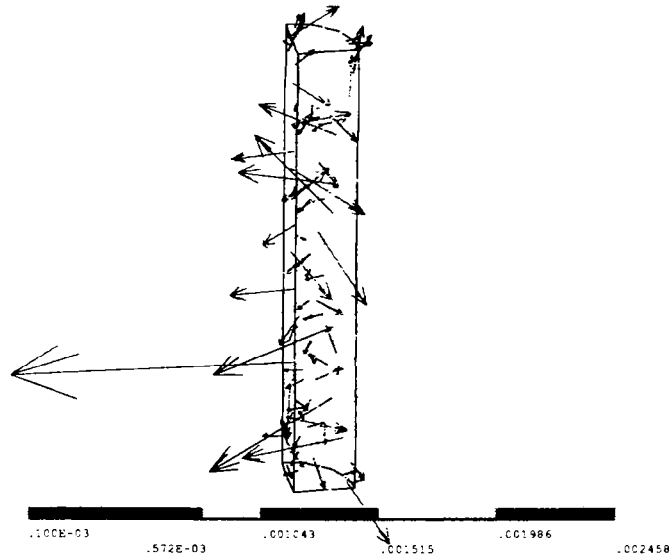


Fig.5.27

Se observă că și componentele axiale sunt orientate în sensul forței de greutate, iar componentele radiale au sensul spre axa de simetrie a arcului electric.

6 MODELAREA ȘI SIMULAREA CÂMPULUI TERMIC CU SURSĂ DE SUDARE MOBILĂ LA SUDAREA ÎN MEDIU DE CO₂

6.1 Modelarea sursei termice

Scopul acestui capitol este determinarea în timp și spațiu a câmpului termic din componente pe parcursul sudării cât și după aceasta, ținând cont că sursa de căldură (arcul electric) se deplasează. Din acest motiv arcul electric nu este luat în considerare, ci este înlocuit cu efectul său, adică prin căldura dezvoltată în componente. Ca mărime de intrare se folosește căldura dezvoltată în unitatea de timp și volum și care s-a denumit putere calorică specifică (notată „p”).

Aceasta are în fiecare moment distribuția într-un volum din componente situat de jur-împrejurul poziției din acel moment al arcului electric, și se deplasează în lungul cusăturii sudate pe parcursul sudării.

Ca urmare, trebuie cunoscută variația în timp și în spațiu, a puterii calorice:

$$p = p(x, y, z, t) \quad (6.1)$$

Unde: x, y, z = coordonatele punctelor în care se află arcul electric la momentul t . Problema care se pune este de a determina această funcție a puterii calorice specifice, ținând cont de forma și dimensiunile băii de sudură.

În literatura de specialitate se cunosc mai multe variante.

Studiul teoretic al formei băii de sudură a fost abordat de numeroși cercetători dintre care se menționează, cercetătorii ruși Rîkalin și Prohorov ce au elaborat ecuații ale suprafeței izoterme corespunzând temperaturii de topire, suprafață ce definește de fapt forma băii de sudură. Problema este foarte complexă, deoarece fiecare procedeu de sudare, reclamă un studiu aparte, profilul în secțiune longitudinală și transversală a băii de sudură fiind determinat de o serie de factori legați de caracteristicile procedurii, metalului de bază și de adaos, natura electrodului, modul de deplasare a sursei, etc.

Din punct de vedere metalurgic prezintă interes suprafața specifică de contact a metalului cu gazul, adică raportul suprafeței de contact a metalului cu gazul către volumul metalului lichid. Suprafața specifică a picăturilor din electrod se poate exprima cu aproximație prin raportul:

$$S_p = \frac{S}{V} = \frac{3}{r} \quad (6.2)$$

în care: S = suprafața în cm²; V = volumul în cm³; și r = raza în cm.

Ținând seama de experiențele făcute la sudarea în argon se apreciază că la sudarea în CO₂ raza medie a picăturilor este 0,5...2 mm. Suprafața specifică a băii sudurii se poate

exprima cu aproximație considerând suprafața ei elipsă iar volumul o jumătate elipsoid, figura 6.1 cu relația:

$$S_b = \frac{S}{V} = \frac{a \cdot b \cdot \pi}{0,5 \cdot k \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot c} = \frac{2}{k \cdot c} = \frac{2}{K \cdot H \cdot L} \quad (6.3)$$

unde: a, b, c = axele elipsoidului; k = coeficientul de umplere a băii sudurii; k = 0,9; H = adâncimea băii sudurii, iar L este lungimea băii sudurii.

Mărimea raportului $\frac{S_p}{S_b}$ pentru diferite dimensiuni ale picăturii și băii sudurii se dau

in tabelul 6.1.

Tabelul 6.1

Caracteristici geometrice ale picăturii

H (mm)	3	6	10
B (mm)	2,0 1,5 1,0 0,5 0,1	2,01,5 1,0 0,5 0,1	2,0 1,5 1,0 0,5 0,1
S_p/S_b	2,0 2,7 4,0 8,1 405	405 54 8,1 162 810	675 9,0 135 270 135,0

Datele din tabelul 6.1 arată ca raportul $\frac{S_p}{S_b}$ poate varia în limite foarte largi

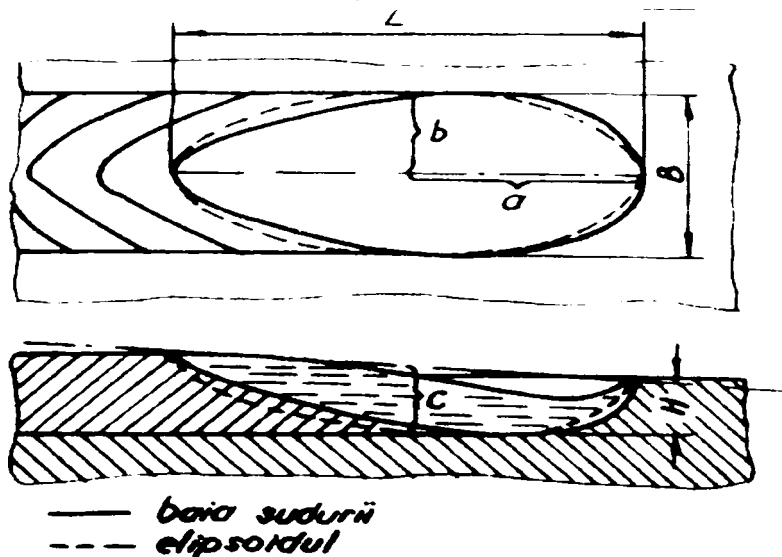


Fig.6.1. – Forma băii sudurii:

— — — reală; - - - - - elipsoidă, aproximată

Însă, mulți autori utilizează ca model tridimensional, un dublu elipsoid propus de cercetătorul englez Goldak, al cărui model este prezentat în fig 6.2

Modelarea sursei de căldură capătă deci formă elipsoidală dublă, permițând astfel absorbția de căldură în zona influențată termic. Sursa de căldură este compusă din două

regiuni eliptice numite elipsoid dublu, în care au loc treceri din faza solidă în faza lichidă.

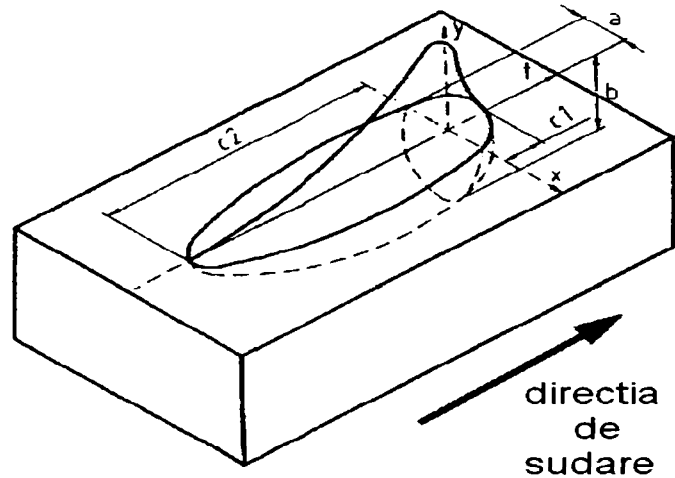


Fig.6.2 Modelul dublului elipsoid

Se observă că, pentru axa din lungul cusăturii sudate, în planul Oyz, puterea calorică are o distribuție de tip Gaussian:

$$p(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f \cdot Q}{abc\pi^{3/2}} \cdot e^{-3\left(\frac{x}{a}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{z}{c}\right)^2} \quad (6.4)$$

Pe suprafața componentelor distribuția este sub forma unui elipsoid, care după axa Ox are semiaxa „a” iar după axa Oz are semiaxa c_f , pentru porțiunea din fața arcului de sudare, și c_r , pentru porțiunea din spatele arcului.

În planul normal pe cusătură, deci pe grosimea piesei (planul Oxy), după axa Ox elipsoidul are semiaxa a, iar pe Oy are semiaxa b.

De asemenea, se consideră că, în spatele sursei valoarea maximă a lui p, este p_{mr} , iar în fața sursei, valoarea maximă este p_{mf} . Totodată se admite că în spatele sursei se dezvoltă o cantitate de căldură mai mare ca în față.

Pentru punctele din fața sursei, pentru $z > 0$,

$$p = p_{mf} \cdot e^{-3\left(\frac{x}{a}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{z}{c_f}\right)^2} \quad (6.5)$$

unde:

$$p_{mf} = \frac{6\sqrt{3}P_{ff}}{a \cdot b \cdot c_f \cdot \pi \sqrt{\pi}} \quad (6.6)$$

Pentru punctele din spatele sursei, pentru $z \leq 0$

$$p = p_{mr} \cdot e^{-3\left(\frac{x}{a}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{z}{c_r}\right)^2} \quad (6.7)$$

unde:

$$p_{mf} = \frac{6\sqrt{3}P_{fr}}{a \cdot b \cdot c_r \cdot \pi \sqrt{\pi}} \quad (6.8)$$

ecuații în care P_f este acea parte din puterea dezvoltată în arcul electric care contribuie direct la formarea băii de metal topit.

Dacă notăm P_d =puterea dezvoltată în arcul electric, atunci energia totală:

$$E = P_d \cdot \eta$$

Întrucât doar o parte din P_d ajunge la componente, restul se pierde, eficiența (randamentul) $\eta < 1$, corespunzător pierderilor prin convecție, radiație, stropi, vaporizări, etc.

Dacă notăm U_a și I_s , tensiunea arcului și respectiv, curentul de sudare:

$$P_d = U_a \cdot I_s$$

Și înlocuind în expresia energiei totale, aceasta devine:

$$E = U_a \cdot I_s \cdot \eta$$

Deasemenea, f_f , f_r reprezintă fracțiunile din P_f care se dezvoltă în fața, respective în spatele arcului electric. Totodată pentru ca cele două expresii să se racordeze, pentru $z=0$, trebuie îndeplinite condițiile:

$$f_f + f_r = 2 \quad (6.9)$$

$$\text{sau: } f_f = \frac{2 \cdot c_r}{c_f + c_r} \quad (6.10)$$

$$\text{sau: } f_r = \frac{2 c_f}{c_f + c_r} \quad (6.11)$$

Deoarece, $c_r > c_f$ rezultă că și $f_r > f_f$, adică se presupune că în spatele arcului electric se dezvoltă o cantitate de căldură mai mare ca în fața arcului electric.

Însă, în general axele pot fi alese arbitrar, și deci expresiile se scriu în funcție de modul cum se aleg acestea.

Ca urmare:

- axa Oz se înlocuiește cu notația aleasă în lungul cusăturii.
- axa Ox se înlocuiește cu notația aleasă pe suprafața componentelor normală pe cusătură.
- axa Oy se înlocuiește cu notația aleasă pe grosimea componentelor.

În cazul considerat am ales:

- x , în lungul cusăturii,
- z , pe suprafața componentelor, și deci forma finală este:

$$p = p_{mf} \cdot e^{-3\left(\frac{x}{a_r}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{z}{c}\right)^2} \quad (6.12)$$

$$p = p_{mr} \cdot e^{-3\left(\frac{x}{af}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{z}{c}\right)^2} \quad (6.13)$$

iar părțile fracționare:

$$P_{mf} = \frac{6\sqrt{3} \cdot P_{ff}}{a_r \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{\pi}}, \text{ și} \quad (6.14)$$

$$P_{mr} = \frac{6\sqrt{3} \cdot P_{fr}}{a_f \cdot b \cdot c \cdot \pi \sqrt{\pi}} \quad (6.15)$$

Deplasarea arcului electric ca sursă mobilă, se raportează la mișcarea unui punct P față de un sistem de referință mobil $Ox_1y_1z_1$ în raport cu un sistem de referință fix $Oxyz$.

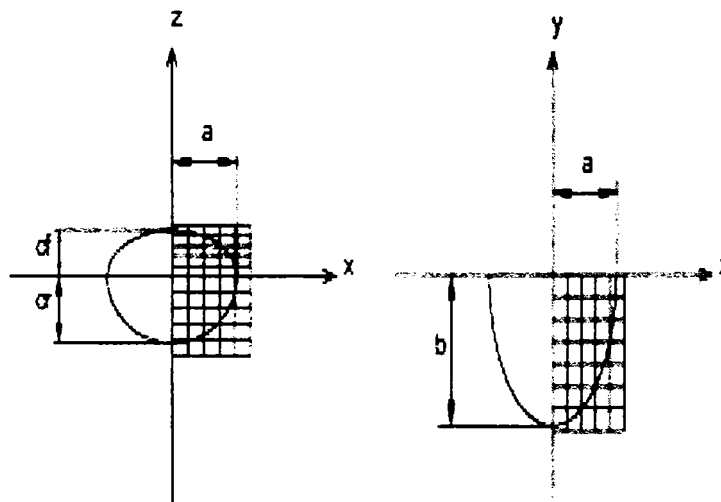


Fig. 6.3 Discretizarea rețelei sursei termice

S-a considerat că arcul electric se deplasează în lungul axei Ox cu viteza de sudare v_s . Pentru a lua în considerare deplasarea arcului electric se folosește un sistem de referință mobil care este translatat în lungul axei Ox cu viteza de sudare v_s . Față de un astfel de sistem orice punct care, față de un sistem de referință fix va avea coordonata x , față de sistemul de referință mobil, va avea coordonata x_s , dată de relația:

$$x_s = x_0 + x - v_s \cdot t \quad (6.16)$$

unde x_0 este poziția inițială a sursei la $t_0 = 0$

Am considerat că la momentul $t_0 = 0$, originea O , se află în punctul de început al sudării și deci $x_0 = 0$ și $x_s = x - v_s \cdot t$ (6.17)

Prin înlocuirea lui x , cu x_s , vor rezulta relațiile:

-pentru porțiunea din fața sursei:

$$p = p_{mf} \cdot e^{-3\left(\frac{x-v_s \cdot t}{a_r}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{z}{c}\right)^2} \quad (6.18)$$

iar pentru porțiunea din spatele sursei:

$$p = p_{mr} \cdot e^{-3\left(\frac{x-v_s \cdot t}{a_r}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{y}{b}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{z}{c}\right)^2} \quad (6.19)$$

pentru fiecare moment de timp t_k coordonata în lungul cusăturii, față de sistemul de referință mobil este:

$$x_{sk} = x - v_s \cdot t_k \quad (6.20)$$

$$\text{pentru } x = 0 \Rightarrow x = v_s \cdot t_k \quad (6.21)$$

Este evident faptul că se află în partea din spate a elipsoidului punctele pentru care $t \leq t_k$ rezultând astfel: $x - v_s \cdot t_k \leq 0$ și deci $x_{sk} \leq 0$.

De asemenea, se află în partea din fața a elipsoidului punctele pentru care $t > v_s \cdot t_k$ deci, $x - v_s \cdot t_k > 0$ și $x_{sk} > 0$.

La programul Ansys, pentru implementarea expresiei lui p se folosește un editor de funcții. În general acesta permite ca pentru orice funcție, să se poată introduce diverse expresii în funcție de intervalul de valori ale unei variabile, numite variabilă de control, notată x_c .

Din cele prezentate anterior, în cazul de față, variabila de control aleasă este x_s . Deoarece această variabilă ia valori și pentru intervale mai mici ca 0, iar programul nu permite decât valori pozitive, am ales variabila de control de forma:

$$x_c = l + x - v_s \cdot t \quad (6.22)$$

Unde : l este lungimea cusăturii sudate

Se poate verifica că toate punctele din spatele sursei se obțin pentru $x_c \leq l$ și toate punctele din fața sursei, se obțin pentru $x_c > l$. De reținut este și faptul că valoarea maximă a fiecărei exponențiale din expresia lui p , se obține când variabila respectivă este nulă. Deci pentru axa Ox , valoarea maximă se obține când $x_s = 0$. Coordonata de control devine $x_c = l + x$, deci pentru orice punct din lungul cusăturii pentru care $x > 0$ și $x_c > l$, punctul se află înaintea sursei.

Timpul de sudare t_s are valoarea $t_s = \frac{l}{v_s}$, unde l este lungimea cusăturii.

O problemă deosebită o constituie stabilirea valorilor parametrilor semiaxelor elipsoidului, a, b, c de care depind și valorile maxime p_{mf} și p_{mr} . În literatura de specialitate se precizează ca, aceste valori să se aleagă astfel încât în urma simulării, pentru fiecare poziție a arcului electric să rezulte dimensiunea băii de metal topit, identice cu cele obținute experimental.

Însă acești parametri depind de foarte mulți factori, menționați anterior. Din acest motiv, prin mai multe încercări am stabilit pentru parametrii elipsoidului dublu următoarele valori, regăsite în tabelul 6.2

Tabelul 6.2 Valorile parametrilor ecuațiilor matematice.

Parametrii	a_f	a_r	b	c	f_r	f_f
Valoarea [m]	0,02	0,04	0,01	0,02	1,25	0,75

Pe baza valorilor stabilite , am trecut la simularea arcului electric ca și sursă de sudare mobilă.

6.2 Stabilirea modelului geometric

S-a considerat sudarea cap la cap a două plăci din oțel X60, fiecare având dimensiunile 120x60x20mm. S-au stabilit de asemenea parametrii regimului de sudare:

- curentul de sudare, $I_s = 310A$
- tensiunea arcului, $U_a = 29V$
- viteza de sudare, $v_s = 6mm / s = 36cm/min$

Din motive de simetrie, pentru a micșora volumul de calcul, s-a considerat o singură componentă, prezentată în figura 6.4

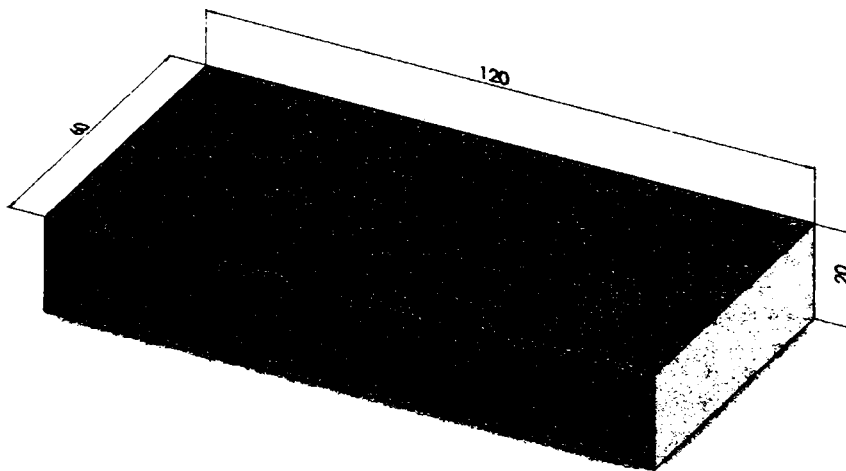


Figura 6.4 Modelul geometric

În general la simularea oricărui proces termic trebuie avut în vedere fluxul termic de căldură schimbat cu exteriorul. Programul permite ca acesta să fie introdus sub două variante:

- prin densitatea de flux termic

- prin coeficientul de schimb de căldură prin convecție

În majoritatea lucrărilor de specialitate,[32] se utilizează a doua variantă, însă, valoarea coeficientului de schimb de căldură prin convecție depinde de foarte mulți factori, iar folosirea lor ar putea conduce la erori. Din acest motiv, am utilizat capacitatea programului Ansys de a modela descreșterea temperaturii la o valoare egală cu temperatura mediului în punctul Infinit.

Pentru aceasta pe lângă componente, am mai introdus două zone semisferice, prezentate în figura 6.5

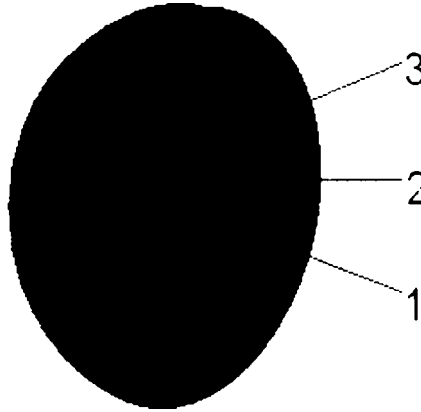


Fig. 6.5 Zonele modelului

Zonele astfel create, sunt:

- 1 - componenta (materialul de bază)
- 2 - spațiul aer
- 3 - spațiul infinit

Precizia rezultatelor este cu atât mai bună, cu cât razele celor două spații create sunt mai mari, dar, în acest mod crește și volumul de lucru. Din această cauză, pentru spațiul aer (2), am ales raza $R_2 = 10\text{cm} = 0,1\text{m}$ iar pentru raza $R_3 = 20\text{cm} = 0,2\text{m}$.

6.2.1 Stabilirea proprietăților de material

- pentru oțel
 - Densitatea, $\rho = 7820 \text{ kg/ m}^3$
 - Căldura specifică, $c = 465 \text{ J/ Kg}\cdot^\circ\text{C}$
 - Conductivitatea termică, $\lambda = 50,5 \text{ W/ m}\cdot^\circ\text{C}$
- pentru aer
 - Densitatea, $\rho = 1,185 \text{ kg/ m}^3$
 - Căldura specifică, $c = 1004,4 \text{ J/ Kg}\cdot^\circ\text{C}$
 - Conductivitatea termică, $\lambda = 0,0261 \text{ W/ m}\cdot^\circ\text{C}$
 - pentru mișcarea dinamică $\nu = 1,831 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ m}\cdot\text{s}$

6.3 Stabilirea modelului cu elemente finite

Am ales două categorii de elemente finite :

- pentru componente și spațiu aer am ales elemente de tip Solid 90, de forma paralelipipedică, cu 20 noduri, care poate degenera în tetraedru, piramidă sau patrulater.
- Pentru spațiul infinit, am ales elemente de tip Infin 111, de formă paralelipipedică, care poate degenera în prismă.

S-au utilizat astfel de elemente finite pentru a modela zonele curbe ale modelului geometric, și pentru a obține o precizie cât mai bună, dar care introduce un timp de lucru ridicat.

Pentru a obține o precizie cât mai bună se impune ca în lungul cusăturii sudate să existe un număr cât mai mare de noduri, deoarece coordonatele x , y , z din expresia lui p , sunt cele ale nodului în care se află sursa la momentul respectiv. Din acest motiv, în lungul cusăturii am ales distanța între noduri de 2mm, în acest fel rezultând un număr de 60 elemente finite.

Rețeaua de discretizare este prezentată în fig. 6.6, pentru componentă, iar pentru întreg modelul, în figura 6.7

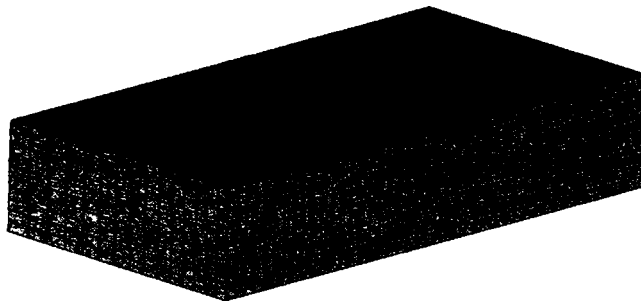


Fig.6.6 Rețeaua de discretizare a componentei

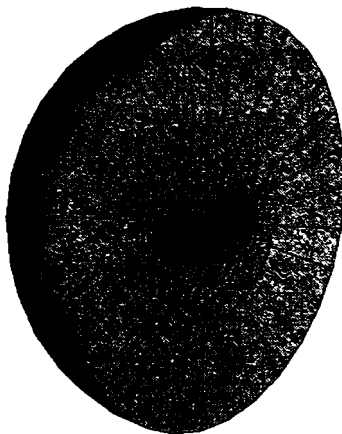


Fig.6.7 Discretizarea modelului studiat

Numărul elementelor și al nodurilor folosite este prezentat în tabelul 6.3
Tabelul 6.3

Zona modelului	Nr. elemente	Nr. Noduri
Componenta	6450	22260
Spațiul aer	22610	27717
Spațiul infinit	340	126

Ca mărime de intrare am introdus astfel, puterea calorică specifică, denumită în program căldură generată (heat gen), pentru modelarea căreia s-a folosit modelul dublului elipsoid definit cu editorul de funcții menționat. Pe suprafața exterioară a modelului am introdus temperatura egală cu cea a mediului ambiant a cărei valoare este 20°C.

6.4 Evoluția în spațiu și în timp a câmpului termic

Analiza termică realizată s-a efectuat în regim nestaționar (tranzitoriu) în două faze:

- o fază pe toată pe durata sudării
- o fază care să cuprindă și răcirea componentelor

La o astfel de analiză, trebuie stabilită durata în care se efectuează analiza (TIME). Având în vedere că lungimea componentelor este de 120mm, viteza de sudare de 6 mm/s, dintr-un calcul simplu rezultă că durata sudării este de 20 secunde. [73],[74]

Programul soft Ansys, determină valorile mărimilor din noduri în anumite intervale de timp, începând cu momentul inițial, $t_0=0$. Între fiecare două momente determinate consecutiv, există un pas de timp Δt . Pentru a obține o precizie foarte bună a rezultatelor simulării, este necesar ca acest pas de timp, să fie cât mai mic, dar acest

lucru conduce la un timp foarte mare de calcul, și implicit la creșterea dimensiunilor fișierelor.

Deasemenea, se impune o valoare minimă a pasului de timp Δt , astfel încât pe durata acestuia, undele termice să străbată fiecare element finit. Valoarea minimă a pasului de timp:

$$\Delta t = \frac{\rho \cdot c}{k} \cdot (\Delta x)^2$$

unde : Δx este valoarea lungimii minime a elementului finit din lungul cusăturii sudate, care pentru cazul de față are valoarea $\Delta x = 2\text{mm}$.

Înlocuind cu valorile proprietăților de material cunoscute pentru oțel, în formula (6.17), rezultă $\Delta t = 0,288$ secunde, care s-a ales pentru o precizie cât mai bună a rezultatelor, $\Delta t = 0,2$ secunde.

Cunoscând durata sudării că este 20secunde, vom avea în urma raportului:

$$\frac{20}{0,2} = 100 \text{ de pași de timp, } \Delta t.$$

Cu aceste ultime calcule, programul trece în faza de postprocesare, fază în care se pot urmări sub formă de grafice, diagrame sau animație, rezultatele modelării și simulării procesului studiat.

În figurile de mai jos se prezintă câmpul termic după anumite intervale de timp pe fața superioară a componentei de sudat:

- temperatura în componentă după o secundă , (Fig.6.8)
- temperatura în componentă după 5 secunde , (Fig.6.9)
- temperatura în componentă după 10 secunde, (Fig.6.10)

În fig. 6.11, se observă temperatura în întreg modelul studiat, după 20s.

Se poate observa deplasarea sursei pe lungimea cordonului de sudură, ca și distribuția temperaturii, în funcție de perioada de timp.

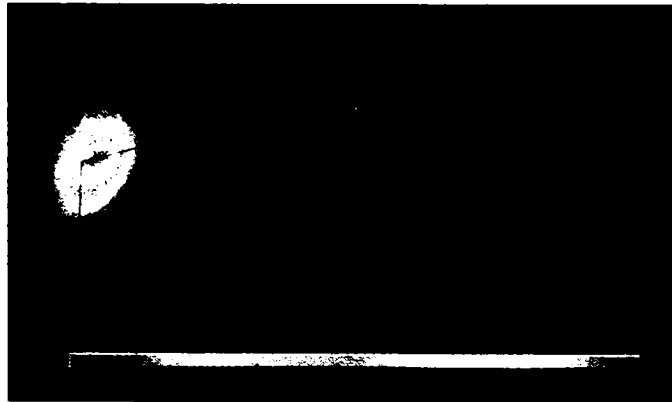


Fig.6.8. Temperatura în componentă după 1s

În figura 6.8, așa cum am menționat anterior, am introdus ca și temperatură inițială, temperatura mediului ambiant, pe partea stângă a paletii de culori (începând de la culoarea albastru), 20°C (programul aproximează valoarea la 19.999).



Fig. 6.9 Temperatura în componentă după 5s

Se poate observa odată cu amorsarea arcului electric, temperatura din componenta de sudat.

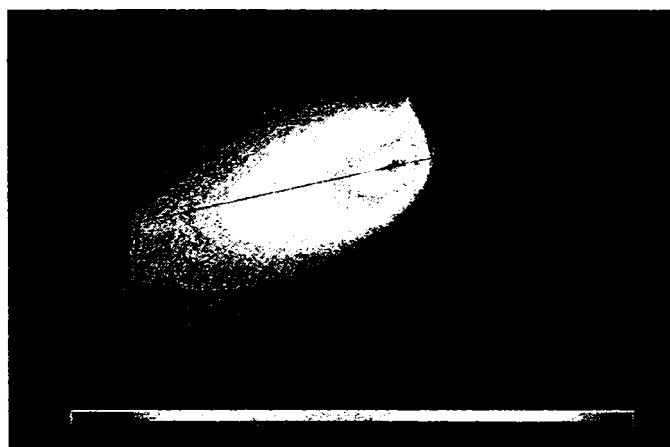


Fig. 6.10 Temperatura în componentă după 10s

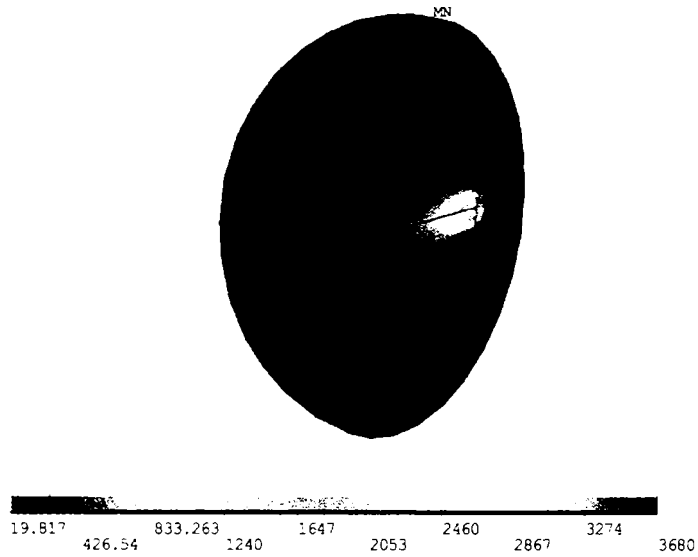


Fig. 6.11 Temperatura în componentă după 20s

Programul Ansys ne permite vizualizarea repartiției temperaturii, atât în coordonate 2D, cât și 3D, printr-o reprezentare izometrică, tot în funcție de aceleași perioade de timp, (Fig 6.12, Fig. 6.13, Fig. 6.14, Fig. 6.15)

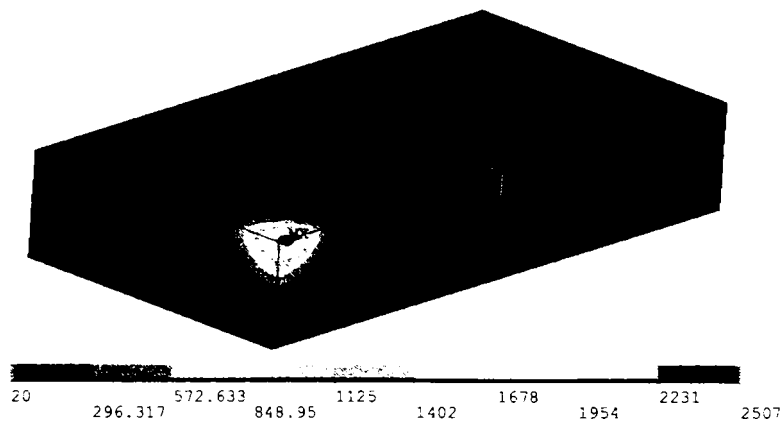


Fig.6.12 Distribuția temperaturii după 1s

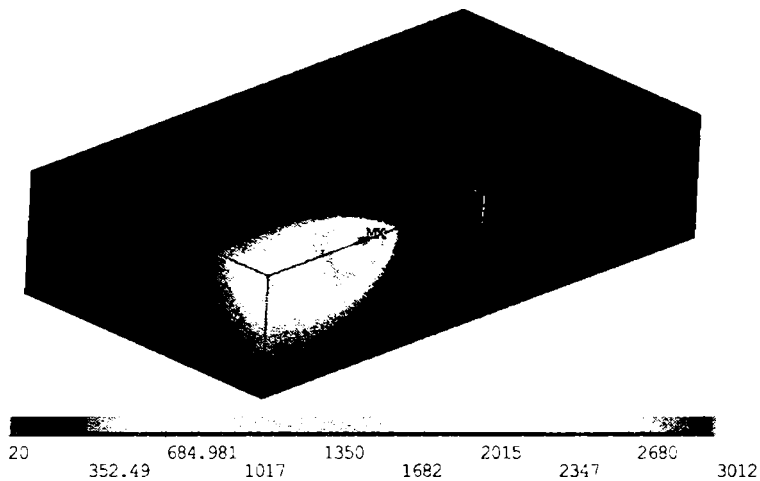


Fig.6.13 Distribuția temperaturii după 5s

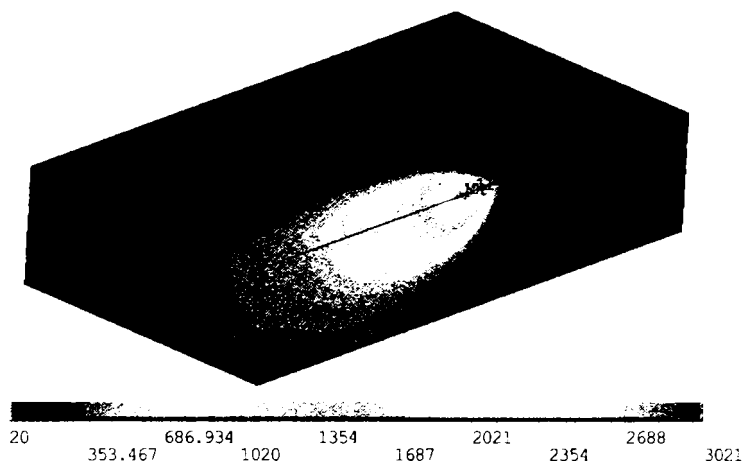


Fig.6.14 Distribuția temperaturii după 10s

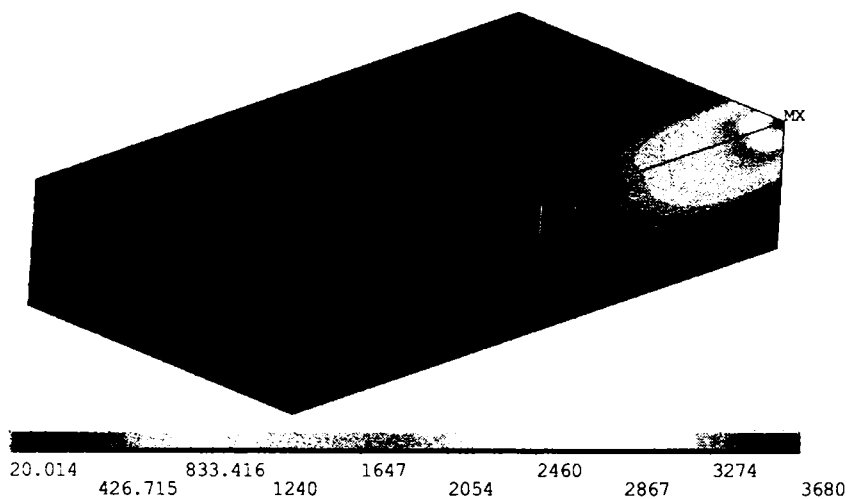


Fig.6.15 Distribuția temperaturii după 20s

În figurile următoare (Fig. 6.16, Fig. 6.17, Fig. 6.18, Fig. 6.19), s-au reprezentat prin contururi colorate, doar zonele la care temperatura depășește pe cea a temperaturii de topire a oțelului, zone în care se poate observa și deplasarea băii de metal topit de-a lungul cusăturii sudate.

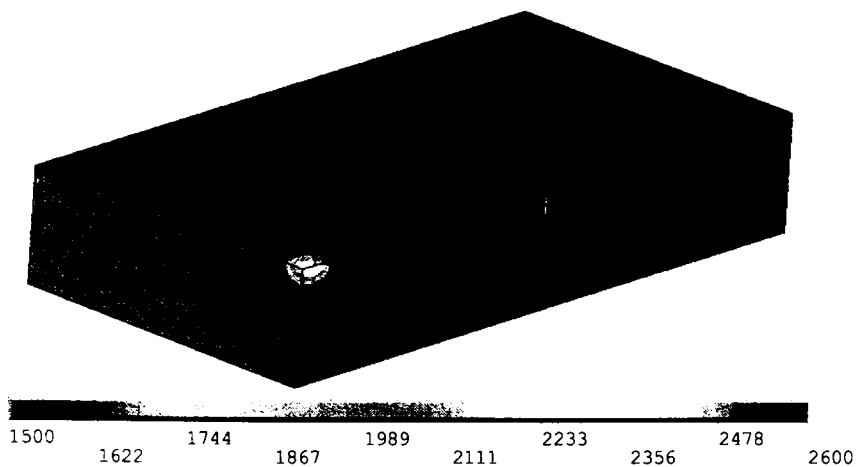


Fig. 6.16 Poziția sursei mobile după 1s

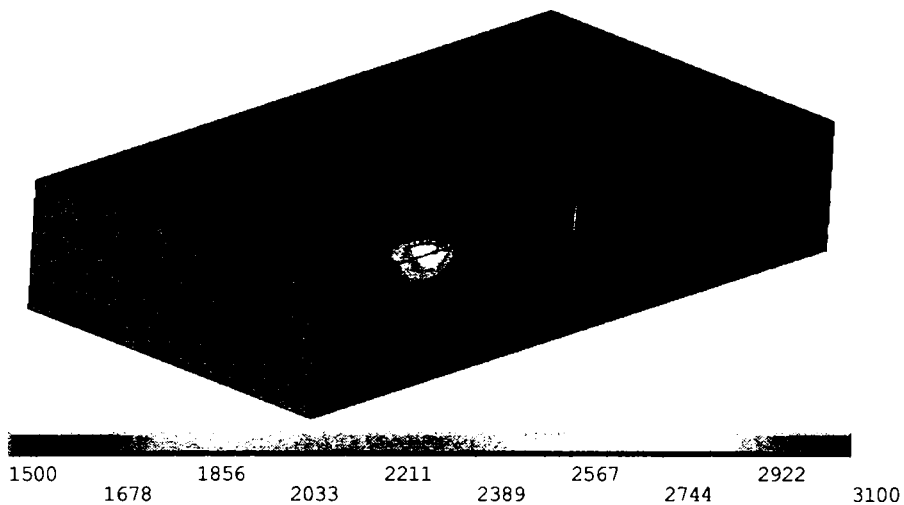


Fig. 6.17 Poziția sursei mobile după 5s

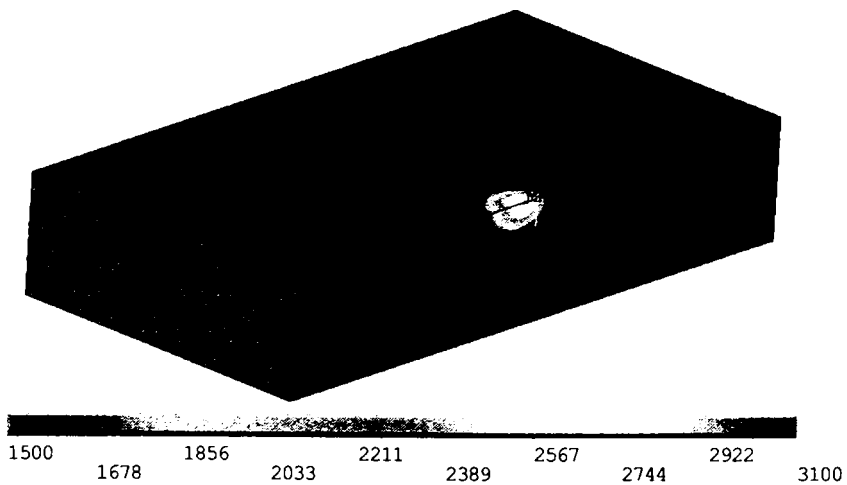


Fig.6.18 Temperatura în componentă după 1s

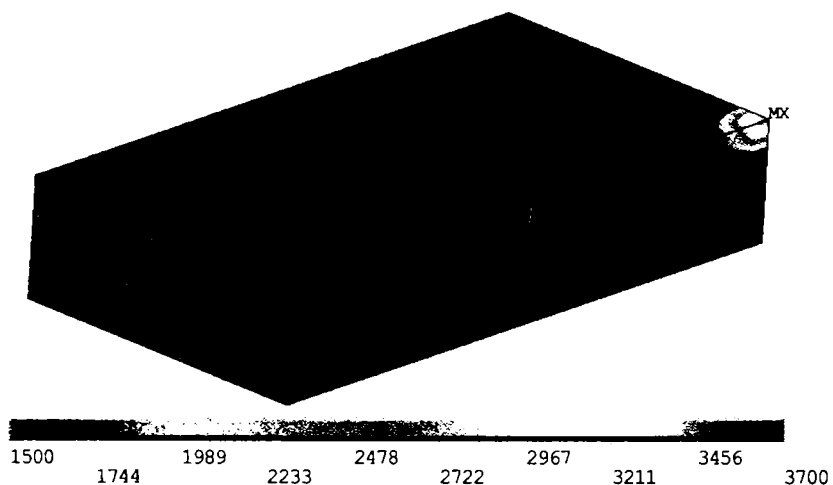


Fig. 6.19 Poziția sursei mobile după 20s

6.4.1 Variația în spațiu a temperaturii

Simultan, s-a reprezentat sub formă de grafice, variația spațială a temperaturii după diverse direcții [6],[76]. O primă direcție am ales-o în lungul cusăturii sudate (de-a lungul axei Ox), reprezentând variația temperaturii cu distanța măsurată din poziție inițială (cu simbolul TLUNG).

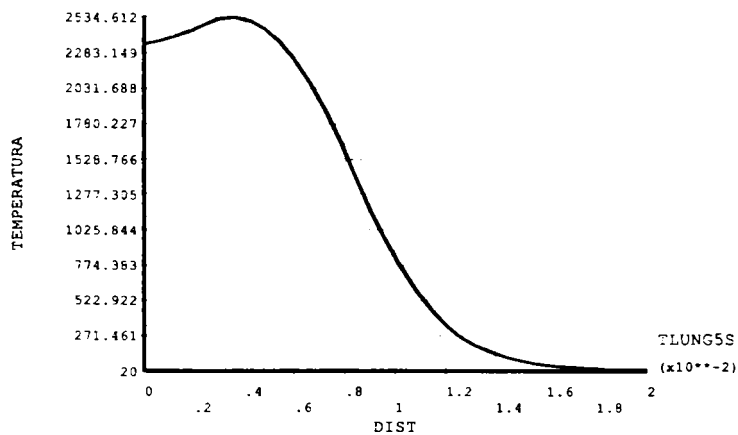


Fig. 6.20 Variația temperaturii după 5s

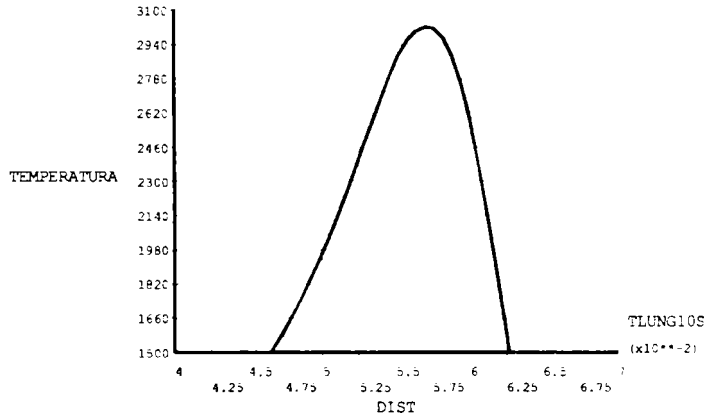


Fig. 6.21 Variația temperaturii după 10s

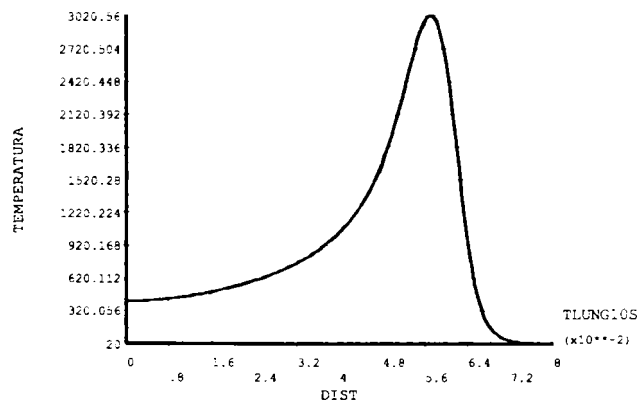


Fig. 6.22 Variația temperaturii după 10s

Se poate observa că valoarea maximă a temperaturii se deplasează în lungul cusăturii sudate odată cu sursa.[39] În Fig.6.21, am considerat deplasarea sursei mobile, doar pentru temperaturi mai mari ca temperatura de topire a oțelului. Așadar pe axa temperaturilor, se pleacă de la temperatura de 1500°C . Tot în acest grafic se poate observa lungimea băii de metal topit, între valorile $4,63 - 6,25 \cdot 10^{-2}$ m, valori care corespund cu valoarea obținută experimental a lungimii băii de metal topit.

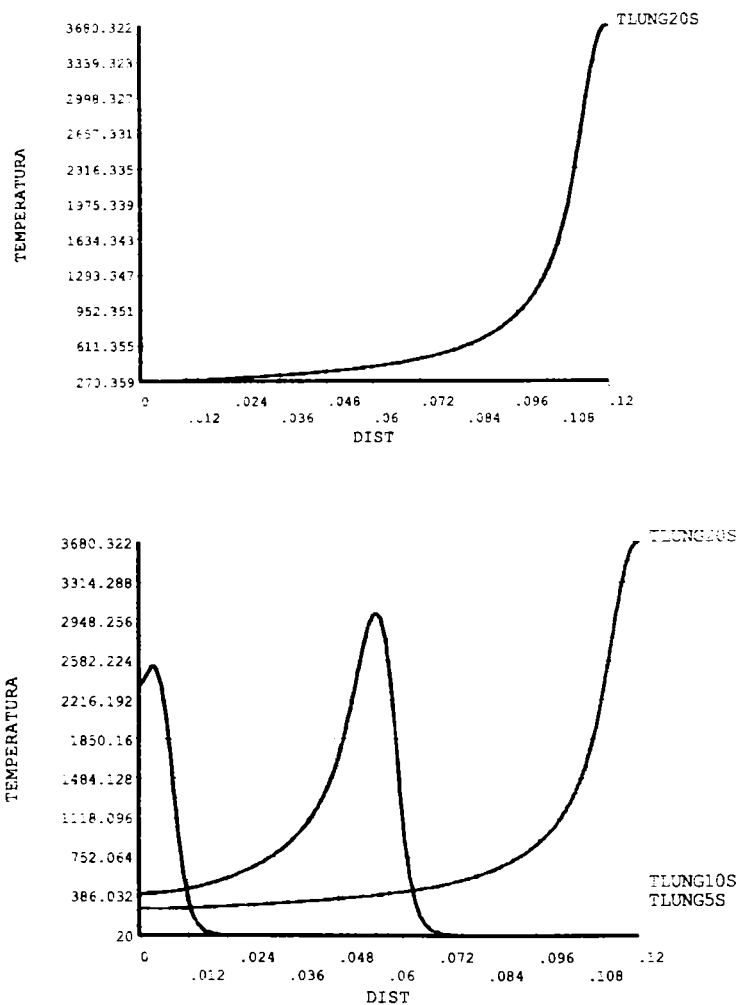


Fig. 6.24 Repartiția câmpului termic

În Fig.6.24 se poate observa repartiția exponențială a câmpului termic în lungimea componentei de sudat, în perioadele de timp mai sus menționate.

În Fig.6.25, Fig.6.26, Fig.6.27, Fig.6.28 este redată variația temperaturii, la diferite momente de timp, după o direcție transversală pe cusătura sudată, pentru a se putea observa variația temperaturii în grosimea componentelor (simbol TTRAN).

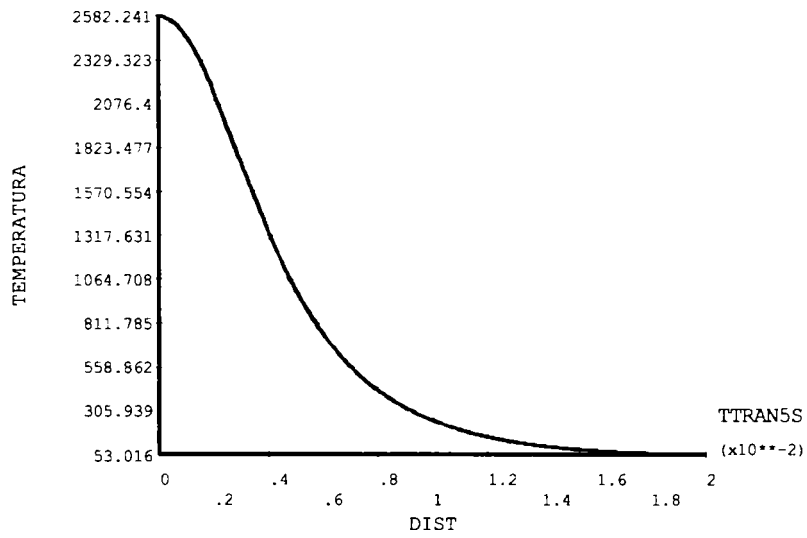


Fig. 6.25 Variația temperaturii după 5s

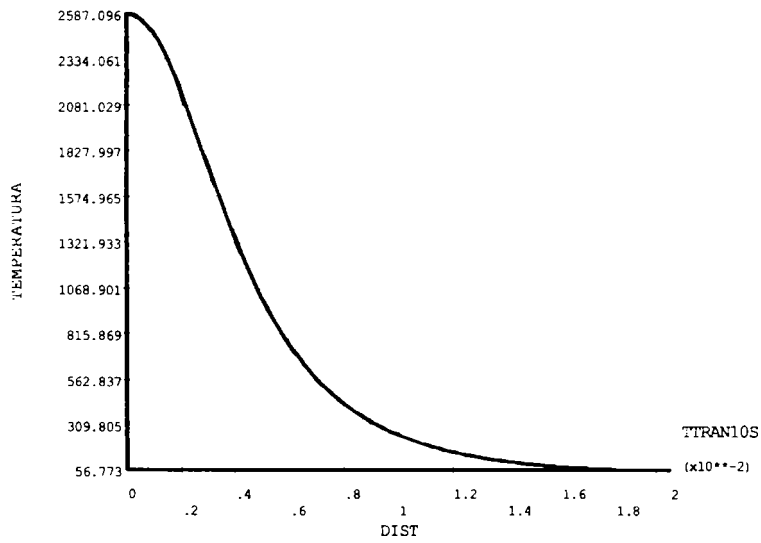


Fig. 6.26 Variația temperaturii după 10s

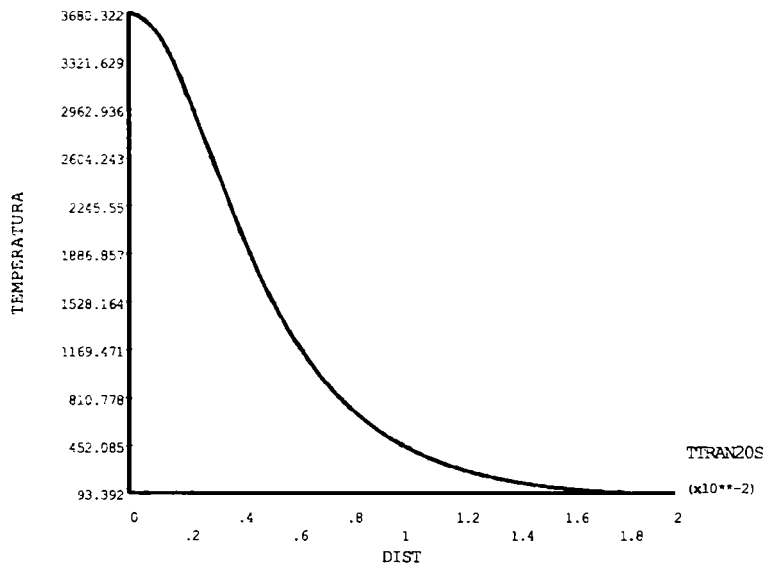


Fig. 6.27 Variația temperaturii după 20s

Din figurile anterioare se poate observa că, pe grosimea componentelor, variația temperaturii este aproape la fel, la momentele de timp specificate.

În Fig.6.28, se prezintă doar temperaturi mai mari ca temperatura de topire, pentru a se deduce grosimea băii de metal topit, aproximativ $5,3 \cdot 10^{-3} \text{m}$, valoare ce se apropie cu datele obținute experimental.

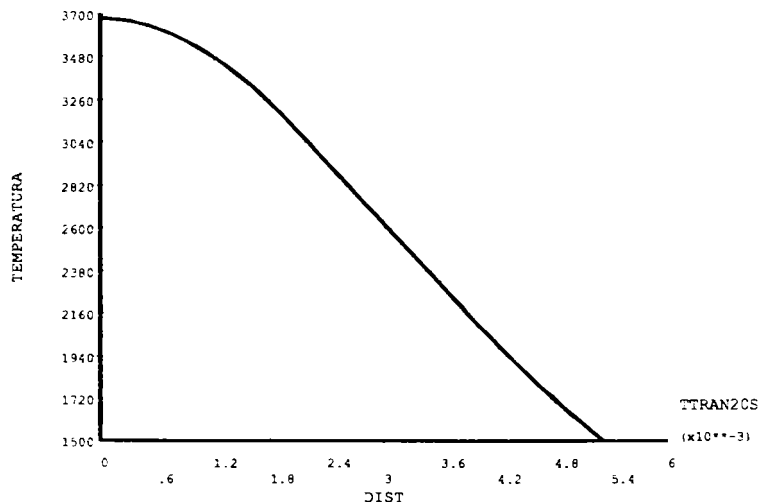


Fig. 6.28 Variația temperaturii după 20s

Ultima reprezentare spațială a temperaturii s-a efectuat după o direcție normală pe suprafața cusăturii sudate (simbol TSUPR), în Fig.6.28, Fig.6.29, Fig.6.30, Fig.6.31, din care se poate trage concluzia că pe suprafața componentei, variația temperaturii este aproape constantă, curbele obținute iau forma izotermelor specifice ciclului termic la sudare.

În Fig.6.31 și Fig.6.32, s-au reprezentat temperaturi mai mari ca temperatura de topire, rezultând astfel dimensiunile băii de metal topit după 10s, respectiv 20s, valori care se apropie de valoarea de 6mm, determinată experimental.

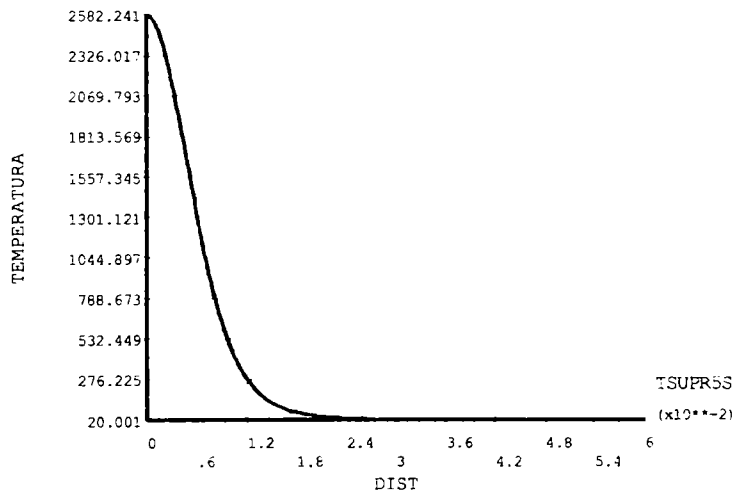


Fig. 6.29 Variația temperaturii după 5s

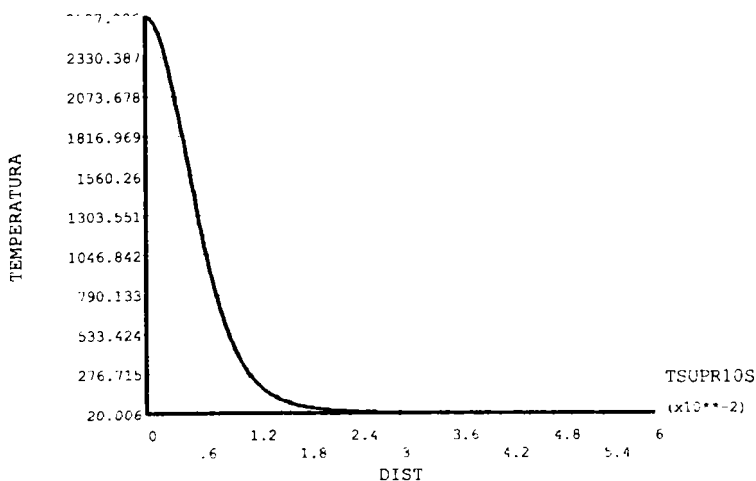


Fig. 6.30 Variația temperaturii după 10s

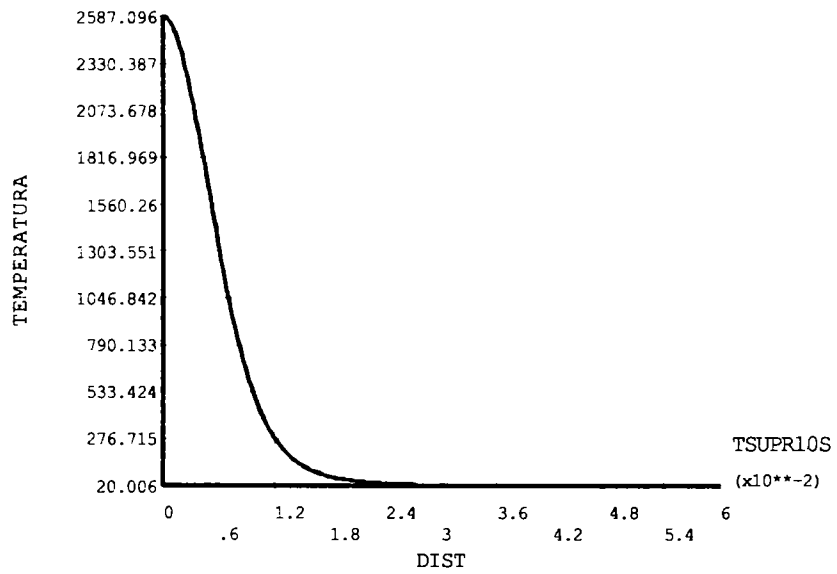


Fig. 6.31 Variația temperaturii după 20s

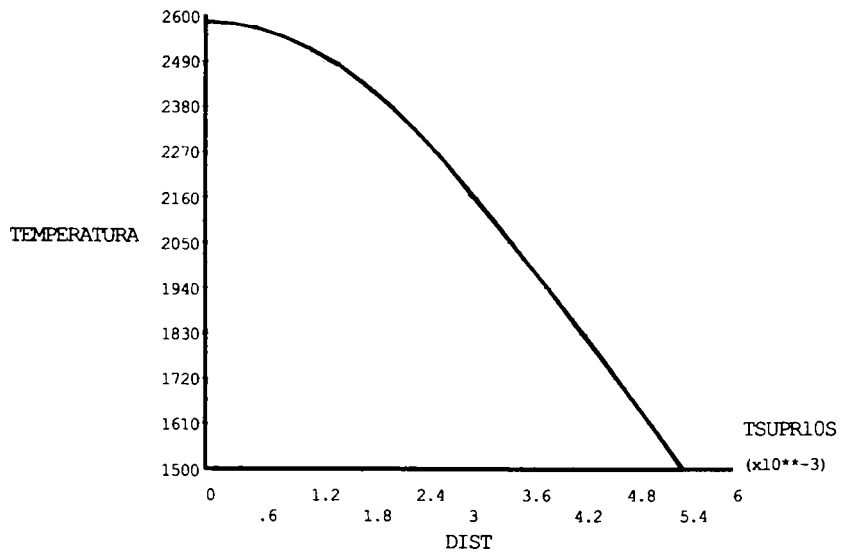
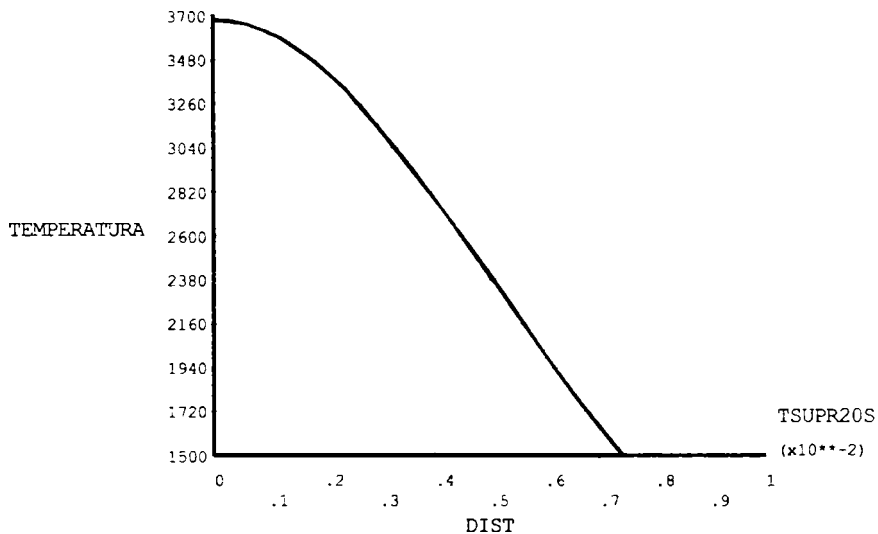


Fig. 6.32. Variația temperaturii după 10 s pentru $T > T_{top OL}$

Fig. 6.33. Variația temperaturii după 20 s pentru $T > T_{top OL}$

Programul ne permite de asemenea, să putem observa variația temperaturii pentru o direcție normală pe cusătură, paralelă cu suprafața componentei a spațiului-aer din vecinătatea cusăturii sudate (Fig.6.33 și Fig.6.34)

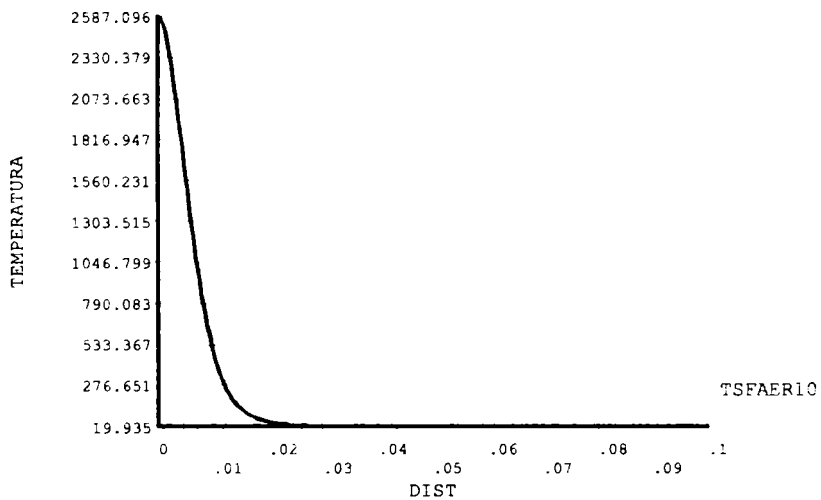


Fig.6.34 Variația temperaturii în spațiul-aer

6.4.2 Variația în timp a temperaturii

În fig.6.35, Fig.6.36, Fig.6.37 se poate observa variația în timp a temperaturii pe durata sudării, pentru diferite poziții (inițială, de mijloc, finală) ale arcului electric

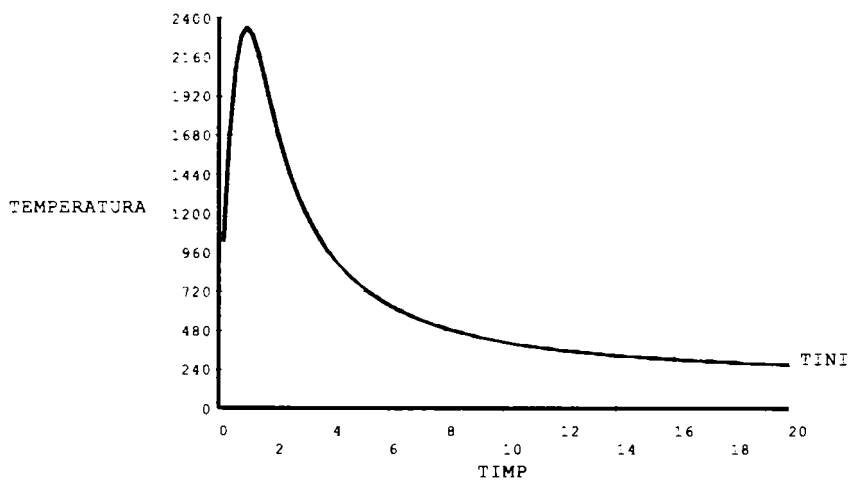


Fig.6.35 POZIȚIA INIȚIALĂ

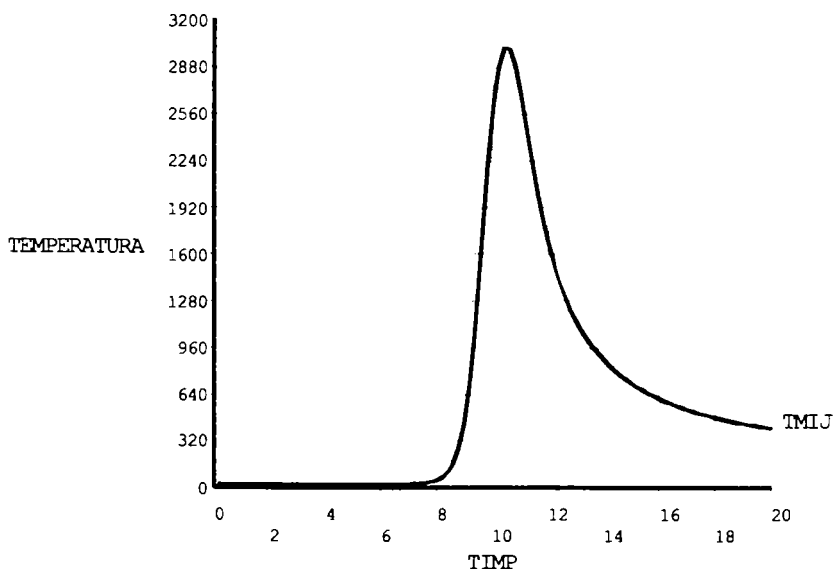


Fig.6.36 POZIȚIA MIJLOC

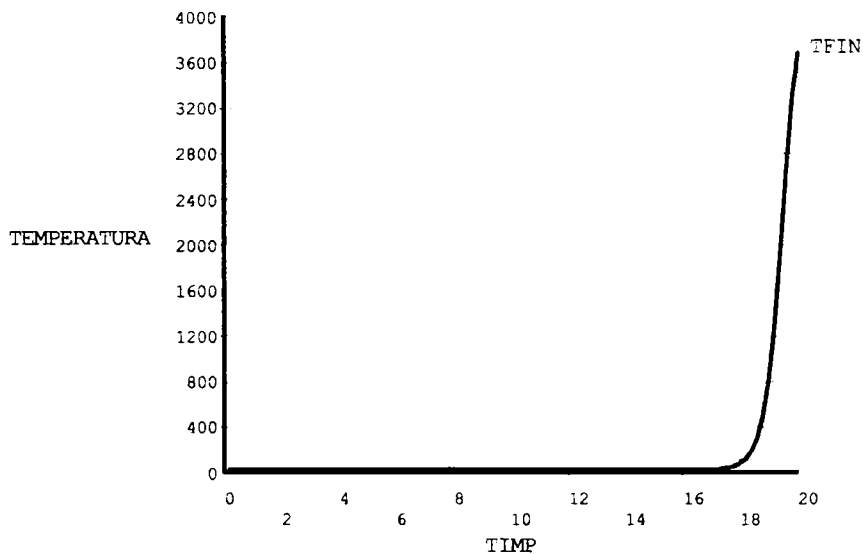


Fig.6.37 POZIȚIA FINALĂ

Din figurile anterioare se observă o deplasare a valorii maxime a temperaturii, odată cu deplasarea sursei mobile (arcul electric).

Într-o a doua fază am ales o durată mai mare de timp, de 1000s, putând observa distribuția temperaturii la finalul acestei durate în modelul studiat (Fig.6.38), și doar în componentă (Fig.6.39)

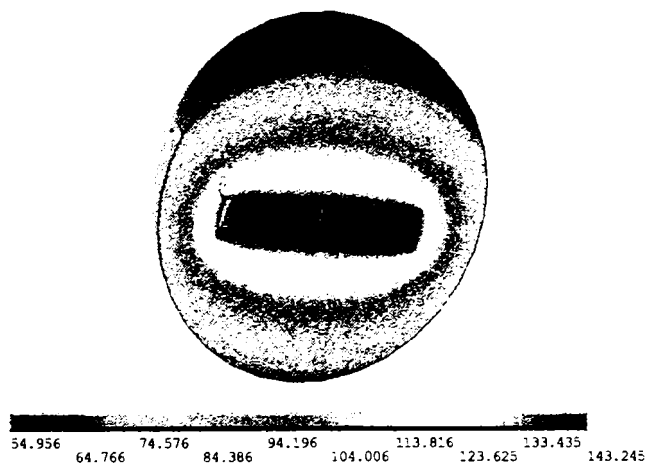


Fig.6.38

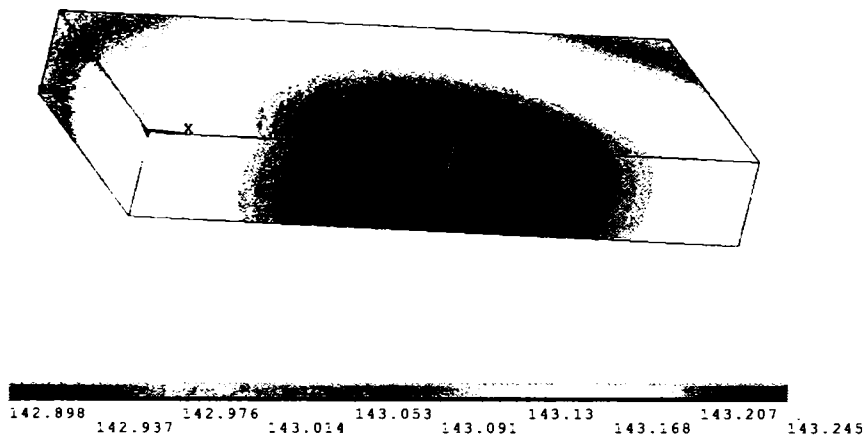


Fig.6.39

La sfârșitul celor 1000s, temperatura în componenta de sudare scade în jurul valorii de 140°C . Scăderea temperaturii are loc rapid, cu câteva zeci de grade pe secundă

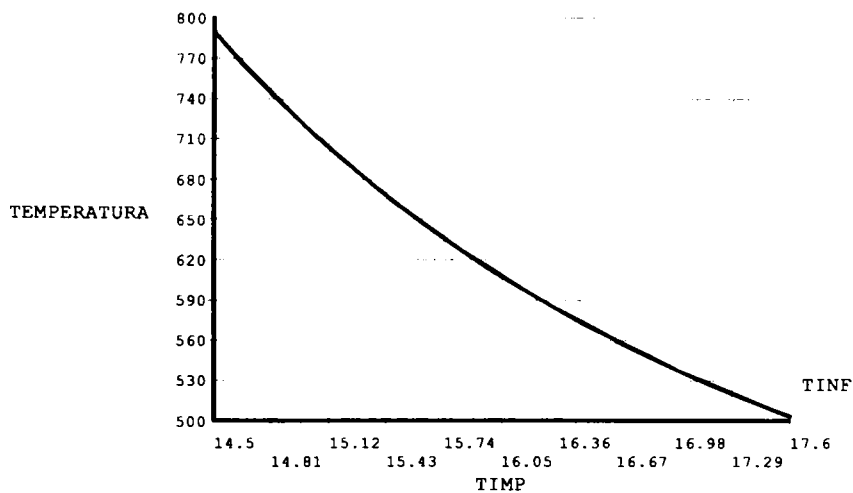


Fig.6.40

În Fig.6.40, s-a reprezentat variația temperaturii, în intervalul de răcire de la $800-500^{\circ}\text{C}$. (aproximativ 3s).

7 VERIFICĂRI EXPERIMENTALE

7.1 Efectuarea încercărilor

Pentru a verifica rezultatele obținute am măsurat temperatura în trei puncte aflate pe fața superioară a componentelor de-a lungul cusăturii sudate situate, aproximativ, la începutul cusăturii sudate, la mijlocul cusăturii, și la finalul acesteia.

Măsurarea temperaturii a fost efectuată cu ajutorul unui pirometru optic, ce poate măsura temperaturi de până la 3000°C, de tip PYRO Optical 87F, care folosește lumina sau altă radiație emanată de un obiect cald, pentru a-i măsura temperatura. Pirometrul optic se întrebuițează în sute de aplicații industriale, cu precădere la măsurarea temperaturii metalelor topite.

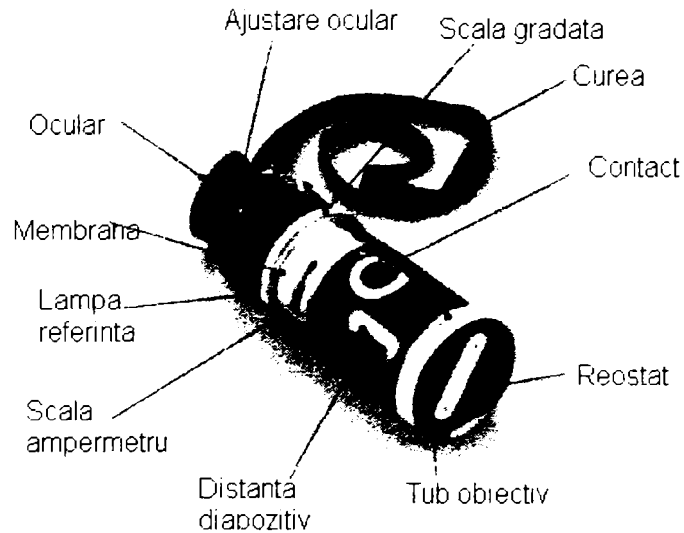


Fig. 7.1. PYRO Optical 87F

Utilizarea aparatului este destul de simplă, operatorul rotește tubul obiectiv al aparatului, îndreptat înspre arcul electric de sudare care constituie corpul cald a cărei temperaturi trebuie măsurată, fixează ținta până când aceasta poate fi vizualizată, temperatura măsurată fiind indicată pe o scară cu citire directă (Fig.6.41).

Valorile măsurate ale temperaturii le-am notat cu TM, iar valorile obținute prin

aplicarea metodei descrise, sunt desemnate prin TR.

Valorile temperaturii le-am citit după intervale de timp precizate în tabelul 6.1.

Variația temperaturii în timp într-un punct aflat pe axa cusăturii sudate, la începutul sudării este redată în tabelul 7.1.

Tabel 7.1

TM [°C]	980	1100	1350	1550	1930	2000	2115	2100	1950	1780	1500
TR [°C]	1020	1200	1440	1680	1920	2160	2280	2220	2040	1800	1560
t [sec]	2	2,5	4	4,5	6	8	10	14	18	20	24
TM [°C]	1300	1150	1030	900	790	700	600	450	350	235	
TR [°C]	1320	1200	1080	960	840	730	600	480	360	240	
t [sec]	28	30	34	40	44	48	70	80	110	190	

Variația temperaturii în timp într-un punct aflat pe axa cusăturii sudate, într-un punct aflat la mijlocul cusăturii sudate este redată în tabelul 7.2.

Tabelul 7.2.

TM [°C]			300	430	600	980	1270	1550	1800	2200	2780	2970	2800
TR [°C]	0	160	320	480	640	960	1280	1600	1920	2240	2880	3000	2880
t [sec]	8	8,4	8,4	9	9,2	9,4	9,4	9,6	9,8	10	10,2	10,6	11
TM [°C]	2560	2250	1900	1550	1200	900	900	850	750	500	480	430	300
TR [°C]	2560	2240	1920	1600	1280	960	900	800	640	500	480	450	320
t [sec]	11,2	11,6	12	12,4	13	13,4	13,8	14	16	17	18	20	22

Variația temperaturii în timp într-un punct aflat pe axa cusăturii sudate, la sfârșitul sudării este redată în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3.

T·M· [°C]	300	300	300	330	330	330	380	700	1000	1550	1980
T·R· [°C]	320	330	340	350	360	370	400	800	1200	1600	2000
t·[sec]	16	18	18	18	18	18	19	19	19	19	19
TM· [°C]	2100	2600									
TR· [°C]	2400	2800									
t·[sec]	19,5	19,5									

7.2 Compararea rezultatelor măsurate cu rezultatele experimentale

Pentru compararea rezultatelor s-au folosit graficele obținute în urma folosirii programului de modelare și simulare Ansys, de variație a temperaturii în timp pentru diferite poziții, care s-au comparat cu rezultatele obținute prin măsurători.

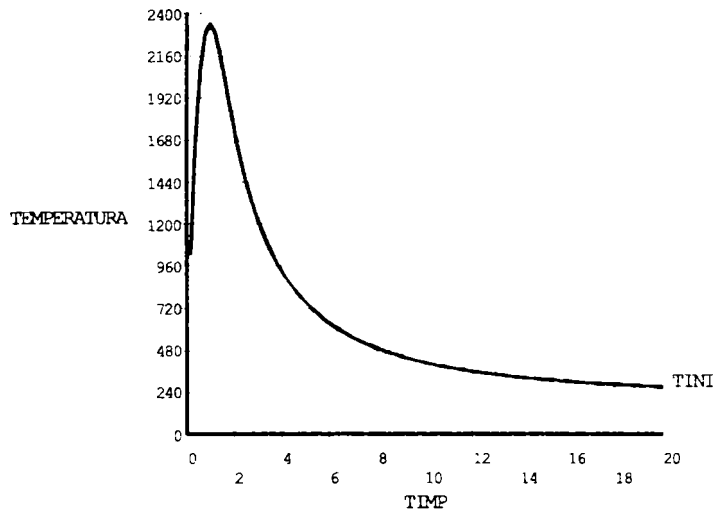


Fig. 7.2. Graficul de variație al temperaturii reale
Pentru o poziție inițială

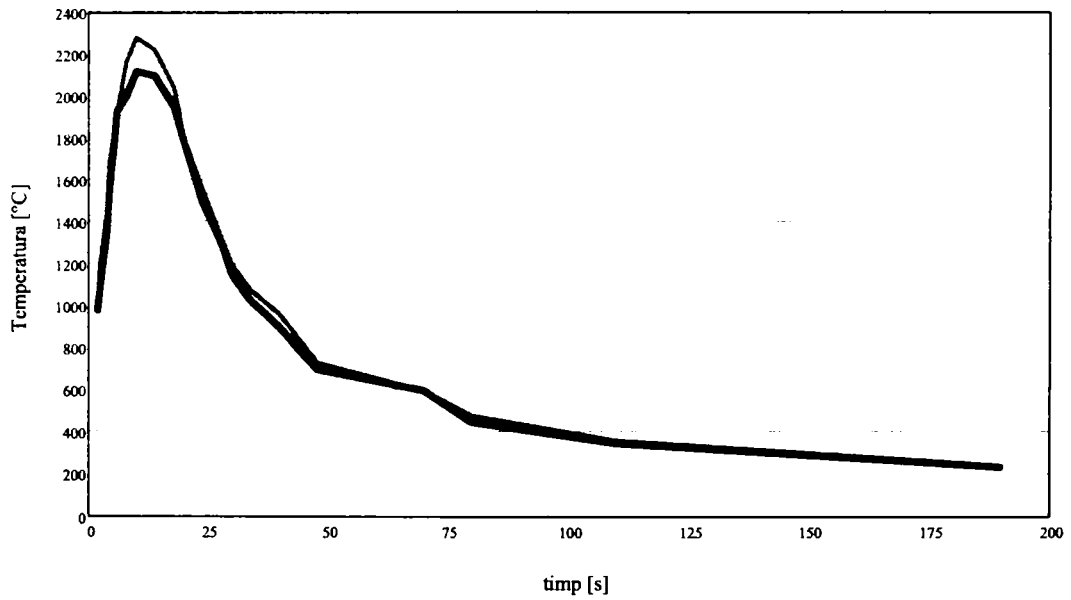


Fig.7.3 Graficul de comparație a rezultatelor măsurate și simulate la începutul sudării (poziție inițială)

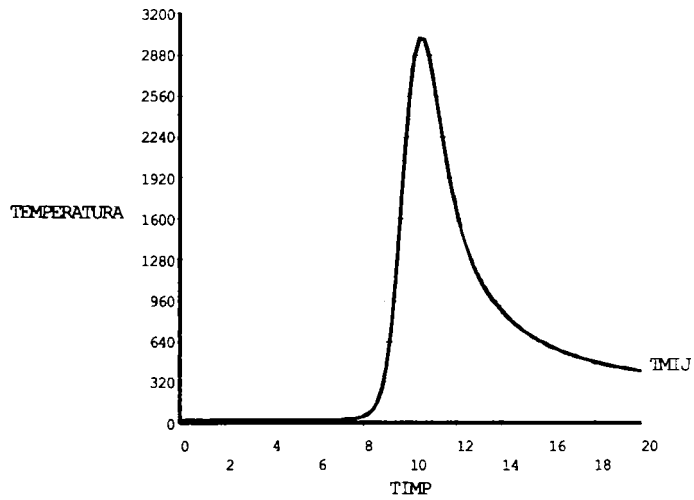


Fig. 7.4 Graficul de variație a temperaturii reale Pentru o poziție de mijloc

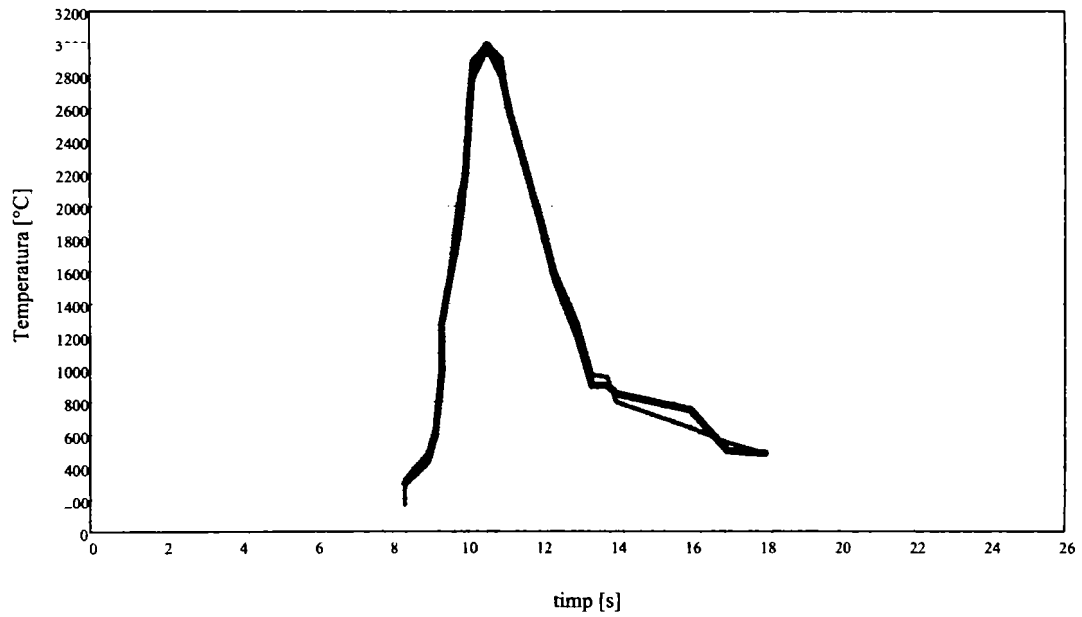


Fig.7.5 Graficul de comparație a rezultatelor măsurate și simulate într-un punct la mijlocul cusăturii sudate (poziție mijloc)

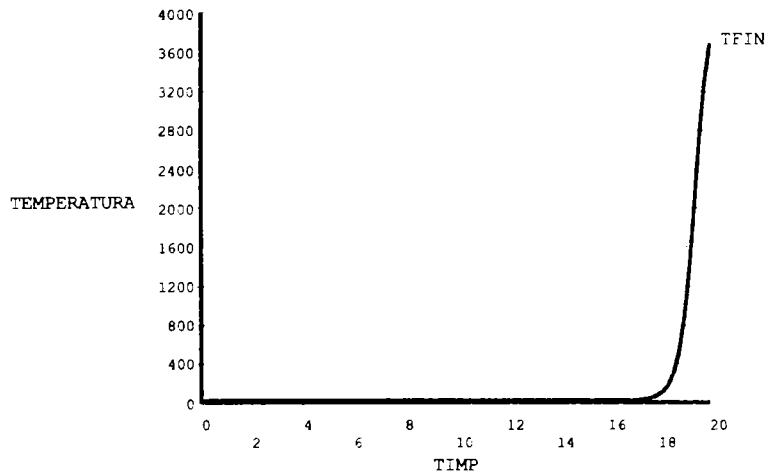


Fig.7.6 Graficul de variație a temperaturii reale pentru poziția finală

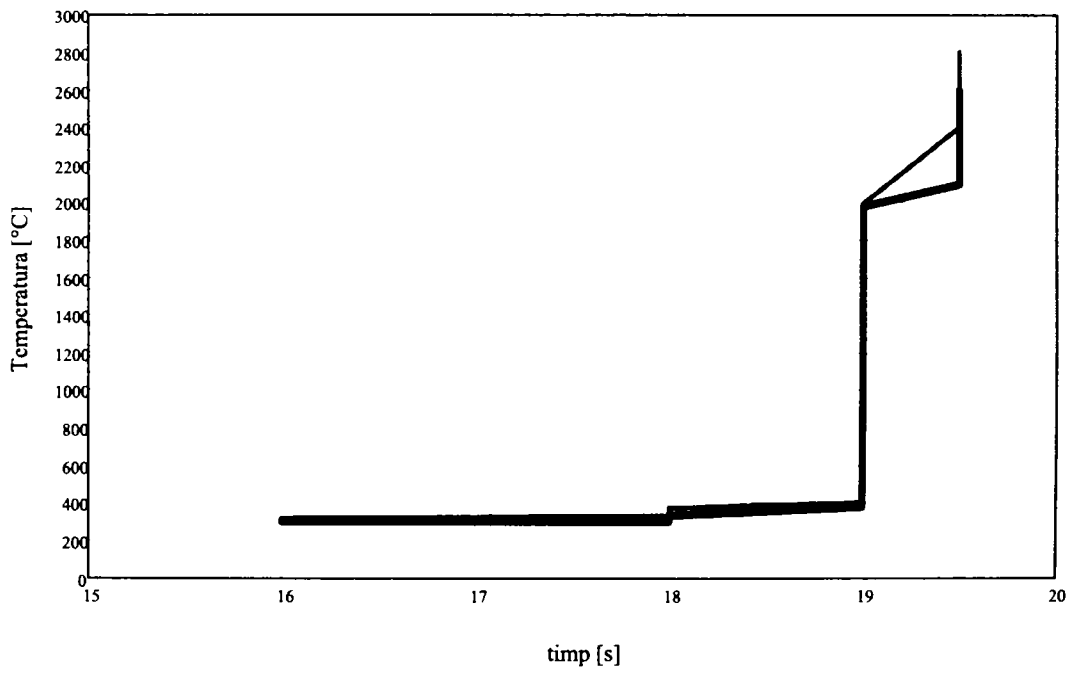


Fig.7.7 Graficul de comparație a rezultatelor măsurate și simulate la sfârșitul sudării (poziție finală)

8 CONCLUZII FINALE

Lucrarea prezintă modelul matematic complet al proceselor fizice care stau la baza proceselor de sudare cu arcul electric în mediu de gaze protectoare.

Având în vedere tematica lucrării, metoda elementelor finite prezentată s-a aplicat pentru sudarea cap la cap, prin procedeul MAG cu CO_2 , a două componente de formă paralelipipedică cu dimensiunile $10 \times 15 \times 200 \text{ mm}$, cu următoarele caracteristici:

- Tensiunea arcului, $U_a = 33 \text{ V}$;
- Curentul de sudare, $I_s = 395 \text{ A}$;
- Viteza de sudare, $v_s = 47 \text{ cm/min}$;
- Sârma de sudare de tip G3Si1 are diametrul, $d_e = 1,2 \text{ mm}$;
- Debitul gazului de protecție, $Q = 18 \text{ l/min}$.

După ce s-a proiectat tehnologia de sudare respectivă, prin simularea și determinarea câmpului termic cu metoda ce face obiectul acestei lucrări, apare posibilitatea unei optimizări. Astfel, se pot stabili curentul de sudare și viteza de sudare, încât să se obțină adâncimea de pătrundere dorită, la o trecere, și apoi numărul de treceri.

Deoarece pentru rezolvarea modelelor matematice stabilite, s-a utilizat metoda elementelor finite, mai întâi, s-a prezentat importanța folosirii metodei elementelor finite în raport cu celelalte metode numerice, apoi fundamentarea matematică a metodei.

S-au dedus în acest scop condițiile de frontieră ce trebuie impuse pentru rezolvarea modelului potențialelor electromagnetice cu metoda elementelor finite.

S-a dedus forma generală a ecuației conservării energiei.

S-au obținut formele generale a ecuațiilor mișcării unui mediu continuu, care să fie valabile și pentru un regim de curgere turbulentă.

S-a stabilit un model cu ajutorul căruia să se poată determina coeficientul de schimb de căldură prin convecție.

S-au stabilit parametrii rețelei de discretizare și tipul de rețea ce se va utiliza pentru modelul componente de sudare - arc electric - mediu (aer), precum și regimul (static) analizei.

Stabilirea tipurilor de elemente finite care vor fi utilizate pentru discretizarea domeniului de analiză.

Definirea valorilor constantelor reale pentru metalul de bază, arcul electric și pentru aer.

Stabilirea proprietăților de material pentru metalul de bază, arcul electric și aer, în funcție de variația temperaturii, cu ajutorul nomogramelor.

Stabilirea relațiilor pentru calculul elementelor matricei de rigiditate și a vectorului termenilor liberi ce intervin în modelul numeric elemental au avut ca scop simplificarea modelului numeric studiat.

Determinarea valorii coeficientului de schimb al căldurii prin convecție, cu metoda elementelor finite, și compararea valorii obținute prin simulare cu valoarea sa

existentă în literatura de specialitate, a oferit un prim pas în validarea programului de simulare.

Determinarea forțelor magnetice permite stabilirea modului de transfer a picăturilor de metal lichid prin coloana arcului electric. Totodată, printr-un proces de optimizare se pot afla valorile parametrilor tehnologici astfel încât să se obțină un mod de transfer dorit.

Pe baza ciclului termic, din punctele componentelor ce se sudează, se poate determina timpul de răcire de la 800 °C la 500 °C, t_{815} , care este un indicator asupra calității îmbinării sudate. De asemenea, printr-un proces de optimizare se obține căldura ce trebuie schimbată cu exteriorul pentru a obține o valoare impusă pentru acest timp.

Prin modelarea condițiilor de frontieră de la infinit, prezentată în lucrare, se pot studia și sisteme pentru care nu se cunosc condițiile de frontieră termice sau electromagnetice cu precizie suficient de bună. Aceasta conduce la o creștere a acurateții rezultatelor obținute.

Analiza conducției electrice oferă posibilitatea determinării distribuțiilor densității de curent și a puterii calorice specifice în regiuni cu o formă geometrică complexă, care practic nu pot fi determinate pe altă cale.

Prin utilizarea analizelor cuplate se reduc datele de intrare (încărcările) doar la cele care se cunosc cu precizie, cum ar fi curentul de sudare sau căderea de tensiune pe arcul electric, în cazul de față.

Totodată, se ia în considerare și dependența de temperatură a proprietăților de material.

Metoda prezentată permite obținerea proprietăților de material, și mai ales dependența lor de temperatură, care nu pot fi determinate direct, experimental, cum ar fi cele ale arcului electric. Pentru aceasta, s-a realizat sistemul respectiv și s-au măsurat valorile unor mărimi, de exemplu, temperatura în anumite puncte. Pentru proprietățile respective s-au introdus valori inițiale, alese de utilizator din literatura de specialitate.

S-a modelat și s-a analizat sistemul prin metoda prezentată. Printr-un proces de optimizare se pot obține valorile proprietăților astfel încât temperatura în punctele alese să aibă valorile stabilite experimental.

Metoda prezentată permite simularea, analiza și optimizarea dispozitivelor și instalațiilor de natură electromagnetică, mecanică, termică și hidraulică, utilizate în diverse ramuri industriale.

Lucrarea este utilă și programatorilor, deoarece prezintă relațiile necesare implementării pe calculatorul electronic a metodei elementelor finite.

Metoda prezentată în lucrare poate fi utilizată de toți cei ce au ca domeniu de activitate aplicațiile inginerești ale proceselor fizice.

Determinarea prin simulare a variației câmpului termic, în timp respectiv determinarea valorilor acestuia în punctele critice și compararea acestor valori cu cele obținute din practică și compararea rezultatelor măsurate cu cele obținute cu ajutorul simulării ne conduce la următoarea concluzie:

- cu ajutorul metodei de simulare prezentate se pot efectua experimente care dau valori apropiate celor reale, înlesnind munca tehnologilor, scurtând timpul de întocmire a tehnologiilor de sudare pentru diferite structuri sudate.

9 CONTRIBUȚII PERSONALE

1. Deducerea ecuațiilor matematice pentru calculul necunoscutelor sistemului modelat și a termenilor liberi ce intervin în modelul numeric elemental.

2. Introducerea unui operator Lagrange ce permite scrierea condensată a modelului numeric elemental.

3. Implementarea în programul de simulare a unui editor de funcții pentru simplificarea volumului de calcul.

4. Determinarea ecuațiilor matematice ale transferului termic și a matricei de rigiditate cu metoda elementelor finite pentru modelarea și simularea câmpului termic în spațiu și în timp, folosind ca sursă de sudare arcul electric.

5. Simularea distribuției densității de curent și a puterii calorice specifice la o îmbinare sudată cu metoda elementelor finite.

6. Deducerea modelului numeric necesar pentru realizarea unei analize cuplate și folosirea unor analize cuplate, cu elemente finite, pentru studiul proceselor de sudare cu arc electric în mediu de gaz protector.

7. Modelarea arcului electric de sudare ca sursă mobilă de sudare, prin implementarea modelului Goldak, cu metoda elementelor finite.

BIBLIOGRAFIE

1. Andreuț I.-Introducere în analiza structurală a sistemelor dezordonate (gaze, lichide, solide amorfe). Editura Clusium, Cluj-Napoca, 1996.pag.101-103
2. A. De, J.Jantre - Prediction of weld quality in pulsed current GMAW process using artificial neural network, June 2004, pp. 253-259
3. ANSYS Commands Reference Book, ANSYS Inc. 2005
4. ANSYS Thermal Analysis Guide, ANSYS Inc. 2005
5. ANSYS Low-Frequency Electromagnetic Analysis Guide, ANSYS Inc. 2005
6. ANSYS Coupled-Field Analysis Guide, ANSYS Inc. 2005
7. Buletinul Institutului Național de Cercetare - Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale – ISIM Timișoara, nr.2/2006, pag. 2-4
8. Burcă, M., Glița, Gh. ș.a. – Influența gazului de protecție asupra geometriei rostului la sudarea MIG-MAG. Conferința anuală A.S.R. „SUDURA-2000,, Arad, 2000.
9. Burcă, M., Negoșescu, S. – Sudarea MIG-MAG. Editura Sudura 2004, Timișoara
10. Constantin, E., Iordachescu, M. and Constantin, V., Mathematical Modelling For Mass Transfer's Dynamics Through The Welding Arc, 4th European Conference On Welding, Joining and Cutting, Development of Welding and Allied Processes at the Beginning of the New Millennium – EUROJOIN 4, Cavtat-Dubrovnik, Croatia, 24-26 May, 2001, p. 577-582.
11. David, Fl. ș.a. – ANSYS^R numerical modeling of electromagnetic and thermal fields in a.c. electric arc furnaces – Proceedings of Romanian Conference of ANSYS and Pro ENGINEERING Users, Sept. 22-23, 1999, Sinaia, Romania
12. Dehelean, D., Markocsan, N. – Generarea formei prin pulverizare în jet de plasmă – B.I.D., nr.2/2001, ISSN 1453-0392
13. Dehelean, D. – Stadiul tăierii termice în România – Conferința Internațională "Tăierea termică", Timișoara, 16-18 iunie, 1999
14. Dehelean, D.- Sudarea prin topire. Editura Sudura 2001, Timișoara
15. Dilthey, U., Gollnick, J. and Pavlyk, V., - Integrative MIG/MAG Process Simulation, Internationaler Kongress der EWF, 13-14. Mai 2004, Wien, p. V1 - 1-6.
16. Faur N., - Elemente finite – Fundamente – Editura Politehnica, Timișoara, 2002 Gylmesi, M., Ostergaard, D - Mixed Shape Non-Conforming Edge Elements –CEFC '98, Tucson, Az, 1998
17. Goldak, John., T. Kaya, - Numerical Analysis of heat and mass transfer in the capillary structure of a loop heat pipe, 7th International Trends in welding Research, Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA, Ian. 2006
18. Goldak, John and M. Akhahalgı, Computational Weld Mechanics. Springer, 2005
19. Gylmesi, M. Ostergaard, D. – Non-Conforming Hexahedral Edge Elements for Magnetic Analysis – CUMPUMAG, Rio, 1997
20. Gârbea, D. – Analiză cu elemente finite – Editura Tehnică, București, 1990

21. Hăntîlă, F.I., ș.a. – Câmpul electromagnetic staționar în medii neliniare - E.I.C.P.E., București, 1997
22. Hoferkamp, N., ș.a. – Numerical modeling of thermal plasma cutting - Conferința Internațională "Tăierea termică", Timișoara, 16-18 iunie, 1999
23. Huisman, G., Trends in Welding Research, Pine Mountain, Ga, USA, (2005)
24. Kaljević, I. – An Infinite Boundary Element Formulation for Three Dimensional Potential Problems - International Journal for Numerical Method in Engineering, vol. 35, no. 10, 1992
25. Kameari, A. – Calculation of Transient 3D Eddy Current Using Edge Elements - IEEE Transactions on Magnetics, vol. 26, 1990
26. Ioniță, V. – Analiza numerică a dispozitivelor electromagnetice - E.Matrix, București, 1998
27. Jin, I. – The Finite Element Method in Electromagnetics - John Wiley and Sons.Inc, New York, 1993
28. Kilyeni, Șt. – Metode numerice - Vol .I și Vol. II - Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1997.
29. Kim C. H., W. Zhang and T. DebRoy, - Modeling of temperature field and solidified surface profile during gas metal arc fillet welding., J. Appl. Phys., 2003, 94, pp. 2667-2679.
30. Lazăr I., - Metoda elementelor de frontieră în inginerie - Presa Universitară Clujeană, Cluj - Napoca, 1997
31. Li, Hui, Saigal, Sunil - Mapped Infinite Elements for 3D Vector Potential Magnetic Problems - International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 37, 1994
32. Manabu Tanaka and Masao Ushio - "LTE-Diffusion Approximation" for Arc Welding Calculations, July 2004, IEEE Trans. Plasma Science 32
33. Moon, T.C. – Magneto-Solid Mechanics - John Wiley and Sons.Inc, New York, 1993
34. Negru, L.D. – Transmiterea căldurii și dinamica gazelor - Partea I, Litografie Institutul Politehnic Traian Vuia, Timișoara, 1990;
35. Nanu, A. – Prelucrarea dimensională prin eroziune electrică în câmp magnetic - E.Facla, Timișoara, 1977
36. Nanu, A. – Tehnologia materialelor - E.D.P., București, 1983
37. Nanu, A. – Tratat de tehnologii neconvenționale. Volum I - Editura Augusta, Timișoara, 2003
38. Oil & Gas Journal, pp 62 - 65, Feb 3, 2003, Vol 101, No 5
39. Ponomarev, V., Scotti, A., Silvinskiy, A., Al-Erhayem, O., Atlas of MIG/MAG welding metal transfer modes, IIW Doc. XII-1771 to 1775-03, Bucharest, 2003.
40. Rațiu, S. s.a.- Rezolvarea ecuației conducției termice prin metoda elementului finit, Sesiunea de comunicări științifice cu participare Internațională, Hunedoara, oct. 2000 pag. 136-143
41. Sălăgean, T. – Oțeluri pentru structuri sudate - Editura Facla, Timișoara, 1994
42. Sălăgean, T. – Sudarea cu arcul electric- E.Facla, Timișoara, 1987
43. Sălăgean, T. – Tehnologia proceselor de sudare cu arc electric - E.T., București, 1985

44. Suciu, L. - Sudarea în mediu protector de bioxid de carbon folosind curenți electrici mari, *Analele UEMR*, Nr.1/2003, Reșita 2003
45. Suciu, L. - Sudarea cu plasmă a aluminiului, *Analele UEMR*, Nr.1/2003, Reșita 2003
46. Suciu, L., Răduca, M., Tătucu, I. - Sudarea cu laser: o combinație de procese complexe, *Simpozion Internațional ACM-V Timișoara 2006*
47. Suciu, L., Sudarea în mediu de gaze protectoare a oțelurilor. - Referat nr. 1, Teza de doctorat, iunie 2005
48. Suciu, L., Modelarea și simularea proceselor tehnologice. - Referat nr. 2, Teza de doctorat, dec. 2005
49. Scutelnicu, E., ș.a. - Simularea câmpurilor termice din îmbinările sudate eterogene - Conferința internațională de știință și ingineria materialelor - BRAMAT 2001, Brașov, 2001, vol.III.
50. Standard Român SR EN 439, - Materiale pentru sudare consumabile. Gaze de protecție pentru sudare și tăiere cu arc electric; ianuarie 2005
51. Standard Român SR EN 440, - Materiale pentru sudare consumabile. Sârme electrod și depuneri prin sudare pentru sudare cu arc electric în mediu de gaz protector fuzibil a oțelurilor nealiat și cu granulație fină. Clasificare; ianuarie 2005
52. Standard Român SR EN 758, - Materiale pentru sudare. Sârme tubulare pentru sudarea cu arc electric cu/sau fără gaz protector a oțelurilor nealiat și cu granulație fină. Clasificare; ianuarie 2005
53. Standard Român SR EN 895, - Încercări distructive ale îmbinărilor sudate din materiale metalice. Încercarea la tracțiune transversală, ianuarie 2005
54. Standard Român SR EN 1043-1, - Încercări distructive ale îmbinărilor sudate din materiale metalice. Încercarea de duritate. Partea 1: Încercarea de duritate a îmbinărilor sudate cu arc electric. Ianuarie 2005
55. Standard Român SR EN 29692, - Sudare cu arc electric cu electrod învelit, sudare cu arc electric în mediu de gaz protector și sudare cu gaze prin topire. Pregătirea pieselor de îmbinat de oțel. Ianuarie 2005
56. Standard Român SR EN 1321, - Încercări distructive ale îmbinărilor sudate din materiale metalice. Examinarea macroscopică și microscopică a îmbinărilor sudate. Ianuarie 2005
57. Stănciulescu Florin - Modelarea sistemelor de mare complexitate - Editura Tehnică, București, 2003
58. Susan D., Chiriac A - Introducere în fizica lichidelor - Orizonturi universitare, Timișoara, 2004, pag.15-21
59. Ștefănescu, D., ș.a. - Transfer de căldură și masă - E.D.P., București, 1983.
60. Tătucu I, - Modelarea câmpului electromagnetic și a câmpului termic - Editura Eftimie Murgu Reșița, 2002
61. Tătucu, I., Gruescu, L. - The computer aided analysis of the electromagnetic field - *Analele Universității Eftimie Murgu, Reșița*, an VII, nr.2, Tom I, 2000, ISSN 1453-7396

62. Tătucu, I., Gruescu, L. – Contribuții la sistematizarea modelelor matematice ale câmpului electromagnetic folosite în metoda elementelor finite –Analele Universității Eftimie Murgu, Reșița, an V, nr.2, 1998, ISSN 1453-7394
63. X. He, P. W. Fuerschbach and T. DebRoy: Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel., J. Phys. D: Appl. Phys., 2003, 36, pp. 1388-1398.
64. W. Zhang, G. Roy, J. W. Elmer and T. DebRoy: Modeling of heat transfer and fluid flow during gas tungsten arc spot welding of low carbon steel., J. Appl. Phys., 2003, 93, pp. 3022-3033.
65. Wang, G., Huang, P. G., and Zhang, Y. M., Numerical Analysis of Metal Transfer in GMAW, University of Kentucky, 2003, Internet.
66. Wu C.S., Gao J.Q., Zang M – Sensing weld pool geometrical appearance in gas metal welding, july 2004, pp.813-818.
67. Wang S.X, Sun J.S, - Simulation of GMAW thermal process based on string heat source model, september 2005, pp.511-520
68. Weman, K., Welding process handbook, CRC Press, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, 2003, p. 193.
69. X.K. Zhu, Y.J. Chao - Effects of temperature-dependent material properties on welding simulation, Comput. Struct. 80, 2002 p. 967–976.

