

Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

Facultatea de Inginerie

Program de studii de masterat: Proiectare și Simulare în Ingineria Sudării

LUCRARE DE DISERTAȚIE

Masterand:

Ing. Mihai Moisoiu

Coordonator științific:

Șef. lucr. dr. ing. Carmen-Cătălina RUSU

An universitar: 2019-2020

TEMA LUCRĂRII DE DISERTAȚIE

**Simularea procedeului de sudare MIG-MAG multistrat
aplicat oțelurilor navale**

Cuprins

Capitolul 1. Stadiul actual al modelării proceselor de sudare	5
1.1. Introducere	5
1.2. Noțiuni generale de câmp termic	9
1.3. Analiza culpată termică-structurală.....	11
Capitolul 2. Modelarea utilizând elementele finite a procesului de sudare prin topire multistrat, în medii de gaze protectoare	15
2.1. Etape de calcul în modelarea cu elemente finite	15
2.1.1. Preprocesarea	15
2.1.2. Introducerea condițiilor la limită.....	16
2.1.3. Analiză efectivă.....	16
2.1.4. Postprocesarea	17
2.2. Cazul sursei termice mobile cu distribuție Gaussiană 3D	17
2.3. Caracteristicile termo-fizice ale materialului de bază	19
2.3.1. Căldura specifică	19
2.3.2. Dilatarea termică.....	19
2.3.3. Conductivitatea și difuzibilitatea termică	20
2.4. Simularea procesului de sudare multiarc în SimufactWelding.....	22
Capitolul 3. Cercetări experimentale ale sudării multistrat aplicat oțelurilor navale	31
3.1. Sudarea MIG-MAG în domeniul naval.....	33
3.2. Studiu de caz: Sudarea MIG-MAG a oțelului naval A36	36
3.2.1. Material de bază	36
3.2.2. Materiale de adaos.....	37

3.2.3. Tehnologia de sudare a oțelului naval A36 prin procedeul MIG-MAG	38
3.2.4. Îmbinări sudate din oțel naval A36	40
3.3.5. Încercări nedistructive ale îmbinărilor sudate din oțel A36	41
Concluzii	43
BIBLIOGRAFIE	45

Capitolul 1. Stadiul actual al modelării proceselor de sudare

1.1. Introducere

Sudarea reprezintă unul dintre cele mai complexe procese de fabricație, din punct de vedere al numărului de parametri de intrare și ieșire. Sudarea a fost aplicată în fabricarea structurilor, în domenii industriale convenționale dar și în aplicații high-tech din ingineria nucleară, industria aerospațială și maritimă. În comparație cu alte metode mecanice de îmbinare, sudarea oferă unele avantaje semnificative, inclusiv o flexibilitate de proiectare, integritate structurală și moduri economice de lucru [47], [3]. Cu toate acestea însă, sudarea produce tensiuni semnificative în metalul depus și în regiunile apropiate sudurii care se formează ca efect al procesului de sudare (zona influențată termomecanic - ZIT) și care, la rândul lor, se combină între ele și produc forțe interne care cauzează îndoirea, răsucirea sau flambajul ansamblului sudat. Aceste deplasări sunt cunoscute sub denumirea de deformații apărute ca urmare a procesului de sudare [12]. În ciuda celor prezentate mai sus, este pe deplin cunoscut faptul că sudarea reprezintă unul dintre cele mai importante procese de fabricație industriale iar în prezent, în lumea științifică, se derulează numeroase proiecte de cercetare, care duc în final la înlăturarea dezavantajelor produse de deformațiile apărute în urma procesului de sudare.

Ca o tehnică de fabricație utilizată pe scară largă, sudarea oferă o serie de provocări tehnice pentru comunitatea de practicieni din domeniu. În timpul sudării unei structuri metalice, gradientii termici rezultați în urma procesului au o magnitudine mare, rezultând tensiuni reziduale, care duc în final la deformarea structurilor sudate. Tensiunile și deformațiile apărute în urma procesului de sudare pot afecta, în mod semnificativ, performanța și fiabilitatea structurilor sudate [6]. Prin urmare, acestea trebuie să fie critic abordate în timpul fazelor de proiectare și de fabricație pentru a asigura exploatarea în bune condiții a structurilor sudate.

În ultimii ani, odată cu dezvoltarea facilităților de procesare și calcul numeric prin introducerea computerelor personale, au fost aplicate metodele de analiză cu element finit (MEF) pentru simularea comportamentului structurilor sudate, prin utilizarea pachetelor software comerciale cu element finit. Cu toate acestea, pentru uz general, metodele simplificate sunt mult mai utilizate decât metodele pas-cu-pas de analiză elasto-plastică.

Prima determinare analitică a consecințelor rezultate din procesul de sudare (tensiunile reziduale și deformațiile) s-a efectuat la mijlocul anilor 1940, iar prima contribuție

semnificativă a fost făcută în anul 1950, pentru cazul deformării structurilor sudate. Aceste rezultate analitice au condus, în final, la modelarea numerică a distribuției de căldură și a aspectelor structurale din procesele de sudare. În mod cert, analiza termo-mecanică la sudare este neliniară cauzată de interacțiunile multi-câmp și totodată variațiile proprietăților termo-mecanice ale materialelor cu temperatura. În ultimele trei decenii, analiza cu elemente finite a fenomenelor complexe din domeniul sudării a înregistrat o creștere considerabilă și s-au realizat cercetări multiple și complexe, concretizate prin numeroase articole și cărți publicate în literatura de specialitate.

Lucrările publicate în literatura de specialitate relevă cercetări importante și simulări pe calculator a proceselor de sudare, printr-o trecere sau prin mai multe treceri, în combinații cu una sau mai multe surse termice. Principalul obiectiv a fost simularea problemelor diferite care apar ca urmare a fenomenelor neliniare din timpul sudării.

Cele mai multe dintre consecințele nedorite din procesele de sudare sunt cauzate de fluxul de căldură neliniar, introdus de sursele termice în mișcare. Prin urmare, în acest capitol se prezintă evoluția în modelarea proceselor de sudare cu una sau mai multe surse termice.

În anii 1960-1970 cea mai mare parte a vizat activitatea de cercetare asupra comportamentului termo-fizic al materialelor în timpul procesului de sudare. Înainte de 1970 au existat doar câteva serii clasice de metode cu diferențe finite (DEF) pentru analiza neliniară a transferului de căldură la sudare. La sfârșitul anilor 1970 s-au depus nenumărate eforturi pentru dezvoltarea de coduri sursă, pe calculator, pentru analiza mecanismului complex de variație a fluxului de căldură din procesele de sudare. În anii trecuți, Lindgren a publicat o analiză detaliată în trei părți [17],[18],[19] care a studiat întregul fenomen de sudare, în complexitatea sa. Un alt studiu recent și cuprinzător a fost realizat de către Dr. Anas Yaghi și Adib Becker [46].

Obiectivul principal al acestui subcapitol este descrierea contribuțiilor majore ale cercetărilor în domeniu, în special la sudarea structurilor navale și a conductelor magistrale.

Primul pas spre simularea procesului de sudare a fost modelul sursei termice în mișcare, prezentat de Rosenthal [32], pentru soluția analitică a distribuției temperaturii la sudarea cu arc electric. În lucrarea sa, autorul a prezentat fluxul de căldură liniar bidimensional și tridimensional, în stare solidă, a corpurilor de dimensiune infinită. Autorul a validat modelul experimental, prin măsurarea temperaturilor din timpul sudării pe table cu diferite geometrii. Cercetări ulterioare au arătat că modelul lui Rosenthal a dat o bună aproximare a temperaturilor din zona îmbinării sudate cu toate că în imediata apropiere a sursei de căldură, câmpul de temperatură modelat a înregistrat valori foarte mari. Ulterior Rybicki [34] și Debicari [4] au dezvoltat noi modele pentru surse termice multiple, care au

dat o aproximare mai bună a distribuției temperaturii în zona tranzitorie. Mai târziu, cercetarea realizată de SEO, Yang și Jang [38] a utilizat sursa de căldură liniară pentru a modela aportul de căldură adus în timpul procesului de sudare de către arcul electric. Goldak [10] în lucrarea sa, a introdus o temperatură predefinită a unor locații specificate din îmbinarea sudată. Un model mai complex este modelul surselor de căldură cu distribuție Gaussiană dezvoltat de către Goldak [11],[8]. Acest model, cunoscut ca modelul elipsoidal al surselor termice, este pe departe cel mai larg utilizat la ora actuală în modelarea și simularea proceselor de sudare. De asemenea, în această lucrare, Goldak a realizat modelarea distribuției fluxului de căldură introdus în piese, cu unele ajustări semnificative și de care alți cercetători nu au ținut seama în modelele anterioare.

Alte modele pentru sursele termice, cum ar fi cele prezentate de către Sabapathy și al. [36] și Ravichandran și al. [31] sunt, de asemenea, utilizate în practică. Ueda și Yamakawa [42] și Hibbitt și Marçal pot fi considerați pionierii în aplicarea metodelor cu elemente finite pentru simularea proceselor de sudare. Mai târziu, Friedman [7], Rybicki și al. [34] Andersson [2] au arătat un deosebit interes în acest domeniu și au prezentat o lucrare de cercetare care clarifică metodologiile aplicate în simularea proceselor de sudare. Ei au prezentat metodologia de bază pentru tehnica de analiză secvențială cuplată. A fost pentru prima dată introdusă și utilizată dependența proprietăților de material cu temperatura și a fost utilizată căldura latentă asociată cu transformarea de fază lichid-solid a materialului. Rybicki [34] a simulat procesul de sudare pe circumferință a conductelor. Mai mult, el a folosit o soluție de analiză a fluxului de căldură, suprapus cu efectul a 28 de surse de căldură pentru a determina câmpul termic la sudarea conductelor. Friedman [7] și Andersson [2] au analizat sudarea cap la cap a tablelor și au dezvoltat jumătate de model pentru simularea proceselor termo-fizice la sudare. Acest lucru a micșorat timpul de procesare, astfel încât, mai departe, s-a utilizat cu succes această abordare și de către alți autori. Sub aspectul simulării numerice, s-a realizat un număr de experimente pentru evaluarea tehnicilor de modelare, s-au utilizat mai multe tipuri de rețea (mesh), tipuri de elemente, modelarea cu mai multe materiale de adaos, utilizând proceduri diferite de integrare numerică și tipuri de rezolvare a ecuațiilor. În mod similar, o multitudine de studii au fost dedicate modelării proceselor de sudare în care s-a ținut cont de efectele proprietăților materialelor în funcție de răspunsul termic și mecanic. În ceea ce privește eficiența și integritatea tehnicii de calcul cea mai semnificativă contribuție a realizat-o McDill și al. [25],[26],[24],[22], care a dezvoltat discretizarea adaptivă dinamică a elementelor modelului propus. A realizat, totodată, o discretizare automată mai fină a rețelei pentru zonele de interes, cum ar fi zona influențată termo-mecanic (ZIT) unde apar tensiuni și deformații mari. Acest sistem adaptiv, cu discretizare în funcție de gradientul de temperatură,

a redus substanțial costul computațional, prin scăderea numărului total de elemente din model și a timpului de procesare. Acest sistem adaptiv pentru re-discretizare a fost îmbunătățit, în continuare, de către Runnemalm [33],[23], Lindgren [16] și Hyun și Lindgren [14].

Cele mai semnificative contribuții în domeniul simulării proceselor de sudare înainte de 2001, sunt critic revizuite și discutate de către Lindgren L.E. într-o lucrare în trei părți, care face trimitere la [17],[18],[19]. Mai mult, contribuțiile înainte de 2004 au fost, de asemenea, discutate în [46]. Autorii au analizat în detaliu efectele diferiților parametri din proces și au propus recomandări pentru modelele viitoare.

Tensiunile reziduale sunt acele tensiuni care există într-un corp solid chiar dacă nu există sarcini externe sau încărcări aplicate. Cu alte cuvinte, tensiunile reziduale sunt acele tensiuni „înghețate” care apar la piesele prelucrate prin deformare plastică, în cazul în care deformația în stadiul plastic nu este uniform repartizată pe toată suprafața transversală a piesei. Atunci când se îndepărtează sarcina exterioară, zonele care au fost deformate plastic împiedică zonele alăturate deformate elastic să revină la forma inițială. Ca urmare, zonele deformate elastic rămân cu tensiuni reziduale de întindere, iar zonele care s-au deformat plastic trebuie să prezinte tensiuni reziduale de compresiune, pentru a se menține echilibrul de forțe pe secțiunea transversală.

În literatura de specialitate au fost utilizați diferiți termeni tehnici pentru tensiunile reziduale, cum ar fi: tensiuni interne, tensiuni inițiale, tensiuni inerente, tensiuni de reacție și tensiuni de blocare [21]. Structurile mecanice suferă modificări semnificative cauzate de tensiunile reziduale (în general nedorite), în timpul diferitelor faze ale exploatarei. În structurile din industrie, majoritatea tensiunilor reziduale sunt induse în timpul fazei de fabricație a acestora, inclusiv turnare și forjare, prelucrarea tablelor (forfecare, îndoire, de șlefuire, prelucrare, tăiere etc.) și, bineînțeles, la sudare.

Figura 1.1 prezintă tensiunile reziduale calculate longitudinal și transversal, în secțiunea unei plăci dreptunghiulare, sudura fiind localizată în partea centrală a acesteia. Datorită ciclurilor de încălzire și răcire și constrângerile din materialul de bază, tensiunile longitudinale sunt ridicate și dezvoltate în secțiunea centrală a plăcii. Se observă că odată cu creșterea distanței față de centrul plăcii, tensiunile longitudinale scad treptat. Pe direcție transversală, tensiunile longitudinale se transformă în tensiuni de compresiune, în timp ce de-a lungul direcției longitudinale, acestea tind către zero, pentru a se atinge starea de echilibru a tensiunilor reziduale. Similar, tensiunile transversale reziduale, cu diferențe minore, prezintă aceeași distribuție.

Deformațiile produse în urma procesului de sudare pot fi definite ca schimbarea în formă și dimensiune a unei structuri sudate. Interacțiunea metalului topit în curs de

solidificare cu metalul de bază se numește deformare, rezultatul fiind schimbarea în dimensiuni și formă a îmbinării sudate.

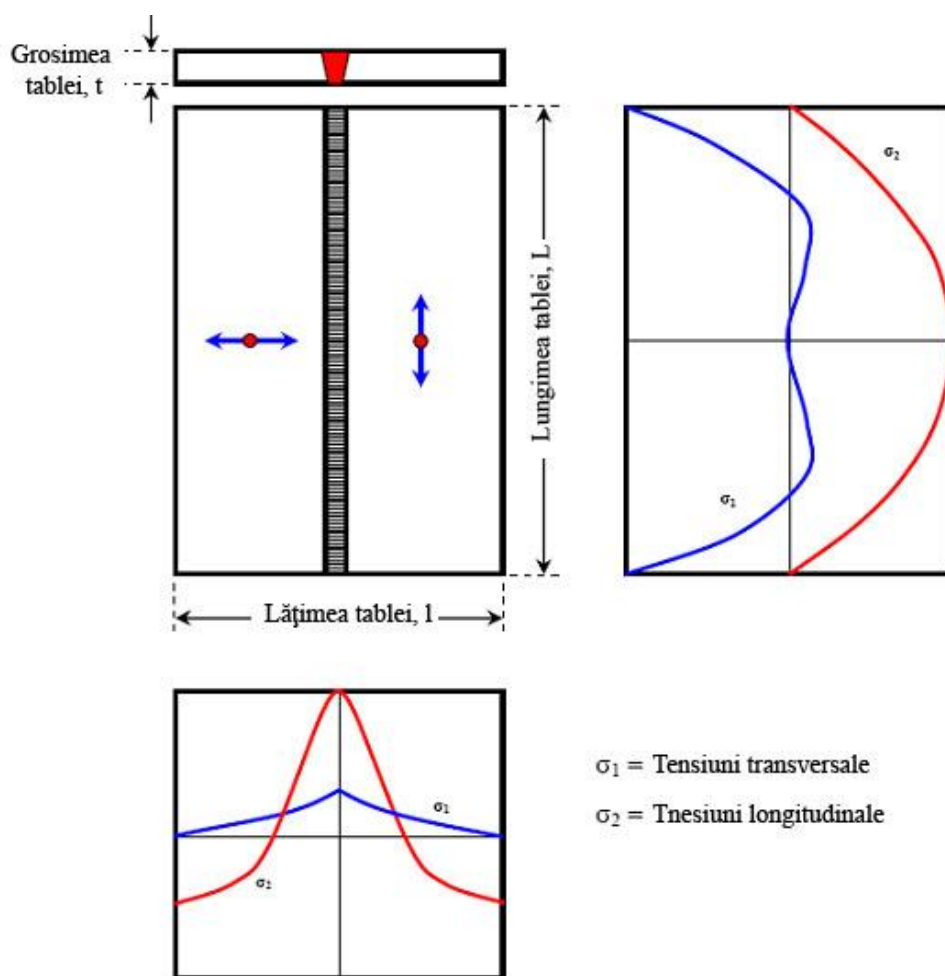


Fig. 1.1. Reprezentarea schematică a tensiunilor reziduale în placa dreptunghiulară sudată

Diferite tipuri de simulări ale deformărilor la sudarea tablelor din domeniul naval, prezentate în figura 1.1, sunt analizate și discutate în detaliu în [21]. Mai mult, în ultimii ani, mulți cercetători au prezentat mecanismul producerii deformărilor, precum și factorii care influențează diferitele tipuri de deformări la sudare într-o serie de lucrări de referință în domeniu [35],[5], [39],[13].

1.2. Noțiuni generale de câmp termic

Prin câmp termic se înțelege totalitatea valorilor temperaturii din interiorul unui domeniu (element sau zonă a unui element). În majoritatea cazurilor, domeniul analizat se referă la elementele de construcții cu rol de izolare termică (pereți exteriori, planșeu peste ultimul nivel, planșeu peste subsolul neîncălzit etc.), sau la anumite zone din cadrul acestor elemente (intersecții ale pereților, intersecții între pereți și planșee, zona perimetrală a golurilor de ferestre etc.). Deoarece un volum conține o infinitate de puncte, câmpul termic va

avea o infinitate de valori. Din punct de vedere practic este, însă, suficient dacă se cunosc temperaturile într-un număr finit de puncte caracteristice, ale căror poziții trebuie să fie suficient de apropiate, astfel încât calculul parametrilor termici derivați pe baza temperaturilor (de exemplu fluxul termic) să se înscrie în limite de precizie acceptabile.

În cazul cel mai general, temperatura dintr-un punct curent al unui câmp termic este o funcție continuă de patru variabile, primele trei fiind variabile geometrice (de poziție), iar cea de a patra fiind timpul[40]:

$$T = f(x, y, z, \tau) \quad (1)$$

În calcule, expresia (1) poate fi rescrisă sub diverse forme simplificate, conform tabelului 1.1, după cum se iau în considerare una, două, trei sau toate cele patru variabile.

Tabel 1.1. Tipuri de câmp termic

Câmp termic	Unidirecțional	Bidirecțional (plan)	Tridirecțional (spațial)
<u>Constant</u> (staționar sau permanent)	$T = f(x)$	$T = f(x, y)$	$T = f(x, y, z)$
<u>Variabil</u> (nestaționar sau tranzitoriu)	$T = f(x, \tau)$	$T = f(x, y, \tau)$	$T = f(x, y, z, \tau)$

Ca urmare, în raport cu timpul, câmpul termic poate fi:

- constant (staționar sau permanent) – dacă temperatura în toate punctele câmpului se consideră constantă în timp;
- variabil (nestaționar sau tranzitoriu) – dacă temperatura din fiecare punct este variabilă în timp.

În raport cu spațiul, câmpul termic poate fi:

- unidirecțional, atunci când propagarea căldurii are loc în mod preponderent pe o singură direcție;
- bidirecțional (plan), dacă propagarea căldurii are loc pe două direcții;
- tridirecțional (spațial), în situația în care propagarea căldurii are loc pe toate cele trei direcții în spațiu.

Deoarece elementele de construcții sunt corpuri tridimensionale, supuse unor condiții de temperatură schimbătoare, câmpul termic real este spațial și variabil.

Câmpul termic constant constituie o simplificare a câmpului real, acceptată din necesitatea diminuării volumului calculelor curente de proiectare și utilizată în cazul determinării anumitor mărimi termotehnice, cum este de exemplu rezistența termică. Pentru

aprecierea altor caracteristici ale elementelor de construcții, cum ar fi coeficientul de amortizare termică, coeficientul de defazare termică etc., abordarea sub o formă sau alta a câmpului termic variabil nu mai poate fi evitată.

Câmpul termic unidirecțional, caracterizat prin izoterme paralele între ele și normale pe direcția fluxului termic, este de asemenea o simplificare a câmpului termic real, admisă în zona curentă (centrală) a elementelor omogene (mai rar întâlnite în construcții), sau a elementelor alcătuite din straturi paralele cu suprafețele elementului.

Câmpul termic bidirecțional poate fi adoptat în cazul elementelor a căror secțiune transversală rămâne constantă pe lungimea acestora.

1.3. Analiza culpată termică-structurală

Conservarea energiei este un principiu fundamental în analiza transferului termic. Astfel, în teoria transferului termic se ține cont de energie și se neglijează tensiunile și deformațiile. Câmpul termic în îmbinarea sudată poate fi exprimat prin specificarea fluxului termic. Majoritatea modelelor termice din literatura de specialitate se bazează exclusiv fie pe introducerea fluxului termic, prin sursa de căldură Q sau prin alegerea unui domeniu la limita băii de sudare și exprimându-se astfel fluxul q . Acestea sunt exprimate ca funcții de timp și distanță. În literatura de specialitate se specifică faptul că principalele fenomene apărute în transferul termic sunt cele prezentate în figura 1.2.



Fig.1.2. Principalele fenomene de care trebuie ținut cont în analiza transferului termic

Tabel 1.2. Importanța condițiilor la limită și cuplarea analizei

Cuplare	Descriere	Importanță
1	Microstructura depinde semnificativ de temperatură	Mare
2a	Căldura latentă este legată de transformarea de fază	Medie
2b	Microstructura depinde de conductivitatea termică și căldura specifică	Medie
3a	Transformările de fază afectează tensiunile din domeniul plastic	Mare
3b	Dilatarea materialului depinde de microstructură	Mare
3c	Comportarea materialului în domeniul elasto-plastic depinde de microstructură	Mare
4	Transformările de fază sunt afectate de starea de tensiuni și deformații	Mică
5	Curgerea materialului este afectată de deformațiile structurale	Mică
6	Presiunea fluidului produce deformații	Mică
7	Fluxul depinde de temperatură	Mică
8	Fluxul termic produce transfer termic	Mare
9	Deformațiile apar datorită distribuției de temperatură	Mare
10	Căldura este generată datorită deformațiilor	Mică
11	Comportarea materialului este alterată de fluxul termic	Mică
12	Comportarea materialului afectează fluxul termic	Mică

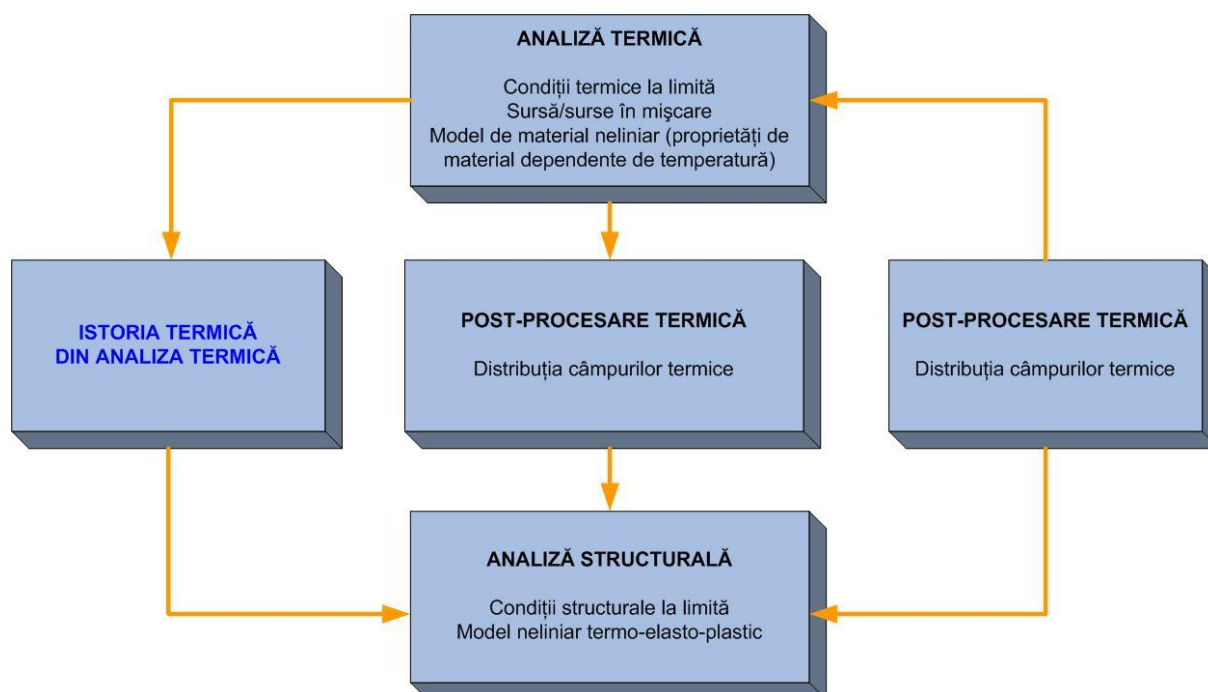


Fig. 1.3. Diagrama analizei termo-structurale cuplate

O simulare cuplată, termo-mecanică este împărțită în două simulări secvențiale. În primă fază se realizează o analiză tranzitorie termică neliniară pentru determinarea distribuției

câmpurilor termice și anume comportamentul temperaturilor nodale, urmată apoi de analiza structurală iterativă. O schemă a procedurii de simulare cuplate termo-mecanice este prezentată în figura 1.3.

În cazul analizei termice, temperatura nodală a elementelor la începutul analizei este egală la temperatura mediului ambiant iar constrângerile nodale sunt eliminate atunci când elementele intră secvențial sub influența sursei termice. Conform recomandărilor în domeniul de simulărilor proceselor de sudare din [1],[2],[29],[30],[31],[37],[41], pentru rezultate computaționale mai bune, sursa de căldură ar trebui să stea cel puțin o dată pe fiecare element de-a lungul îmbinării sudate. Acest lucru este realizat prin selectarea pașilor de timp din analiză, după cum arată ecuația 2.

$$Timp\ de\ încărcare = \frac{Timp\ total\ de\ sudare\ (s)}{Elemente\ de - a\ lungul\ imbinarii\ sudate} \quad (1.2)$$

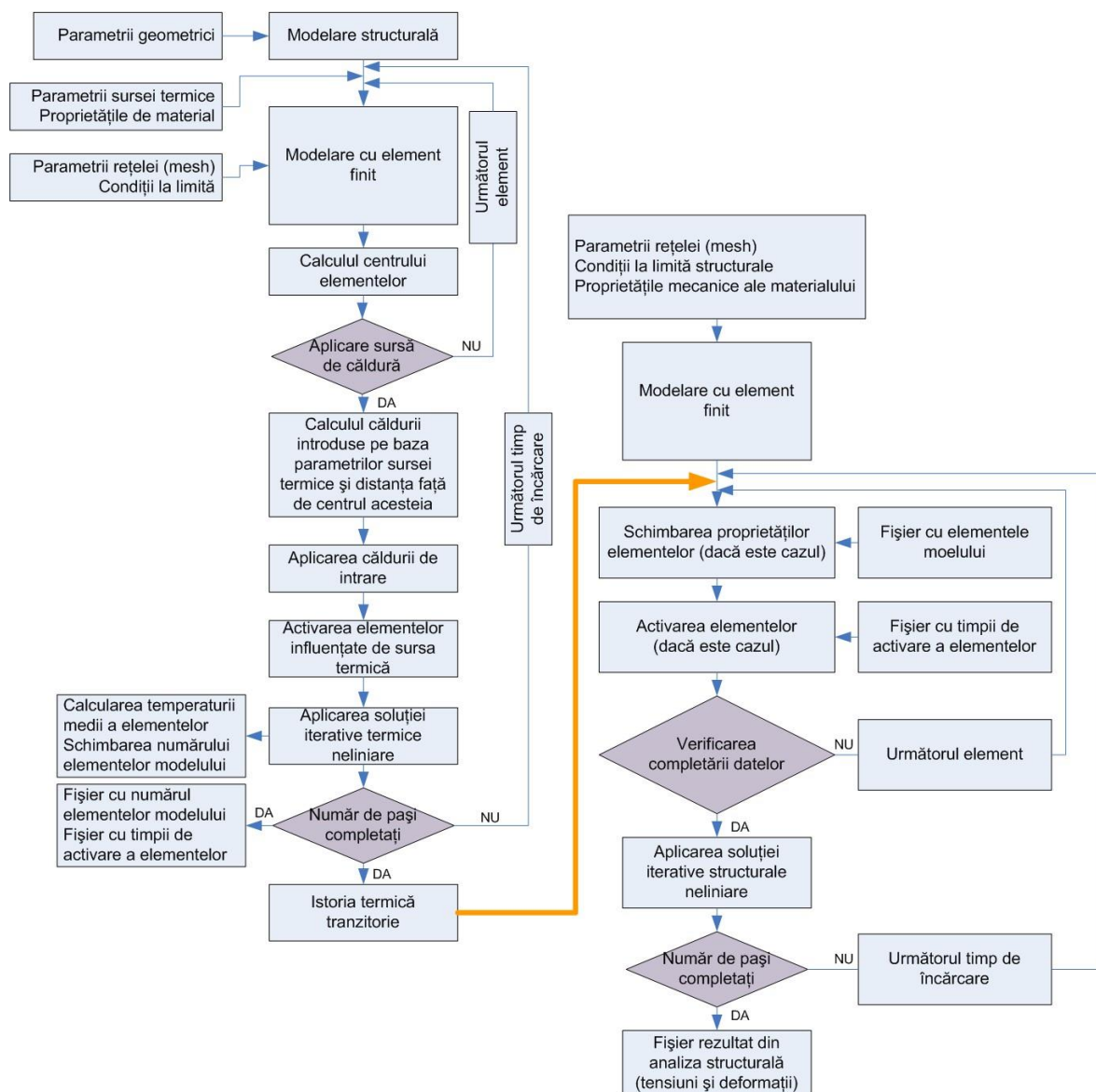


Fig. 1.4. Abordarea secvențială a analizei cuplate termo-structurale

În timpul încălzirii, timpul de încărcare este menținut constant iar sursa termică se deplasează cu viteza egală cu viteza de sudare în regim cvasistaționar. În faza de răcire sunt utilizați timpi de încărcare sunt diferiți. Timpii de încărcare cresc incremental pe măsură ce apare fenomenul de răcire, altfel spus se tinde spre temperatura inițială impusă în model (sau egală cu temperatura de preîncălzire, dacă aceasta există).

Detalierea abordării secvențiale cuplate în analiza termico-structurală este prezentată în figura 1.4. Se observă pașii modelării termice care respectă etapele de preprocesare, impunerea condițiilor la limită și postprocesare. Rezultatele analizei termice, respectiv ciclurile termice în fiecare punct nodal sunt considerate încărcări pentru analiza structurală. Aceasta se realizează utilizând condițiile impuse în analiza termică pentru material introducând totodată condițiile la limită specifice analizei structurale.

Capitolul 2. Modelarea utilizând elementele finite a procesului de sudare prin topire multistrat, în medii de gaze protectoare

Modelarea numerică cu elemente finite a fenomenelor de transfer termic constituie un proces complex, interdisciplinar, care se concretizează într-un sistem format din modelul geometric, modelul numeric cu elemente finite și programul sau pachetul de programe destinat rezolvării problemei. Domeniul continuu (elementul analizat) se descompune într-un număr finit de sub-elemente geometrice, numite elemente finite, cu aceleași proprietăți fizice ca ale corpului în ansamblu [40]. Aceste elemente se consideră interconectate în noduri, unde urmează să se determine soluția problemei: valorile temperaturilor.

Metoda elementelor finite nu necesită o rețea rectangulară. Elementele finite pot fi liniare (segmente de dreaptă), plane (triunghiuri sau patrulatere), spațiale (tetraedre, hexaedre etc.), de același tip sau de tipuri diferite în cadrul aceluiași domeniu de analiză [40]. Dimensiunile elementelor finite influențează direct convergența soluției, deci precizia rezultatelor obținute, tendința fiind de a se adopta elemente finite cu dimensiuni cât mai mici, mai cu seamă în zonele cu variații mari ale mărimilor caracteristice ale câmpului termic. Ca și în cazul metodei diferențelor finite, nodurile se poziționează ținând seama de discontinuitățile fizice și geometrice ale elementului.

2.1. Etape de calcul în modelarea cu elemente finite

2.1.1. Preprocesarea

Această fază presupune, principal, două etape:

- Crearea geometriei;
- discretizarea geometriei cu elemente finite;

Crearea geometriei. Modelarea geometriei, asemănătoare în principiu cu modul de lucru în AUTOCAD, include generarea de puncte, linii, curbe de diferite tipuri (inclusiv curbe spline), suprafețe dintre cele mai diverse (plane, conice, obținute prin translare de curbe etc.), volume simple (paralelipipedice, sferice, cilindrice) sau complexe (obținute prin combinarea volumelor simple și/sau cu ajutorul unor suprafețe de frontieră).

Discretizarea modelului. Prin discretizarea unei structuri se înțelege subîmpărțirea acesteia într-un număr oarecare de elemente finite sau rețea de puncte de integrare numerică, interconectate în nodurile lor exterioare. În cadrul acestei operații se aleg tipurile de elemente finite care vor fi utilizate și se stabilește repartitia lor pe domeniul discretizat, rezultând astfel numărul, dimensiunea și forma acestora [20].

La structurile care pot fi asimilate ca fiind alcătuite numai din bare, modelul de calcul ce rezultă în urma discretizării structurii asigură satisfacerea condițiilor de compatibilitate și de echilibru atât în interiorul fiecărui element cât și pentru întreaga structură; la structurile bi și tri dimensionale, modelul de calcul rezultat prin discretizare nu satisface condițiile menționate decât parțial.

Operațiile de discretizare sunt mult ușurate de posibilitățile numeroase și foarte variate de generare automată sau semiautomată a rețelei de discretizare, cu pași constanți sau variabili, atât pentru domeniile 2D cât și pentru cele 3D. Discretizarea se poate efectua direct, prin generarea elementelor finite fără utilizarea geometriei, dar acest procedeu nu se recomandă decât în cazul problemelor simple sau la corectarea unor zone de dimensiuni reduse. În mod uzual se utilizează elementele geometrice drept punct de pornire și suport pentru rețeaua de discretizare.

2.1.2. Introducerea condițiilor la limită

Aceasta opțiune cuprinde toate comenzile care definesc condițiile la limita aplicate atât elementelor finite ale rețelei cat și unor entități geometrice. Condițiile la limită vor include:

- deplasări fixate;
- temperaturi fixate;
- încărcări punctuale sau distribuite;
- flux de căldură, puterea surselor termice etc.

2.1.3. Analiză efectivă

Pot fi efectuate următoarele tipuri de analiză: analiză statică, analiză statică pentru optimizarea greutatei proprii a unei structuri, analiză dinamică modală (valori și vectori proprii), analiză spectrală, analiză dinamică tip „time history”, analiză neliniară de pierdere a stabilității (flambaj), analiză neliniară (calcul în domeniul plastic, calcul în stadiul de curgere

etc.), curgeri de fluide, analiză termică în regim staționar și nestaționar, combinații ale acestora (de exemplu analiză termo-elastică).

În privința calculului termic pot fi analizate: conducția 1D, 2D sau 3D; convecția liberă sau forțată; radiația în spații închise sau deschise. Se pot impune condiții la limită de orice tip, constante sau variabile în spațiu și/sau timp. De asemenea, pot fi utilizate materiale cu coeficientul λ variabil (funcție de temperatură sau umiditate). Domeniile modelate pot conține surse termice punctuale, liniare, de suprafață sau de volum, constante sau variabile în timp.

Modelele analizate pot fi omogene sau neomogene, compuse dintr-o diversitate de tipuri de materiale solide (izotrope, ortotrope 2D sau 3D, anizotrope 2D sau 3D, hiperelastice etc.) sau fluide (gaze, lichide). Pot fi utilizate de asemenea materiale cu proprietăți termo-optice speciale (în spectru infraroșu sau vizibil) sau materiale ce suferă schimbări de fază.

2.1.4. Postprocesarea

Pot fi vizualizate hărțile de deplasări, deformații, tensiuni, eforturi, temperaturi, viteze etc. De asemenea, se pot afișa diagramele de eforturi pentru elemente liniare (bare), starea de tensiuni sub formă vectorială, direcțiile tensiunilor principale, hărți ale diferitelor mărimi în secțiuni mobile, linii sau suprafețe de egală valoare pentru deplasări, tensiuni, temperaturi, flux termic etc. Valorile acestor mărimi pot fi listate în diverse formate, prestabilite sau definite de utilizator, în fișiere text, pentru întregul domeniu sau pentru porțiuni ale acestuia. Pot fi combinate rezultatele din diverse cazuri de încărcare, fiecare caz fiind afectat de un coeficient propriu, controlat de utilizator. În plus, se poate evalua precizia analizei, în raport cu fiecare tip de rezultat (de exemplu fluxul termic), pe baza a 6 criterii posibile: diferența dintre valorile extreme în nodurile unui element, diferența dintre valorile extreme în nodurile unui element și cea medie, diferențe normalizate (raportate la valoarea maximă pe întregul model) etc. Nu în ultimul rând, este de remarcat paleta extrem de bogată a mesajelor pe care programul le generează la sfârșitul unei rulări. Setul complex de verificări ce pot fi efectuate înainte și după rulare, precum și numeroasele mesaje finale, diminuează în mod semnificativ probabilitatea unor erori de modelare.

2.2. Cazul sursei termice mobile cu distribuție Gaussiană 3D

Goldak, Chakravarti și Bibby [11] au introdus noțiunea de sursă termică mobilă tridimensională, mult mai indicată în predicția temperaturilor din îmbinările sudate caracterizate prin valori mari ale pătrunderii, cum este cazul corpurilor semiinfinite sudate.

Inițial, Goldak [9] ș.a. au propus o sursă termică semielipsoidală cu o distribuție Gaussiană a fluxului termic ce poate fi calculat în orice punct de coordonate (x, y, z) cu relația [11]:

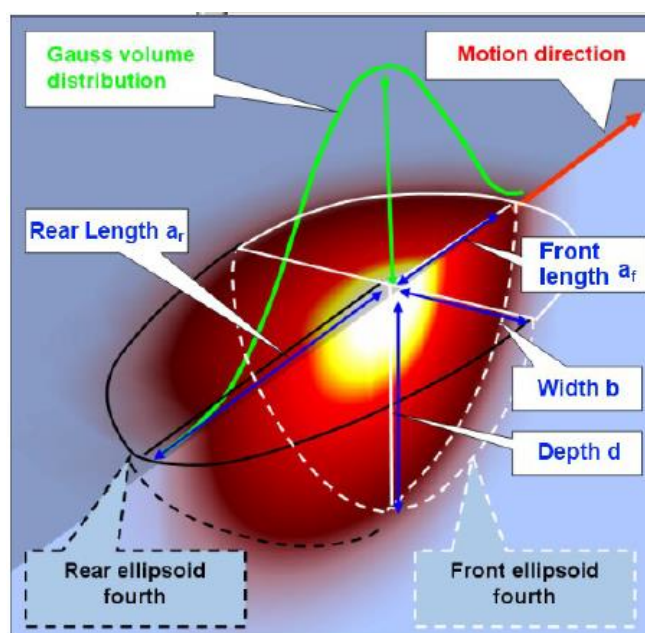


Fig. 2.1. Distribuția Gaussiană 3D a fluxului termic în cazul unei singure surse termice

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}\eta UI}{a_h b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{3x^2}{c_h^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right) \quad (2.1)$$

unde a_h , b_h , c_h sunt parametrii sursei termice elipsoidale prezentate în figura 2.1, $c_h = c_{hb} = c_h$ și x , y , z sunt coordonatele sursei termice mobile.

Pentru modelarea cu elemente finite am folosit modelul Goldak cu următorii parametri ai sursei termice.

Parametrii geometrici ai sursei termice	Parametrii cordon radacina	Parametrii cordon umplere	Parametrii cordon fata
$b = 3$	$I = 170 \text{ A};$	$I = 210 \text{ A};$	$I = 210 \text{ A};$
$d = 6\text{mm};$	$U_a = 24 \text{ V};$	$U_a = 26 \text{ V};$	$U_a = 26 \text{ V};$
$a_r = 7,5\text{mm};$	$V_s = 2.8\text{mm/s}$	$V_s = 5.6\text{mm/s}$	$V_s = 4\text{mm/s}$
$a_f = 2\text{mm};$	$n = 0.8;$	$n = 0.75;$	$n = 0.75;$

2.3. Caracteristicile termo-fizice ale materialului de bază

2.3.1. Căldura specifică

Este o mărime dependentă de natura corpului și reprezintă cantitatea de căldură necesară pentru a varia temperatura unității de masă din corp cu o unitate [27].

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2.2)$$

unde: c este căldura specifică în $\text{J/kg}^\circ\text{C}$, m - masa corpului în kg și ΔT - variația de temperatură în $^\circ\text{C}$. La materialele solide, căldurile specifice la volum constant (c_v) și la presiune constantă (c_p) sunt aproximativ egale, deoarece variațiile de volum sunt neglijabile la creșterea temperaturii cu un grad. La temperatura mediului ambiant, căldurile specifice ale materialelor solide nu depind de temperatură. Pentru cazul oțelului naval A36, variația căldurii specifice funcție de temperatură este prezentată în figura 2.2.

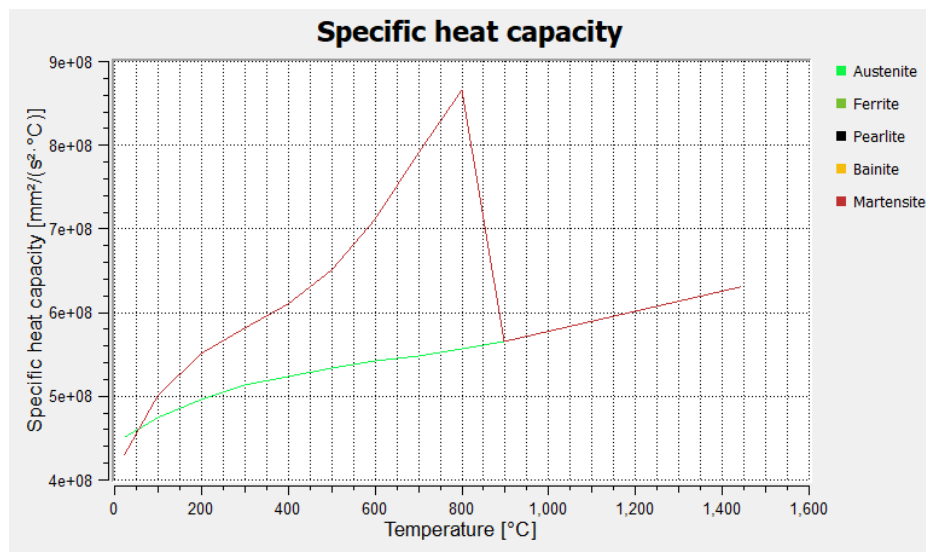


Fig. 2.2. Variația căldurii specifice cu temperatura pentru oțelul naval A36 [6],[28]

2.3.2. Dilatarea termică

Dilatarea termică este reprezentată prin coeficientul de dilatare termică liniară α care se exprimă prin următoarea relație [27]:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T} \quad ; \quad \Delta l = l - l_0 \quad (2.3)$$

în care: l este lungimea corpului la temperatura T , l_0 - lungimea corespunzătoare temperaturii T_0 , ΔT - variația temperaturii. Din relația 2.3 rezultă legea de variație a lungimii unui corp cu temperatura, numită legea dilatației liniare:

$$l = l_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (7.3)$$

În figura 7.3 se prezintă variația densității cu temperatura pentru oțelul naval A36.

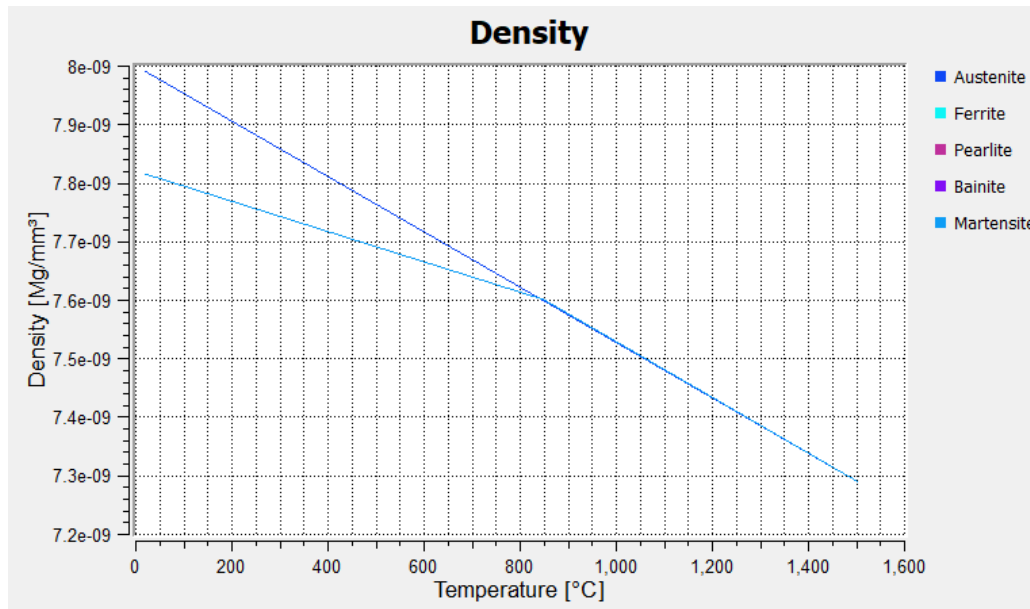


Fig. 7.3. Variația densității cu temperatura pentru oțelul naval A36 [6],[28]

2.3.3. Conductivitatea și difuzibilitatea termică

Conductivitatea termică este o caracteristică termofizică a fiecărui corp și este dependentă de structura corpului, densitate, umiditate și temperatură.

Din legea lui Fourier, se deduce că factorul de proporționalitate λ , numit conductivitate termică sau coeficient de conductibilitate termică, reprezintă căldura care se transmite în unitatea de timp, printr-o suprafață unitară, pentru o cădere de temperatură de un grad pe unitatea de lungime [27]:

$$\lambda = -q \frac{1}{|\text{grad}T|} = \frac{Q}{\Delta t \cdot \Delta T/l} \quad [\text{W/m} \cdot \text{K}] \quad (2.4)$$

Propagarea căldurii prin conducție este un fenomen difuziv, asigurat prin mecanisme complexe, cum ar fi contribuția electronilor și a ionilor, transferați de energie prin fotoni, prin câmp magnetic etc. La metale, contribuția electronilor este fundamentală, putându-se aproxima:

$$\lambda \approx \lambda_{el}$$

ceea ce arată o dependență între conducția termică și cea electrică.

Valorile mari ale coeficientului de conducție termică, caracterizează corpurile conducătoare de căldură, iar valorile mici caracterizează corpurile izolatoare din punct de vedere termic.

Temperatura influențează, în mod hotărâtor, valoarea coeficientului de conducție termică a solidelor. Legile de variație sunt liniare, parabolice (chiar exponențiale în cazul grafitului):

$$\lambda = a \pm b \cdot T \quad (2.5)$$

$$\lambda = a \pm b \cdot T + c \cdot T^2 \quad (2.6)$$

Variația lui λ cu temperatura este cauzată de creșterea volumului corpului, amplificarea mișcării particulelor elementare și de modificările rețelei cristaline a corpului.

Dacă se ține seama și de valoarea conductivității termice la 0°C, atunci dependența coeficientului de conducție termică de temperatură are forma:

$$\lambda = \lambda_0(1 \pm b \cdot T) \quad (2.7)$$

Pentru majoritatea metalelor conductivitatea termică scade odată cu creșterea temperaturii. Aliajele au coeficienți de conducție termică variabili care depind de natura și participațiile masice ale componentilor în amestec. Spre exemplu, la oțelurile aliate prezența Ni, V, W și Cr duce la scăderea valorii conductibilității termice, pe măsură ce participația acestor constituenți crește.

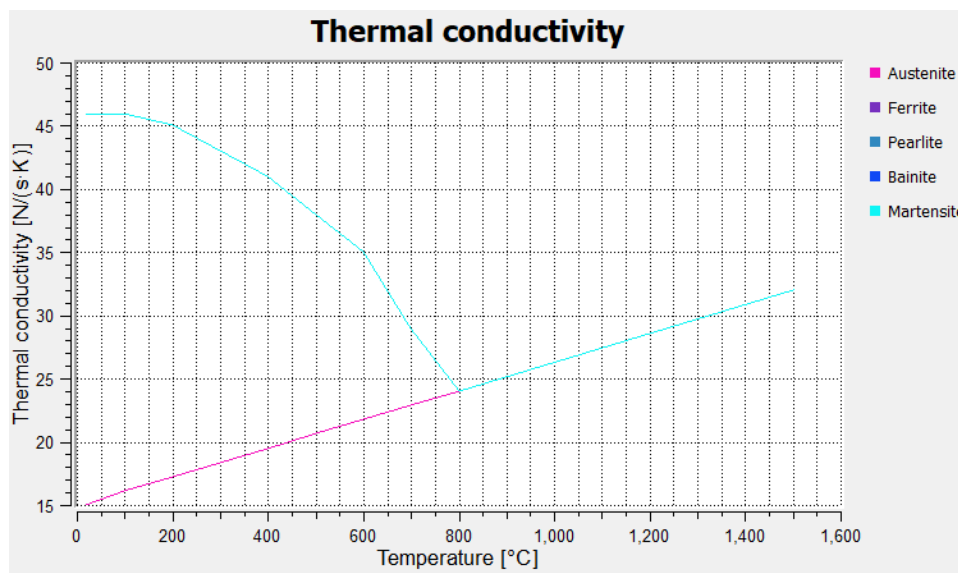


Fig. 2.4. Variația conductivității termice cu temperatura pentru oțelul naval A 36 [6],[28]

Difuzibilitatea termică este o altă caracteristică termofizică dependentă de conductibilitatea termică λ , căldura specifică c și densitatea materialului ρ . Ea se poate exprima prin relația[27]:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad (2.8)$$

Variația conductibilității cu temperatura pentru oțelul naval grad A se prezintă în figura 2.4.

2.4. Simularea procesului de sudare multiarc în SimufactWelding

Acest software este foarte complex în utilitatea lui dar intuitiv ca și utilizare. În prima fereastră de la deschiderea unui nou proiect putem alege tipul aplicației noastre și mediul în care se va desfășura procesul. În cazul de față vom avea o sudură cu arc electric, aplicată la o temperatură ambientală de 20° C. Sudura va fi realizată de un singur robot, iar ca și condiții de margine fiecare placă va fi fixată pe o masă de lucru, pe toate cele 3 direcții: x, y, z.

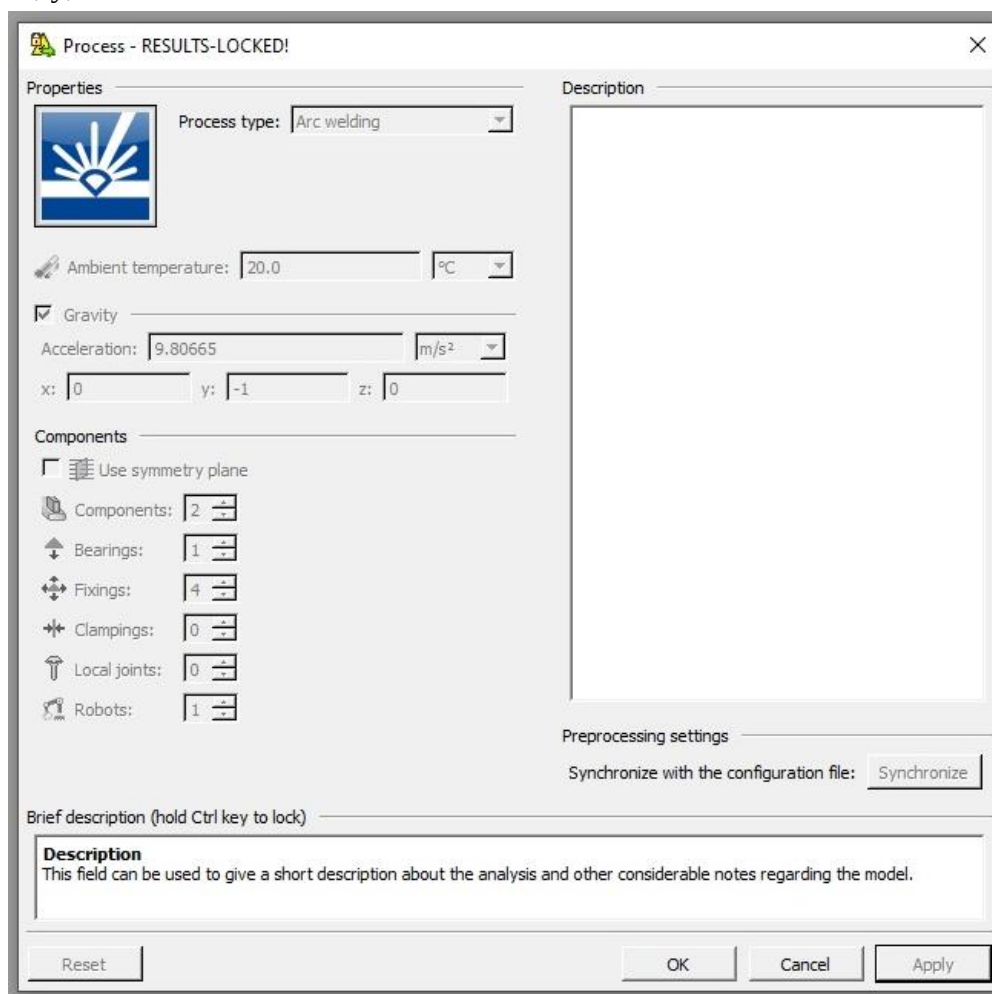


Fig. 2.5. Fereastră de start.

Dupa inceperea proiectului, se deschide imediat fereastra principala cu “Explorer-ul” unde gasim toate componentele simularii noastre FEM inainte de rulare, “Catalogul” cu toate datele de intrare precum modelele CAD, materiale sau seturi de puncte ce pot descrie traiectorii de sudare sau puncte de citire a temperaturii denumite “Tracking points”.

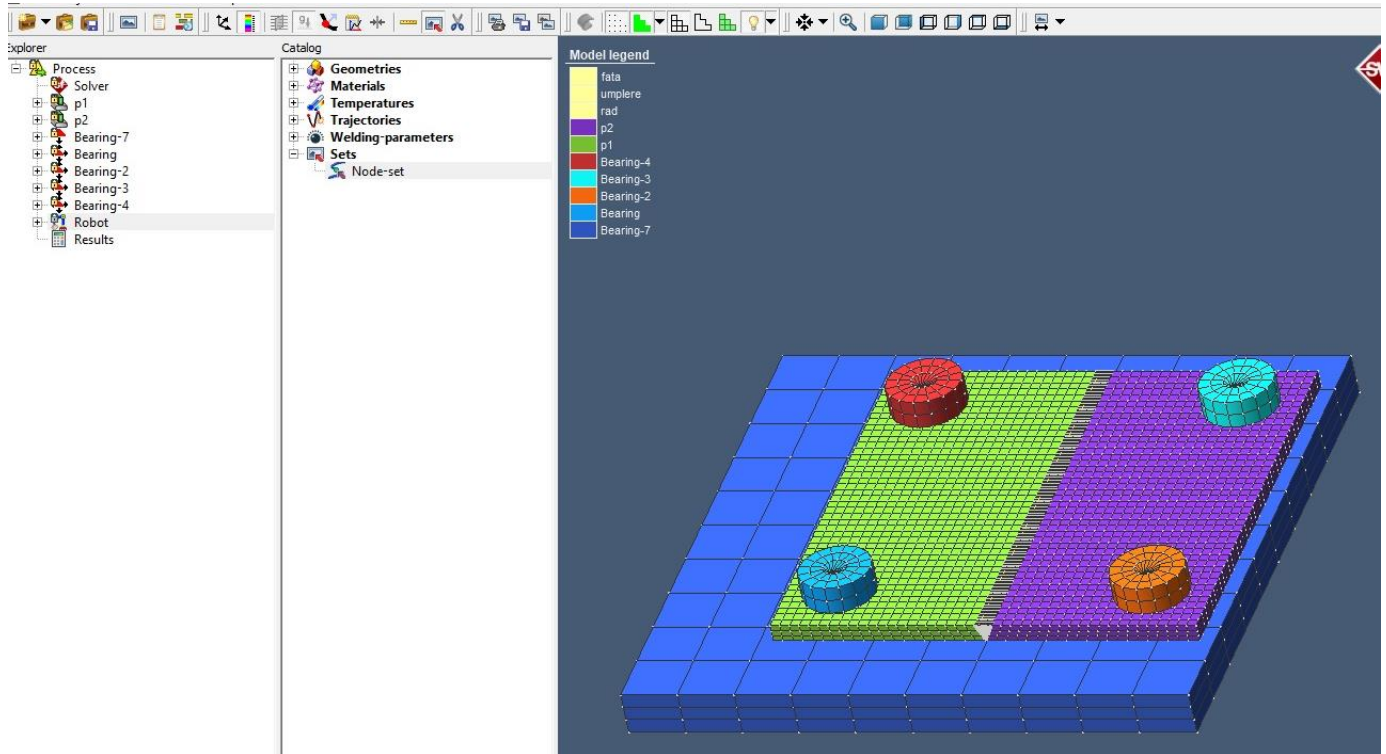


Fig. 2.6. Spatiul de lucru.

Ultima fereastră este reprezentată de zona de vizualizare unde se pot deschide multiple ferestre precum modelul 3d înainte de procesare și modelul 3d post-procesare.

Primul pas este să introducem în Catalog toate datele de intrare:

1. Modelul CAD.
2. Materialele folosite.
3. Traectoria de sudare a robotului
4. Parametrii de sudare.
5. Seturile de noduri Tracking Points.

1. Modelul CAD

Acesta a fost realizat în programul FEMAP, program compatibil cu editarea CAD a fișierelor Nastran folosite metoda elementelor finite. Modelul este format din două plăci de oțel de dimensiuni 300x150x12, fiecare având 3872 de noduri și 2709 elemente. Modelul pentru sudura însă are o discretizare mult mai fină acesta însumând prin cele 3 straturi de

sudura 59086 de noduri si 51256 de elemente finite. Aceasta discretizare fina este necesara pentru a obtine rezultate cat mai fidele.

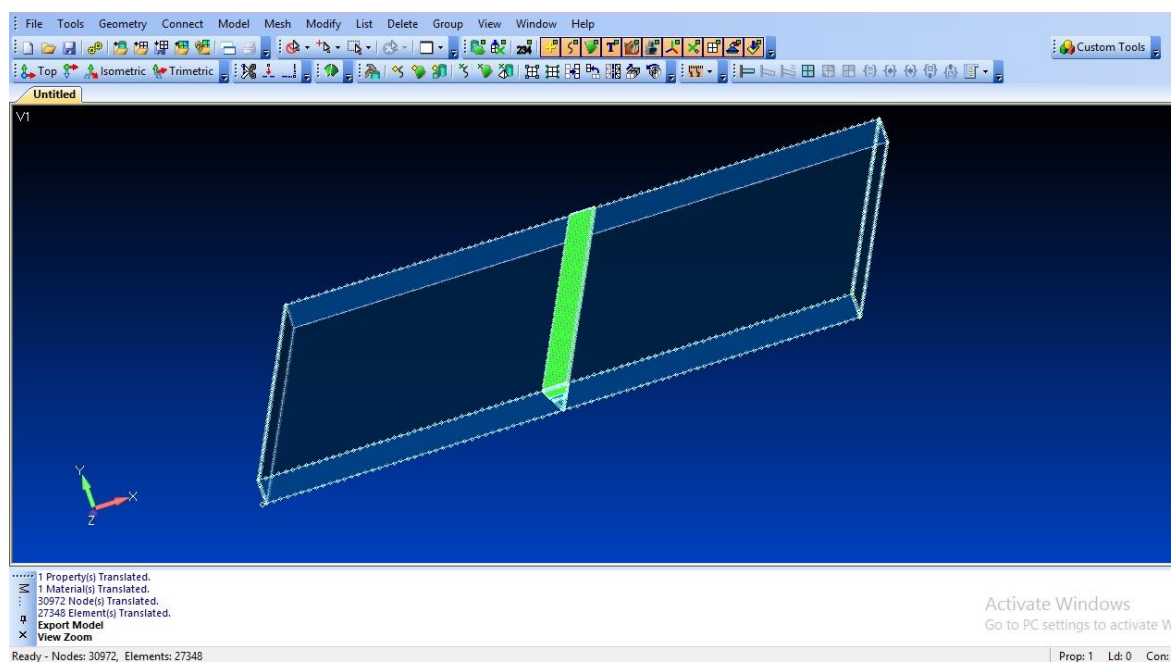


Fig. 2.7. Modelul CAD realizat in Femap.

2. Materiale

Deoarece intr-o solutie pentru o problema termica sunt implicate foarte multe variabile, multe din acestea tinand cont de materialele folosite, software-ul ofera o configurare foarte amanuntita a materialului de baza cat si a celui de adaos.

Printre aceste caracteristici se regasesc: Compozitia chimica, proprietatile termice, curba caracteristica a materialului, densitatea otelului, precum si altele.

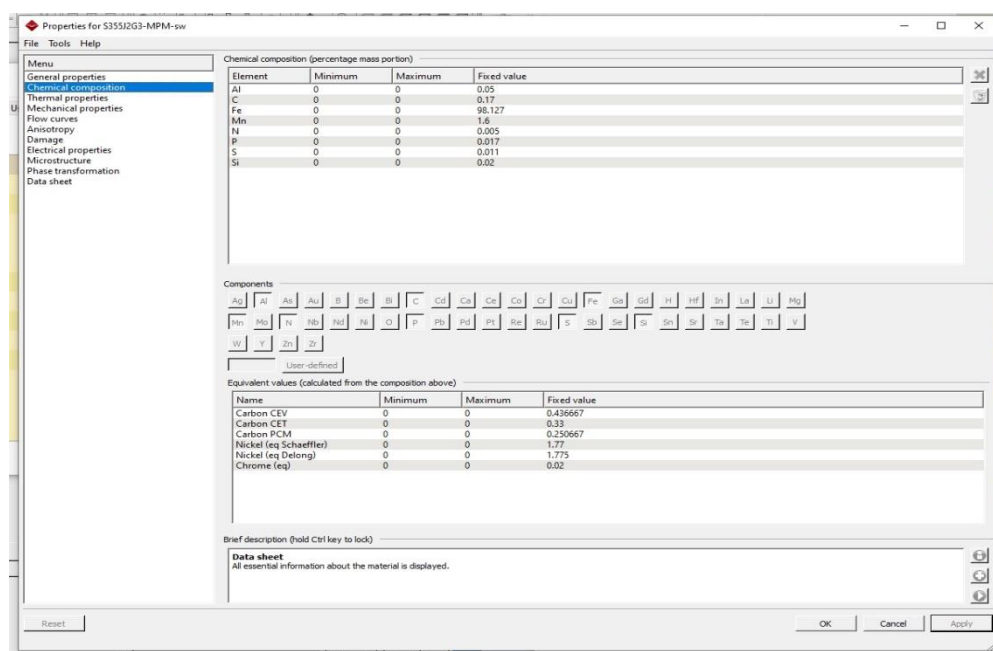


Fig. 2.8. Compozitia chimica.

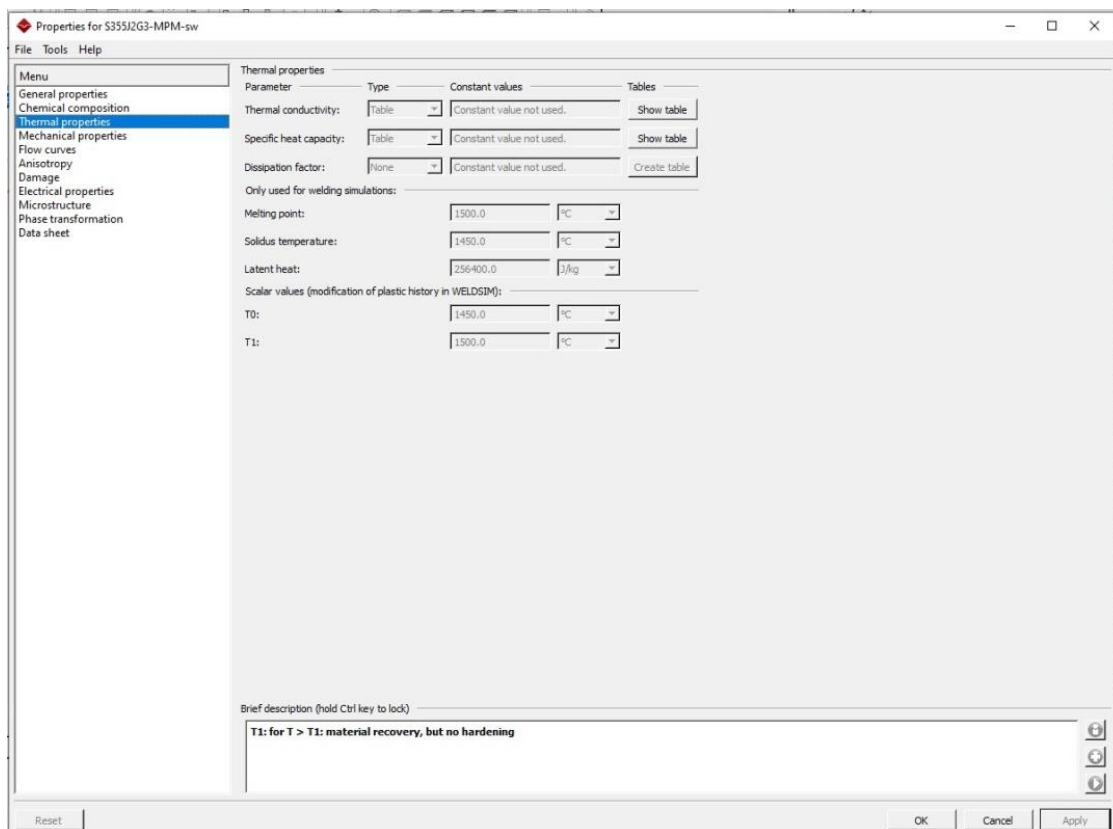


Fig.2.9. Proprietati termice.

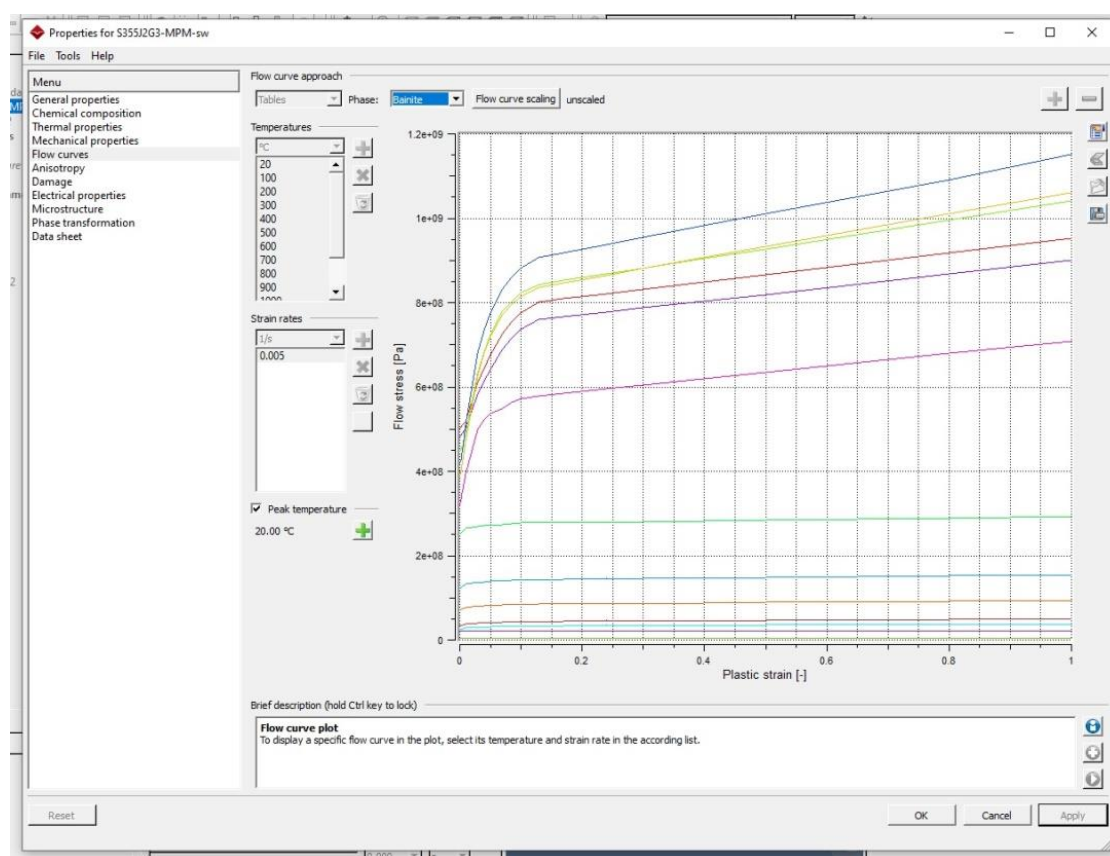


Fig. 2.10. Curba specifica.

3. Traectoria de sudare

Aceasta componenta descrie vectorul de sudare a robotului, iar pentru aplicatia noastra vom avea nevoie de trei vectori pentru trei cordoane de sudura. In figura de mai jos putem vedea coordonatele de start si finish a traiectoriei robotului.

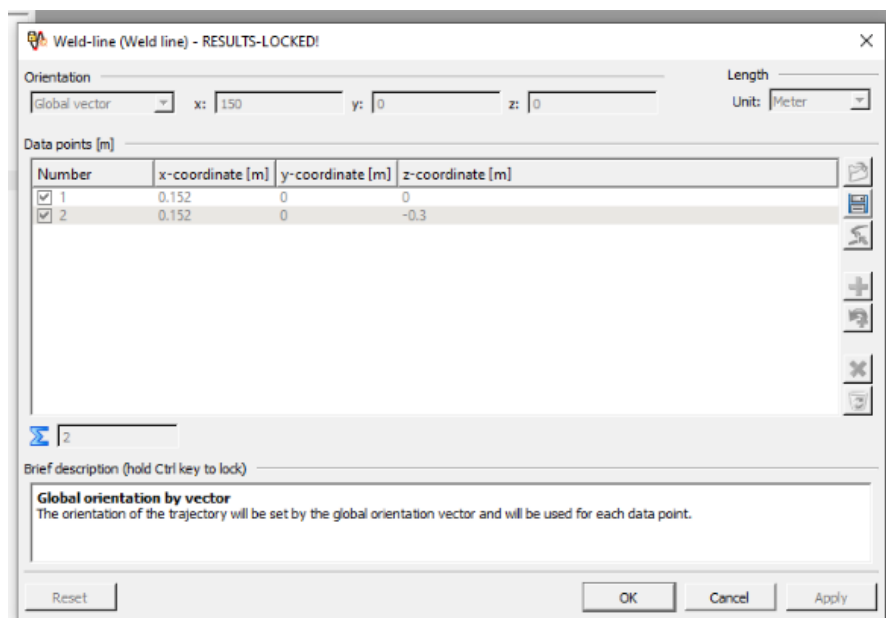


Fig. 2.11. Cordonatele vectorului de sudare

4. Parametri de sudare

Parametrii de sudare reprezinta toate variabilele necesare pentru a descrie procesul de sudare. In imaginea de mai jos putem observa toate variabilele precum: Intensitate, tensiune, viteza de sudare etc. Aceste date de intrare fac parte dintr-un WPS omologat pentru sudare multistrat in aplicatii precum sudarea puntilor de nava.

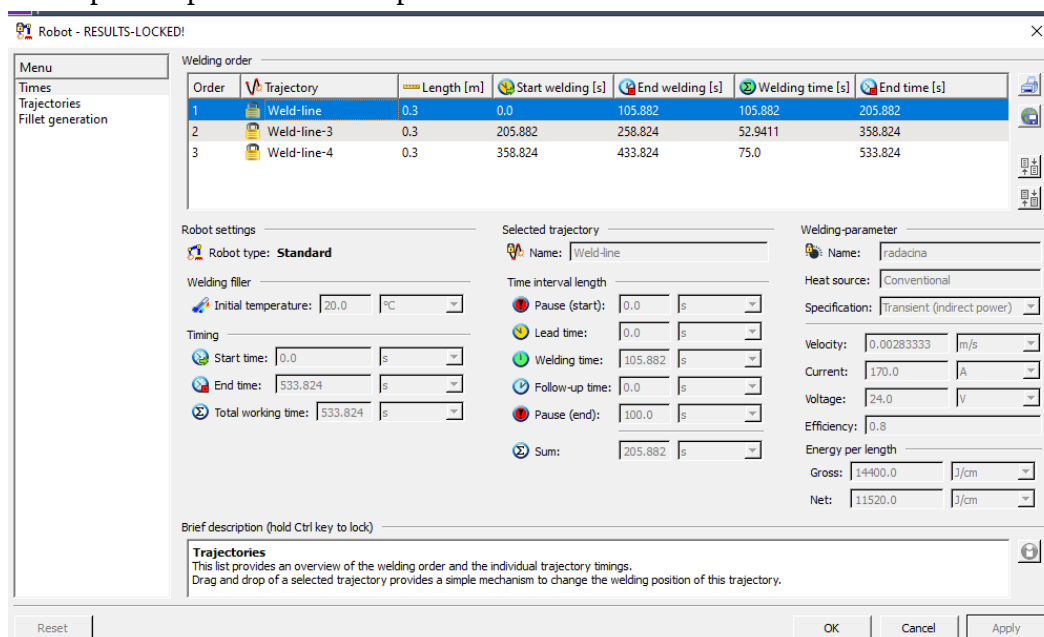


Fig. 2.12. Parametri de sudare.

5. Seturile de noduri “Tracking Points”.

Sunt nodurile ce fac parte din discretizare unde se vrea masurarea temperaturii pe toata durata procesului de sudare. Cu ajutorul acestor noduri putem afla ciclurile termice din cadrul acestei simulari.

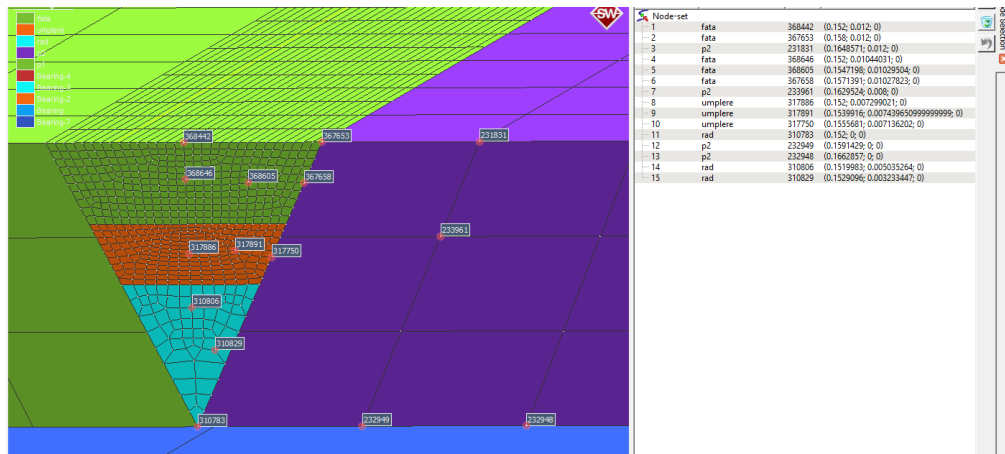


Fig. 2.13. Harta nodurilor de control a temperaturii.

Nodurile dupa cum se poate vedea in figura de mai jos au fost plasate strategic in mijlocul cordonului de sudura si la punctul de contact cu materialul de baza. Astfel putem afla daca s-a ajuns la temperatura de topire in punctele selectate, cat timp a durat racirea si ce diferenta de temperaturi avem intre straturi.

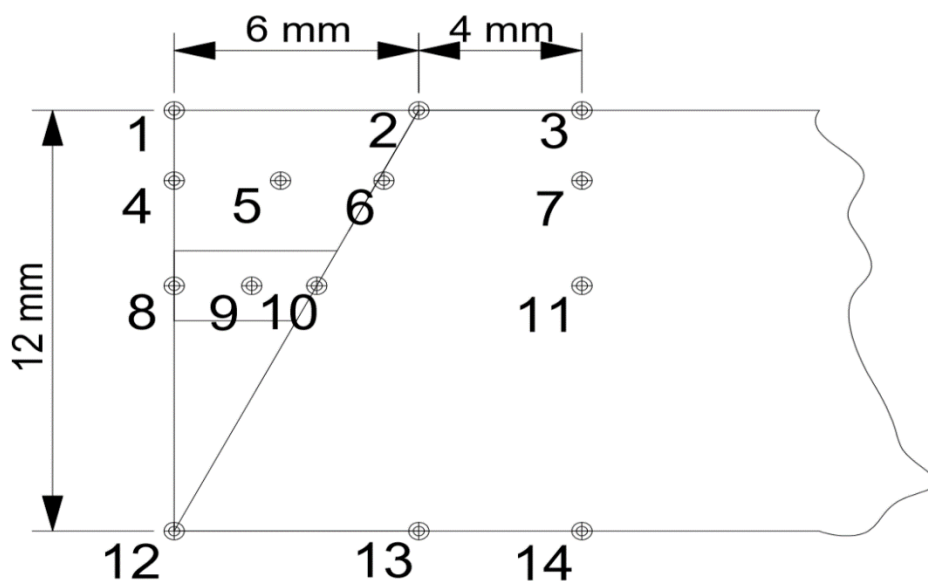


Fig. 2.14. Harta teoretica a punctelor de control.

Dupa stabilirea tuturor datelor de intrare ce fac parte din simulare putem da startul analizei propriu-zise. Post-procesarea software-ului permite vizualizarea in timp real a analizei in diferite stadii de procesare.

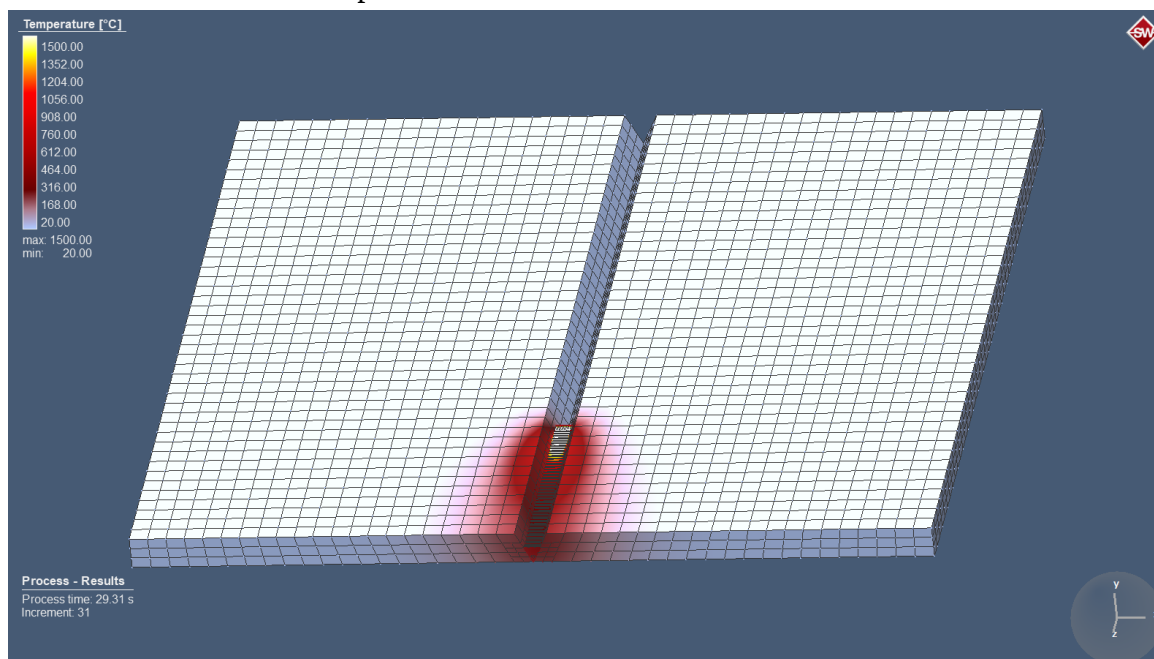


Fig. 2.15. Vizualizarea câmpului termic la $t = 29$ s, din timpul procesului de sudare

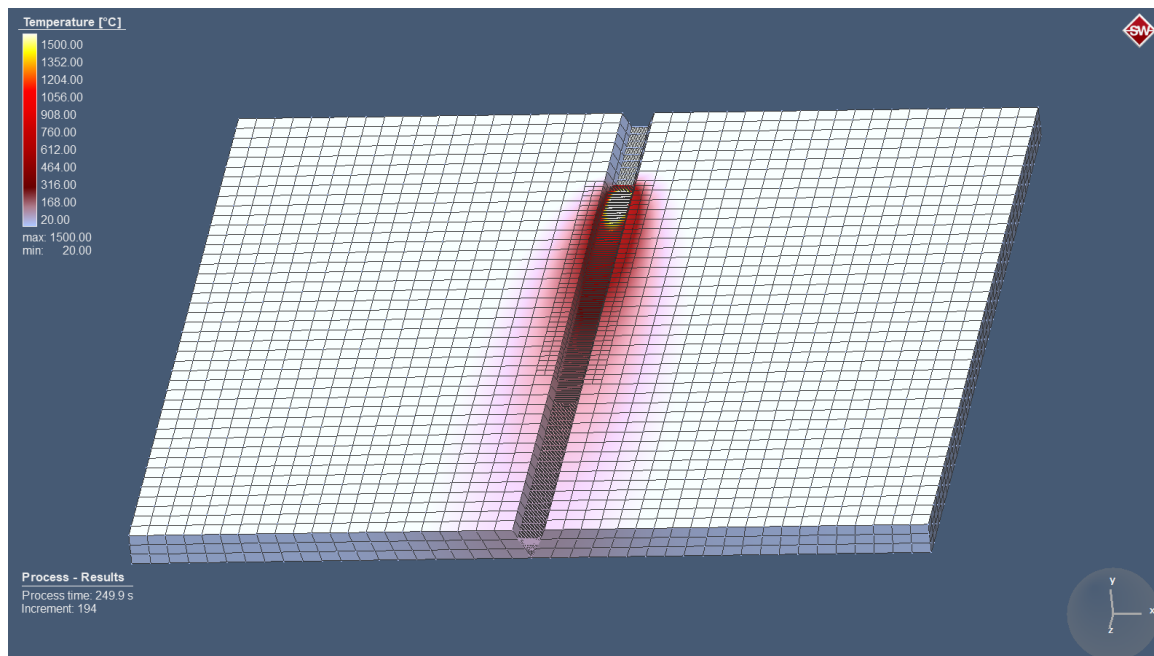


Fig. 2.16. Vizualizarea câmpului termic la $t = 249$ s, din timpul procesului de sudare

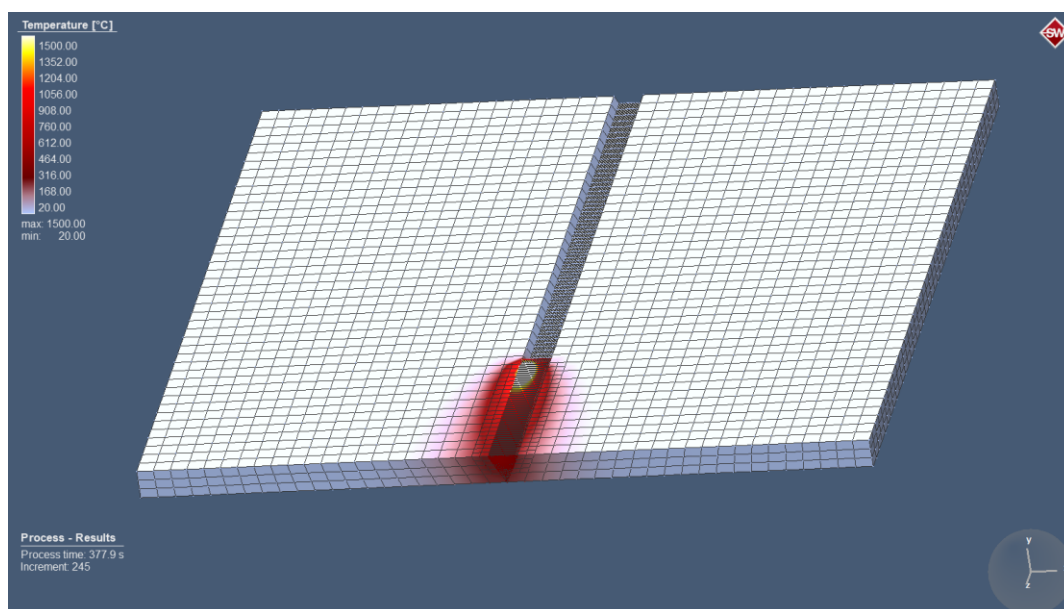


Fig. 2.17. Vizualizarea câmpului termic la $t = 378$ s, din timpul procesului de sudare

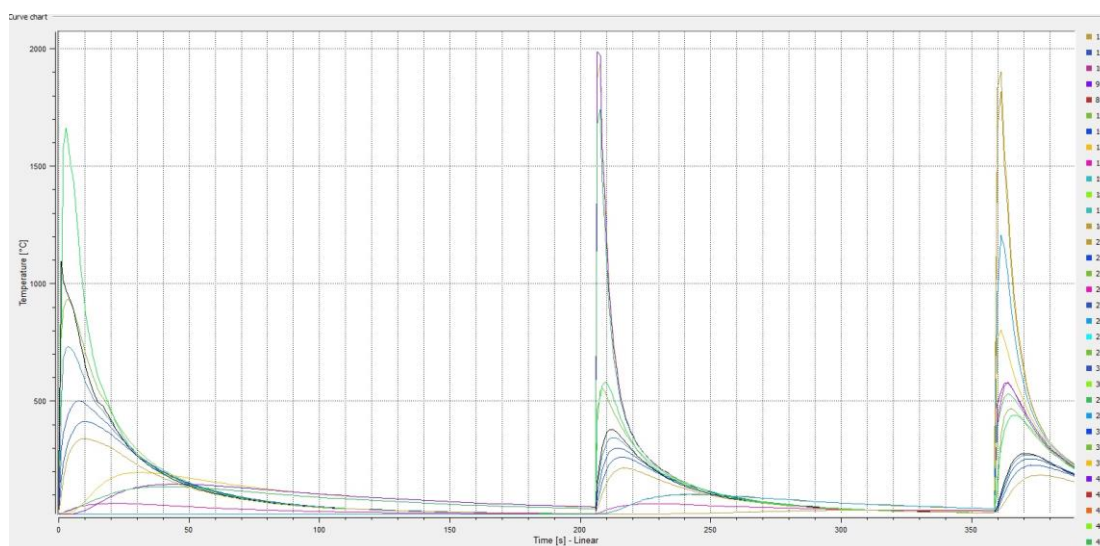


Fig. 2.18. Vizualizarea câmpului termic a tuturor punctelor de control

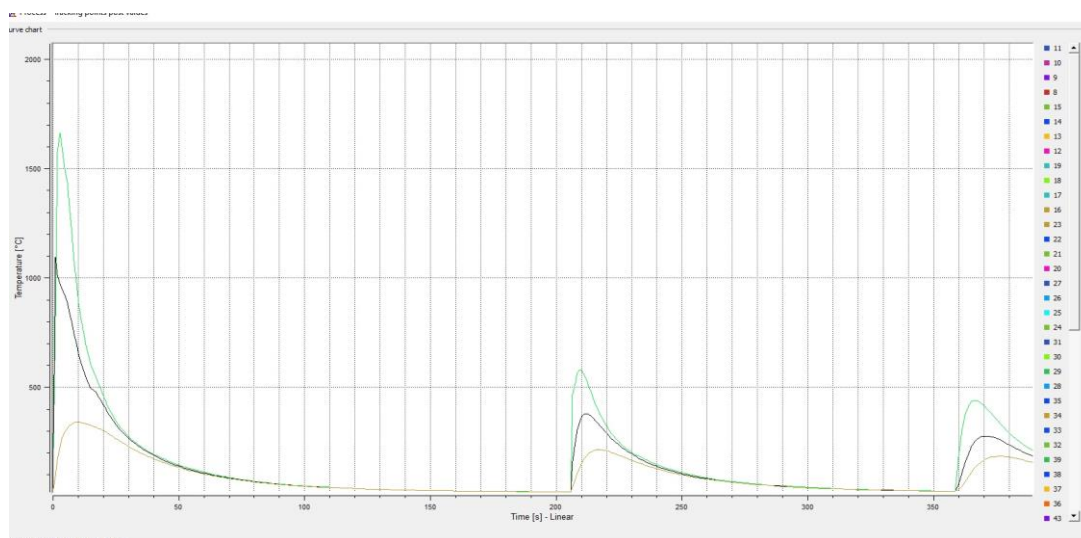


Fig. 2.19. Vizualizarea câmpului termic a punctelor 12,13,14.

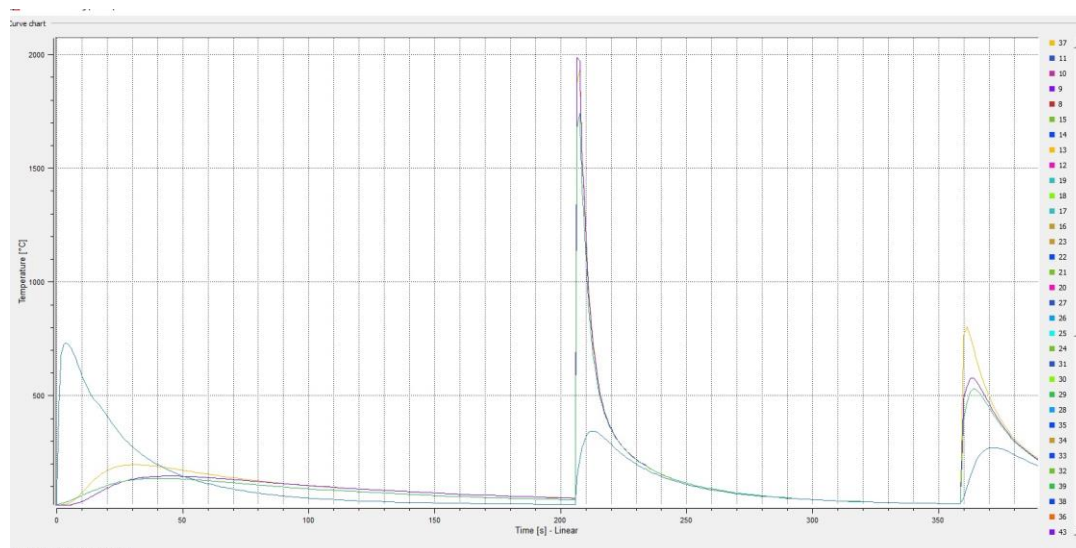


Fig. 2.20. Vizualizarea câmpului termic a punctelor 8,9,10,11.

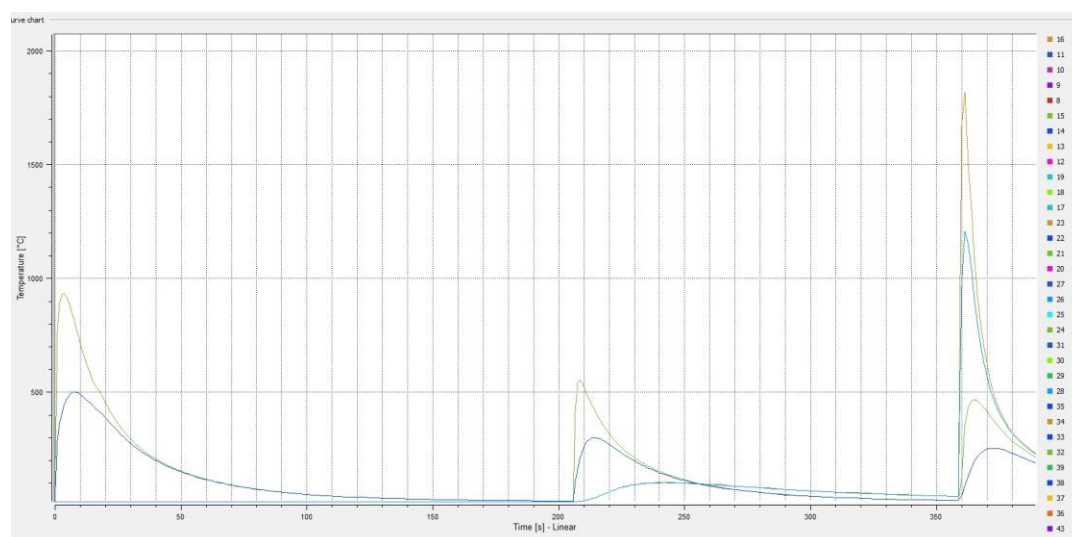


Fig. 2.21. Vizualizarea câmpului termic a punctelor 4,5,6,7.

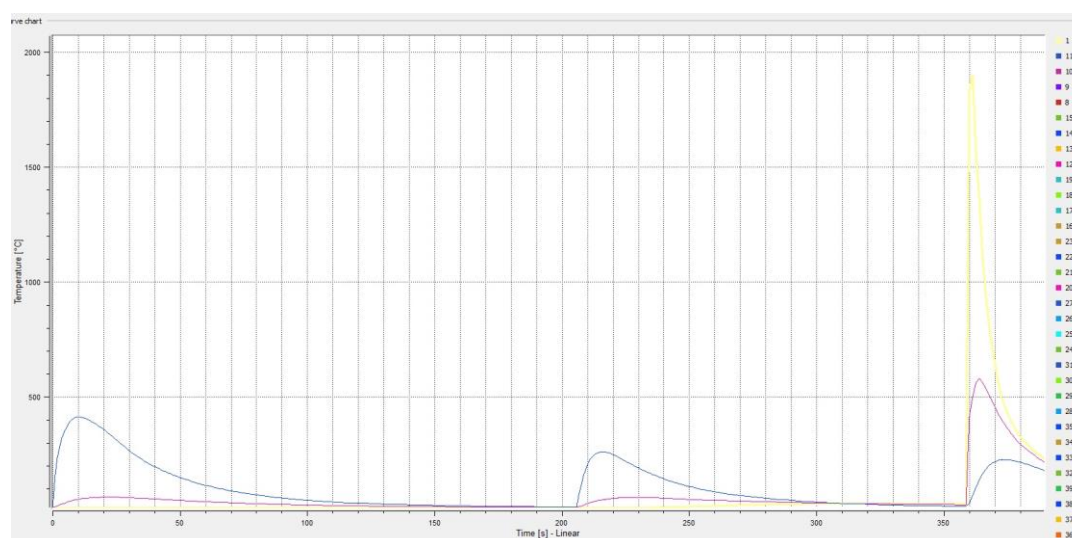


Fig. 2.22. Vizualizarea câmpului termic a punctelor 1,2,3.

Capitolul 3. Cercetări experimentale ale sudării multistrat aplicat oțelurilor navale

Sudarea este una dintre cele mai importante operațiuni în construcția navelor. Dacă sudurile eșuează, de cele mai multe ori întreaga structură eșuează. Din fericire, peste 60 de ani de cercetare și dezvoltare în domeniul sudării au oferit constructorilor de nave curente procese de producție care sunt ușor automatizate, pot produce suduri consecvente și pot suda secțiuni groase printr-o singură trecere cu deformații minime. O calitate bună a sudurii se poate obține cu ușurință în zilele de astăzi, însă o calitate consecventă, în practică, se obține respectând regulile societății de clasificare, omologarea procedurilor de sudare, certificarea sudării și monitorizarea și controlul sudurilor. Pentru a stabili un raport economic cât mai profitabil este necesară găsirea rapidă a unor soluții tehnologice cât mai potrivite pentru a se plia pe problemele șantierului în cauză. Condițiile și materialele folosite reflectă fiabilitatea soluțiilor găsite pentru nevoile din asamblarea și sudarea structurilor în cauză.

Flux tehnologic în construcțiile navale

1. Intrarea tablei sablate în producție
2. Tăierea și sudarea tablelor și a profilelor.
 - a. Producția preasamblajelor
 - b. Producția osaturii compuse
 - c. Producția de panouri
 - d. Linia de panouri
 - e. Îmbinarea cap la cap a tablelor de punte cu sudură sub strat de flux. consumabile:
 - SAW Sudura sub strat de flux pe o singură parte
 - OERLIKON FMI process: *OP 122/A105, FC 35.25-2D, 3D, 4D*
 - Multi wire welding: *OP 122/OE-S2Mo, OP 192/OE-SD3 1Ni 1/4 Mo, OP 121TT/FLUXOCORD 31HD*
 - Backing flux: *OP 10U*
3. Elemente de rigidizare
 - a. Sudură orizontală de colț
 - Submerged arc: *OP 191, OP181/ OE-S2, tandem, twin, tandem/twin*
 - MAG flux cored wire: *FLUXOFIL19HD*

4. Asamblarea elementelor verticale**a. Sudură orizontală, verticală, peste cap de colț**

- MIG/MAG flux cored wires: *FLUXOFIL 19HD, 19 HD, 20HD, 21HD, FLUXOFIL 31 (root pass on KERALINE ceramic backing), CITOFLUX R00C, CITOFLUX R00*
- Submerged arc: *OP 191, OP 181/OE-S2*

5. Asamblarea blocsecțiilor – toate pozițiile de sudare

- MIG/MAG flux cored wires: *FLUXOFIL 19HD, 19 HD, 20HD, 21HD, FLUXOFIL 31 (Sudura pe suport ceramic), CITOFLUX R00C, CITOFLUX R00*
- Submerged arc: *OP 180S, OP 139, OP 192 / OE-S2 & OE-S2Mo, OP 191, OP 181/OE-S2*
- MMA: *SPEZIAL, SUPERCITO 7018S, TENAX 35S*

6. Doc uscat – montajul blocsecțiilor - toate pozițiile de sudare, atât cap la cap, cât și de colț

- MIG/MAG flux cored wires: *FLUXOFIL 19HD, 19 HD, 20HD, 21HD, FLUXOFIL 31 (root pass on KERALINE ceramic backing), CITOFLUX R00C, CITOFLUX R00*
- Submerged arc: *OP 180S, OP 139, OP 192 / OE-S2 & OE-S2Mo, OP 191, OP 181/OE-S2*
- MMA: *SPEZIAL, SUPERCITO 7018S, TENAX 35S*

7. Montajul elementelor de tubulatură – tancuri, cazane, țevi, conectori, țevi cu flanșe

- MIG/MAG metal cored wires: *FLUXOFIL M8, M10 & CITOFLUX M00*
- MIG/MAG solid wires: *CARBOFIL 1 & CARBOFIL 1^a*

8. Outfittings – inox

- Flux cored wires: *FLUXINOX*
- MIG: *INERTFIL, INERTROD*
- MMA: *SUPRANOX, BASINOX*



Fig. 3.1. Flux tehnologic

3.1. Sudarea MIG-MAG în domeniul naval

3.1.1. Generalități

MIG – Metal Inert Gas, se aplică doar la sudarea aluminiului și inox cu sârmă plină.

MAG – Metal Active Gas, se aplică la sudarea oțelului carbon cu sârmă plină sau tubulară și la sudarea inoxului cu sârmă tubulară.

Sudarea este operația tehnologică prin care se realizează o asamblare nedemontabilă a două sau mai multe piese metalice, utilizând încălzirea locală, presiunea sau ambele, cu sau fără folosirea unui material de adaos similar cu metalul pieselor de îmbinat.

Sudura are ca rezultat o zonă de îmbinare care întărește zona în cauză. Materialul de adaos depus prin sudare se numește cordon de sudură. Acesta poate fi continuu sau întrerupt. Piesele de sudat se prelucrează în zona unde urmează să se depună materialul de adaos, pentru o mai bună îmbinare între materialul de bază și cel de adaos.

3.1.2. Principiul procedurii

Sudarea cu gaz de protecție, sau cu CO_2 cum se numește adesea, este un procedeu care utilizează căldura unui arc electric stabilit între un fir alimentat la continuu și piesa de prelucrat. În timpul acestui proces sârma se va topi și metalul de adaos va fi transferat pe piesa de prelucrat. În figura 3.2.

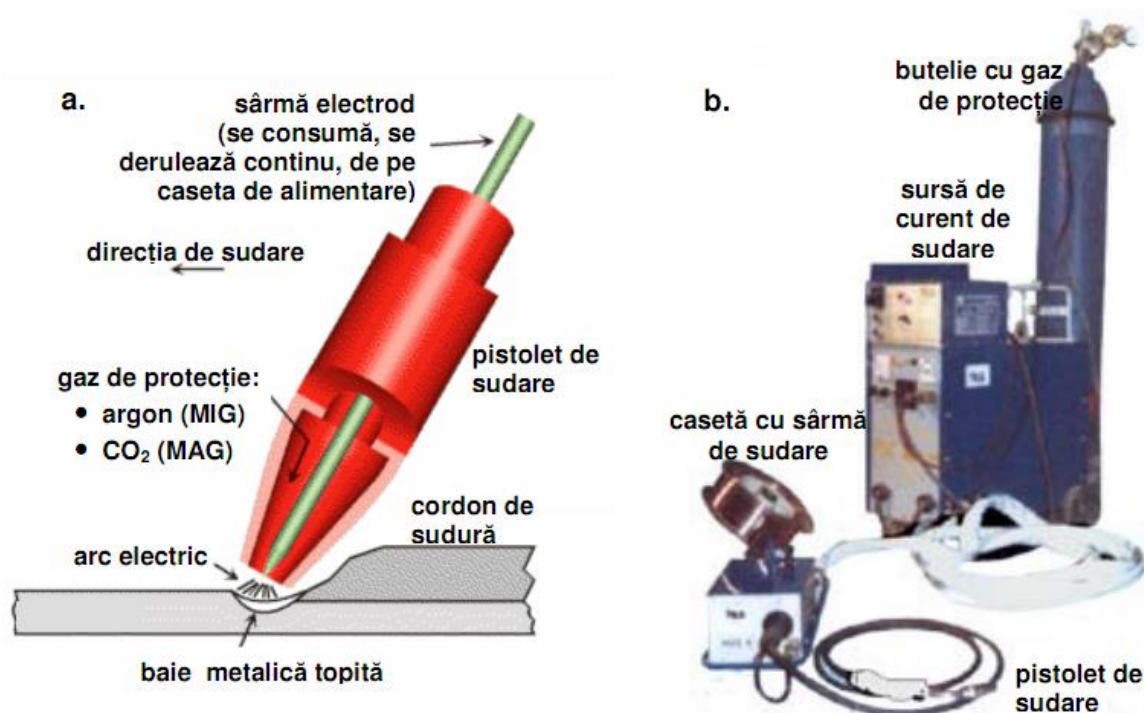


Fig. 3.2. Principiul sudării în mediu de gaze protectoare

Baia de sudură este întotdeauna protejată de gaz pentru a proteja atât materialul de adaos cât și baia de sudură de oxigenul și azotul din aer. Dacă aceste gaze intră în atmosfera gazului de protecție, pot provoca porozități în sudură. Fig 3.3. La procedeul de sudură MIG – MAG este recomandat a se folosi curentul continuu cu polaritatea inversată (polul “-“ pe tabla de sudat) pentru o pătrundere mai bună și un transfer mai calitativ al picăturilor pe materialul de bază. Sudarea cu polaritatea pe “-” la sârmă are o pătrundere mai mică lucru

care se recomandă pentru îmbinarea tablelor mai subțiri. Este important să se țină cont și de recomandările producătorului.

3.1.3. Gaze de protecție

Pentru sudarea MIG se folosesc gazele inerte Argon și Helium. Pentru sudarea MAG se folosesc gaze active: CO₂ sau amestecuri de Ar + CO₂.

Avantajele sudării cu amestec de gaze față de sudarea doar cu CO₂.

- Viteze de depunere a cordoanelor de sudură mai rapide.
- Formarea fumului, stropilor și zgurei este mai redusă.
- Caracteristici mecanice superioare.
- Funcționare stabilă și la curenți mari și la curenți mici.
- Sudura este protejată împotriva oxidării.
- Procedura poate fi folosită în orice poziție de lucru.

3.1.4. Sârme pentru sudare

Sudarea cu sârmă tubulară reprezintă o variantă modernă a procedeului de sudare în mediu protector de gaze MIG-MAG. Sârma plină folosită în mod tradițional la acest procedeu de sudare este înlocuită de sârma tubulară care conține în interior elemente cu diferite roluri în procesul de sudare: protector, dezoxidant, de aliere, zgurifiant, etc.

Sârmele pline sunt sârme trefilate din oțel carbon, slab aliat, înalt aliat etc.

Sârme tubulare la care mantaua metalică se topește și se depune.

a) sârme tubulare cu flux, care pot fi:

- Sârme tubulare rutilice cu un procentaj mare de elemente de aliere care facilitează ionizarea, asigură un arc stabil și un transfer fin de picături. Punctul ridicat de topire al zgurii permite sudarea în toate pozițiile.
- Sârme tubulare bazice unde transferul de material de adaos este de tip globular. Zgura are un punct de topire scăzut, făcând dificilă sudarea la poziție.

b) sârme tubulare cu pulberi metalice - acest tip de sârmă permite obținerea unei rate de depunere mari datorită prezenței unei importante cantități de elemente metalice în pulberea metalică.

3.1.5. Avantajele sudarii în mediu de gaz protectoare

- Se pretează la sudarea atât a aliajelor feroase cât și a celor neferoase.
- Asigură o mare productivitate datorită densității mari de curent (rată depunere mai mare) și a eliminării sau reducerii unor operațiuni auxiliare - îndepărtarea zgurii, schimbarea electrodului.
- Permite obținerea unor îmbinări de foarte bună calitate.
- Deformațiile sunt mai reduse (energie liniară mai mică).
- Preț de cost mai redus.
- Emisie de fum mai mică.
- Ușor de automatizat

3.2. Studiu de caz: Sudarea MIG-MAG a oțelului naval A36

3.2.1. Material de bază

Pentru determinările experimentale făcute în acest proiect de cercetare se va folosi o marcă de oțel foarte utilizată în industria navală împreună cu tehnologia de sudare Mig-Mag, și anume oțel A36 cu grosime de 12 mm și dimensiuni de 300 mm x 70 mm. Compoziția chimică a materialului de bază este prezentată în tabelul 2.1 iar în tabelul 2.2 sunt prezentate caracteristicile mecanice.

Tabel 3.1. Compoziția chimică a oțelului naval A36

Marca de oțel	Compoziția chimică, %													
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Nb	N	Ti	V
Oțel naval A36	0.18	0.5	1.35	0.03	0.035	0.02	0.08	0.08	0.015	0.35	0.03	0.009	0.02	0.05
Cev = 0.38%														

Tabel 3.2. Caracteristicile mecanice a oțelului naval A36

Marca de oțel	Re, N/mm ²	Rm, N/mm ²	A %
Oțel naval A36	355	490	21

2.2.2. Materiale de adaos

Materialele de adaos utilizate au fost:

- sârmă tubulară de 1,2 mm tip FLUXOFIL 19 HD, fig. 3.3.
- gaz de protecție: CO₂.



Fig. 3.3. Sârmă tubulară de 1,2 mm tip FLUXOFIL 19 HD

În tabelele 3.3 și 3.4 se prezintă compoziția chimică și caracteristicile mecanice ale materialului de adaos.

Tabel 3.3. Compoziția chimică a metalului de adaos

Material de adaos		Compoziția chimică [%]					
		C	Si	Mn	P	S	Cu
Sârmă tubulară	Fluxofil 19 HD	0.05	0.5	1.2	-	-	-

Tabel 3.4. Caracteristicile mecanice ale materialului de adaos

Material de adas		R_e [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	E% 5d	KV [J pt -20°C]
Sârmă tubulară	Fluxofil HD	≥ 460	550-650	≥ 22	≥ 80

3.2.3. Tehnologia de sudare a oțelului naval A36 prin procedeul MIG-MAG

Pentru sudarea celor două table din care se vor tăia probele s-a folosit o sursă de sudare Kemppi Fastmig M420 (fig. 3.4), cu un derulator Kemppi Fastmig MXF65 (fig. 3.5), pistolul Kemppi PMT52W (fig. 3.6) și sârmă Oerlikon, tubulară de 1,2 mm tip Fluxofil 19 HD.



Fig. 3.4. Sursa și derulator Kemppi FastMIG



Fig. 3.5. Pistolet Kemppi

Conform instrucțiunilor de sudare (WPS 1) proba a fost sudată folosind 5 straturi. Toate straturile au fost sudate cu procedeul MAG 136. Stratul de rădăcina a fost sudat pe suport ceramic (fig. 3.6), iar celelalte straturi au fost dispuse ca în schița din WPS 1 (fig. 3.8).

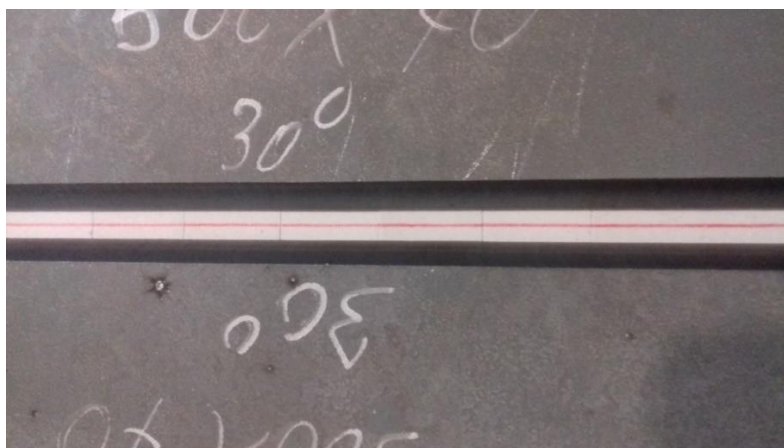
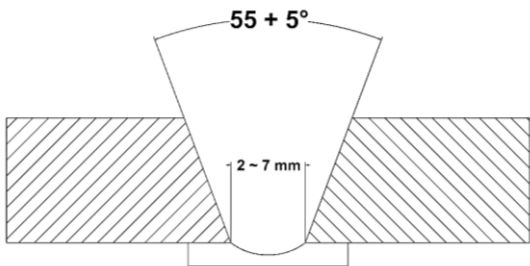
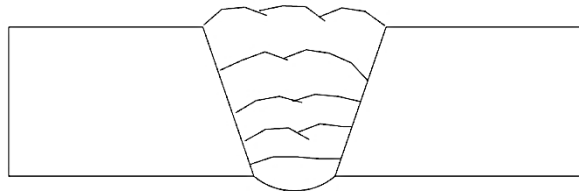


Fig. 3.6. Suport ceramic



Fig. 3.7. Al doilea strat

WPS 1

Tipul îmbinării				BW/ P			
Pregătire sudură				Debitare oxi-gaz/plasmă și polizare			
Material de bază				A ~ E36			
Grosime material				7,5 ~ 30 mm			
Poziție de sudare				PA – PF / Sudur[pe o parte			
Proces de sudură				MAG			
Schema de pregătire a îmbinării				Succesiunea operațiilor de sudare			
							
Detalii de sudare							
Run	Procedeu	Diametru [mm]	Intensitate [A]	Tensiune	Polaritate	Viteză de sudare [mm/min]	Energie de sudare [K/mm]
Rădăcină	MAG	1,2mm	180~190	24~25	DC +	100~140	1.5~2.3
Umplere	MAG	1,2mm	210~250	24~26	DC +	165~220	1.15~1.82
Față	MAG	1,2mm	200~220	24~26	DC +	180~300	0.7~1.47
Clasificare Material de Adaos și marcă de fabricație				Sârmă tubulară cu miez rutilic		Fluxofil 19HD	
				AWS: A5-20 E71 T-1			
Debit gaz de protecție				18~ 25 l/min			
Detalii scobire/Suport rădăcină				Suport ceramic			

Temperatură preîncălzire	Minim 20°C dacă afară temperatura este sub 0°C
Temperatură între rânduri	Maxim 250°
Pendularea(lățime maximă rând)	1.5 *t, max 14mm (t=grosimea tablei)
Distanță duză contact/ Piesa	15~ 20 mm
Unghi înclinare cap sudare	70~ 85°
Gaz de protecție	100% CO2 , C1

3.2.4. Îmbinări sudate din oțel naval A36

În figurile 3.8 și 3.9 se pot vedea rezultatele experimentelor realizate pe oțelul naval A36 cu grosimea probelor de 12 mm supuse procesului de sudare prin topire prin procedeul MIG-MAG.



Fig. 3.8. Vedere perpendiculară pe cordon



Fig. 3.9. Vedere transversală

3.3.5. Încercări nedistructive ale îmbinărilor sudate din oțel A36

Proba sudata P1.1 a fost supusa controlul nedistructiv ultrasonic si radiografic.

Principiul controlului nedistructiv ultrasonic

Testarea nedistructivă cu ultrasunete, cunoscută și sub denumirea de NDT cu ultrasunete sau pur UT, este o metodă de caracterizare a grosimii sau structurii interne a unei piese prin utilizarea undelor sonore de înaltă frecvență. Frecvențele sau distanțele utilizate pentru testarea cu ultrasunete sunt de multe ori mai mari decât limita de auz uman, cel mai frecvent în intervalul de la 500 KHz la 20 MHz.

În aplicațiile industriale, testarea cu ultrasunete este utilizată pe scară largă pe metale, materiale plastice, compozite și ceramică. În cadrul șantierelor navale, materialele supuse controlului NDT cu ultrasunete, sunt otelurile navale A ~ E36.

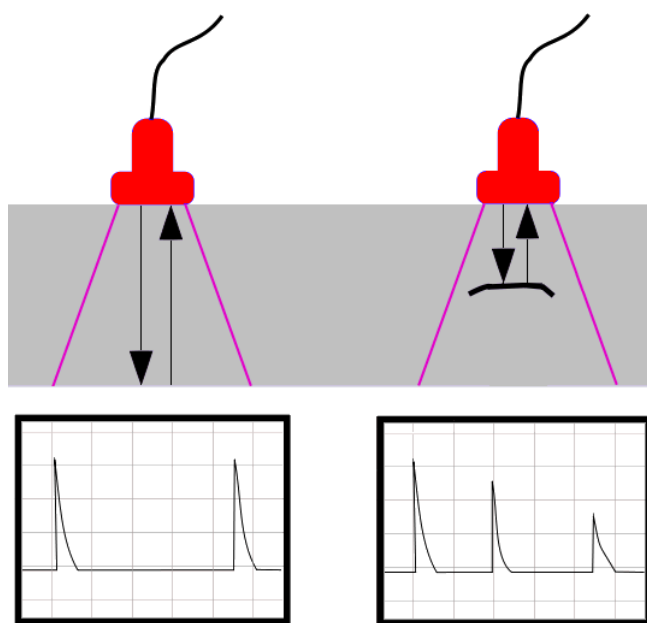


Fig. 3.10. Principiu functionare UT

În figura 3.10 putem vedea principiul functionarii controlului cu UT. O sondă transmite sunete de diferite frecvențe prin materialul de testat. Dacă materialul conține fisuri, zgură, etc, (exemplul din dreapta) sunetele emise de sondă vor fi reflectate înapoi către sondă mai repede din cauza schimbării mediului prin care circulă sunetul (metal, aer, zgură). Pe baza timpilor măsurați de calculator și diferențelor de răspuns dintre sunete, acesta va decide dacă există sau nu defecte în material.

În cazul probei P1.1. controlul ultrasonic a fost efectuat cu un aparat Olympus OmniScan MX și un palpator Olympus 4L16 8x9 DGS. Controlul a fost efectuat în 3 unghiuri 45, 60, 70, la un nivel de înregistrare $f_i=2$ mm (fig. 3.12).

După interpretarea controlului nondistructiv cu ultrasunete, negăsindu-se nici-un fel de defect pe proba sudată, aceasta a putut fi admisă.



Fig. 3.12. Control US – P1.1

În cele din urmă, putem fi de acord că tehnologia de sudare cu arc electric, materialul de bază, materialul de adaos, gazul de protecție și echipamentele folosite au fost corespunzătoare pentru nevoile șantierului naval, în cazul de față, sudarea a două table A36, cu grosime de 12mm.

Concluzii

Modelarea matematică a câmpului termic se referă la stabilirea vectorului densitate de flux termic și a legilor transferului de căldură. Astfel, pentru realizarea modelului trebuie ținut seama de ecuațiile generale ale modelului transferului termic, luându-se în discuție ecuația conservării energiei, ecuația conservării masei, ecuațiile de mișcare și ecuațiile radiației termice. În vederea realizării unui model corect, care respectă realitatea, trebuie impuse condițiile inițiale și de frontieră pentru domeniul studiat.

Ecuațiile transferului termic în procesele de sudare iau în considerare ecuațiile transferului termic prin conducție și convecție. Transferul termic prin radiație trebuie introdus sub forma coeficienților de corecție pentru cazul sudării barelor și plăcilor.

În cazul oțelurilor navale, elementele de aliere au o influență importantă asupra conductibilității termice. La valori scăzute ale proporției elementelor de aliere, conductibilitatea termică înregistrează o scădere bruscă, creșterea procentului acestora diminuând considerabil rata de scădere.

Modelarea analitică este o problemă dificilă de rezolvat, fapt pentru care s-a trecut la analiza numerică cu elemente finite a câmpurilor termice din procesele de sudare prin topire, cu arc electric, multistrat. Astfel, pentru analiza termică în cazul proceselor de sudare prin topire trebuie urmați următorii pași:

- stabilirea tipurilor de modele geometrice utilizate la modelarea cu elemente finite; dimensiunile elementelor finite influențează direct convergența soluției, deci precizia rezultatelor obținute, tendința fiind de a se adopta elemente finite cu dimensiuni cât mai mici, mai ales în zonele cu variații mari ale mărimilor caracteristice ale câmpului termic;
- introducerea condițiilor la limită pentru analiza câmpurilor termice;
- realizarea analizei efective, luând în considerare un număr de pași suficient de mare, pentru a obține rezultate optime și a extrage date cât mai corecte;
- postprocesarea datelor, din analiza cu elemente finite a câmpurilor termice.

În urma simulării procesului de sudare în mediu de gaze protectoare cu electrod fuzibil – MIG/MAG multistrat, realizată în cadrul prezentei lucrări, se pot concluziona următoarele:

- s-a elaborat un model cu elemente finite în Simufact Welding pentru simularea sudării prin procedeul MIG-MAG având la bază următoarele ipoteze:
 - ✓ materialul de bază este considerat izotrop;

- ✓ caracteristicile termofizice depind de temperatură;
 - ✓ fluxul termic are o distribuție Gaussiană;
 - ✓ s-a utilizat modelul sursei termice Goldak;
 - ✓ se consideră pierderile de căldură prin conducție, convecție și radiație;
 - ✓ se neglijează mișcarea fluidului în baie.
- în simularea procesului de sudare s-a considerat timpul total de analiză ca fiind timpul de sudare;
 - s-au trasat ciclurile termice specifice modelului cu elemente finite dezvoltat și procesului real, respectiv simularea procedeului de sudare MIG-MAG multistrat;

Determinările experimentale au urmărit validarea modelului cu elemente finite și corectitudinea simulării procedeului de sudare MIG-MAG multistrat. Rezultatele au fost comparate cu rezultatele identificate în lucrările de specialitate din domeniu, iar erorile modelului, respectiv între temperaturile modelate și cele din literatura nu depășesc cca. 10 %.

Luând în considerare concluziile prezentate mai sus, se poate spune că modelul dezvoltat pentru simularea procesului de sudare în medii de gaze protectoare, multistrat poate fi validat, obținându-se valori și distribuții apropiate de cele identificate în literatura de specialitate.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Abid, M., Siddique, M., Mufti, R.A., Prediction of welding distortions and residual stresses in a pipe-flange joint using the finite element technique, Modeling Simulation .in Material Science & Engineering, vol. 13, pp. 1-16, 2005.
- [2] Andersson, B.A.B., Thermal Stresses in Submerged Arc Welded Joint Considering Phase transformations, ASME Journal of Engineering Material and Technology, vol. 100, pp. 356362, 1978.
- [3] Blodgett, O.W., Distortion: How to minimize it with Sound Design Practices and Controlled Welding Procedures plus Proven Methods for Straightening Distorted Members, pp. 1-19, The Lincoln Electric Company, G261
- [4] Dănescu, Al., Cărbunaru, A., Petrescu, Șt., ș.a. - Termotehnică și mașini termice, Editura Didactică și pedagogică, București, 1985
- [5] Deng, D., Liang, W., Murakawa, H., Determination of Welding Deformation in Fillet-Welded Joint by means of Numerical Simulation and Comparison with Experimental Measurements. Journal of Materials Processing Technology 2007; 183(2-3): 219-225.
- [6] Doan T., Tran, T.P., Vo, T.Q., Kim, I.S., Finite Element Predictions of Residual Stresses and Distorsions in T Joint Fillet Welds, The 11th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference, 2010
- [7] Friedman, E., Thermo-Mechanical Analysis of the Welding Process using the Finite Element Method, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, pp. 206-213, 1975.
- [8] Geru, N. – Proprietățile metalelor și metode fizice de control, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1967
- [9] Goldak, J., Bibby, M., Moore, J., House, R., Patel, B., Computer Modeling of Heat Flow in Welds, Metallurgical Transactions B, vol. 17 B, pp. 587-600, 1986.
- [10] Goldak, J., Zhou, J., Breiguine, V., and Montoya, F., Thermal Stress Analysis of Welds: From melting Point to Room Temperature, JWRI, vol. 25, No. 2, pp. 1851-89, 1996.
- [11] Goldak, J., Chakravarti, A. and Bibby, M., A new Finite Element Model for Heat Sources, Metallurgical Transactions B, vol. 15 B, pp. 299-305, 1984.
- [12] Hibbitt, H.D., P.V. Marcal. A Numerical Thermo-mechanical Model for the Welding and Subsequent Loading of a Fabricated Structure. Journal of Computers and Structures 1973; 3: 1153-1174.
- [13] Hong, L., Ren, H., Simulation of Welding Deformations of Ship Structures. Key Engineering Materials 2006; 324-325: 651-654.
- [14] Hyun, S. and Lindgren, L.E., Smoothing and Adaptive Re-meshing Schemes for Graded Elements, International Journal of Communications in Numerical Methods in Engineering., vol. 14, pp. 1-17, 2001.
- [15] Lee, C.H., Chang, K.H., Three-dimensional finite element simulation of residual stresses in Circumferential Welds of Steel Pipe Including Pipe Diameter Effects. Journal of Material Science & Engineering-A. Article in Press (2007), doi:10.1016/j.msea.2007.10.011.
- [16] Lindgren L.E., Haggblad H.A., McDill J.M.J. and Oddy A.S., Automatic Re-meshing for Three-Dimensional Finite Element Simulation of Welding, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 147, pp. 401-409, 1997.
- [17] Lindgren, L.E., Finite Element Modeling and Simulation. Part 1: Increased Complexity, Journal of Thermal Stresses, vol. 24, pp. 141-192, 2001.
- [18] Lindgren, L.E., Finite Element Modeling and Simulation. Part 2: Improved Material Modeling, Journal of Thermal Stresses, vol. 24, pp. 195-231, 2001.
- [19] Lindgren, L.E., Finite Element Modeling and Simulation. Part 3: Efficiency and

Integration, Journal of Thermal Stresses, vol. 24, pp. 305-334, 2001.

[20] Maier, C., Proiectarea tehnologică asistată de calculator, Editura Evrika, Brăila, ISBN 973-641-044-7, 2003

[21] Masubuchi, K., Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980.

[22] McDill, J.M and Oddy, A.S., A Non-Conforming Eight to 26-Node Hexahedron for Three Dimensional Thermal-Elasto-Plastic Finite Element Analysis, Journal of Computers and Structures, vol. 54, No. 2, pp. 183-189, 1995.

[23] McDill, J.M, Runnemalm, K.H. and Oddy, A.S., An 8-to-16 Node Solid Graded Shell Elements for Far-Field Applications in 3-D Thermal Mechanical FEA, 12th International Conference on Mathematical and Computer Modeling and Scientific Computing, Chicago, 1999.

[24] McDill, J.M., Goldak, J.A., Oddy, A.S., and Bibby, M J., Isoparametric Quadrilaterals and Hexahedrons for Mesh-Grading Algorithms, Communications in Applied Numerical Methods, vol. 3, pp. 155-163, 1987.

[25] McDill, J.M., Oddy, A.S. and Klien, M.E., Data Transfer for 3-D Adaptive Thermal-Elasto- Plastic Finite Element Analysis, Simulation of Materials Processing: Methods and Applications, Shen & Dawson (eds), 1995.

[26] McDill, J.M., Oddy, and Goldak, J.A., An Adaptive Mesh-management Algorithm for Three Dimensional Automatic Finite Element Analysis, Transactions of CSME, vol. 15, No. I, pp. 57-70, 1991.

[27] Mircea O., Cercetări privind simularea ciclurilor termomecanice din îmbinările sudate prin topire, Teză de doctorat, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2005

[28] Nadimi, S., Khoushehmehr, R.J, Rohani, B., Mostafapour, A., Investigation and Analysis of Weld Induced Residual Stresses in Two Dissimilar Pipes by Finite Element Modelling, Journal of Applied Sciences 8 (6): 1014-1020, ISSN: 1812-5654, 2008

[29] Ohring, S., Lugt, H., J. – Numerical simulation of a time-dependent 3-D GMA weld pool due to a moving arc, Welding Journal, December, 1999, pag. 416s-424s

[30] Quasnen L., Huan, L., Dan, Qu., Ying, G., Finite element simulation for the weld temperature field of tandem pulsed MIG welding, <http://www.paper.edu.cn/index.php> Chinese scientific papers online / default/releasepaper/content/200705-435

[31] Ravichandran, G., Raghupathy, V.P. and Ganesan, N., Analysis of Temperature Distribution During Circumferential Welding of Cylindrical and Spherical Components using the Finite Element Method, Journal of Computer and Structures, vol. 59, No. 2, pp. 225-255, 1996.

[32] Rosenthal, D., Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting, Welding Journal 20(5), 1941, pag. 220s-234s

[33] Runnemalm, H. and Hyun, S., Three-Dimensional Welding Analysis using an Adaptive Mesh Scheme, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 189, pp. 515-523, 2000.

[34] Rybicki, E.F., Schmueser, D.W., Stonesifer, R.W., Groom, JJ., and Mishler, H.W., A Finite Element Model for Residual Stresses and Deflections in Girth Butt Welded Pipes, Journal of Pressure Vessel Technology, vol. 100, pp. 256-262, 1978.

[35] S.R. Ikeagu. Evaluating the Effects of Different Welding Processes on the Distortion of 4mm Thick DH36 Ship Panels. M. Sc. Thesis, School of Applied Sciences, Cranfield University, 2007.

[36] Sabapathy, P.N., Wahab, M.A. and Painter, M.J., Numerical Models of In Service Welding of Gas Pipeline, Journal of Materials Processing Technology, vol. 118. pp. 14-21, 2001.

[37] Scutelnicu, E., Cercetări teoretice și experimentale privind procesele termice la sudarea îmbinărilor eterogene, Teză de doctorat, Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, 2003

[38] Seo, S.I., Yang, Y.H. and Jang C.D., Development of New Finite Element Method to Analyze Deformation of Plate due to Line heating. Journal of Ship Production, vol. 17, pp. 1-

7, 2001.

[39] Siddique, M., Abid, M., Junejo, H.F., Mufti, R.A., 3-D Finite Element Simulation of Welding Residual Stresses in Pipe-Flange Joints: Effect of Welding Parameters. Materials Science Forum 2005; 490-491: 79-84.

[40] Ștefănescu, D., Higrotermica, Note de curs de Inginerie civilă, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, 2009

[41] Takeda, Y., Prediction of Butt Welding Deformation of Curved Shell Plates by Inherent Strain Method. Journal of Ship Production 2002; 18(2): 99-104.

[42] Udrescu, L., Transfer termic și masic la aliaje metalice, Editura Politehnica, Timișoara, 1999

[43] Ueda, Y., Fukuda, K., Kim, Y.C., New Measuring Method of Axis-symmetric Three-Dimensional Residual Stresses Using Inherent Strains as Parameters. Journal of Engineering Materials and Technology 1986; 108: 328-334.

[44] Vaidyanathan, S., Todato, A.F., Finnie, I., Residual Stress Due to Circumferential Welds. ASME Journal of Engineering Material and Technology 1973; 95: 233-237.

[45] Wang G., Huang P.G., Zhang Y.M. - Numerical Analysis of Metal Transfer in GMAW, The Minerals, Metals & Materials Society, Metallurgical and Materials Transaction B, Volume 34B, 2003, pag. 345

[46] Yaghi, A., Becker, A., State of the Review-Welding Simulations using Finite Element Methods, Report No. FENET-UN0TT-DLE-08, School of Mechanical, Materials & Manufacturing Engineering, University of Nottingham, UK, 2004.

[47] Yapp, D. Management of Weld Quality. Lecture Notes on Topic MAN1.5, WERC 2007, Cranfield University, Bedford, UK

[48] *** <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/common-welding-methods-weld-defects-shipbuilding-industry/>

[49] *** https://www.researchgate.net/publication/228766972_WELDING_TECHNOLOGIES_IN_SHIPBUILDING_INDUSTRY

[50] *** http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2012/C2/ENG/eng_018.pdf

[51] *** <http://www.shipbuilding-steel.com/Products/A36.html>

[52] *** <https://www.oerlikon-welding.com/oerlikon-migmag-flux-cored-wires-fluxofil-range>

[53] *** Catalog Oerlikon – Shipbuilding

[54] *** Manualul Sudorului – 2016

[55] *** <https://www.kemppi.com/en-US/search/>

[56] *** <http://www.solutiicnd.ro/>

[57] *** <http://www.esabna.com/us/en/education/blog/radiographic-and-ultrasonic-testing-of-welds.cfm>

[58] *** Instrucțiuni tehnologice din SNDGa.

[59] *** http://www.wermac.org/others/ndt_ut.html

[60] *** http://www.profittool.ro/R/cataloage/cat_000046/studiu.pdf