

**CERCETĂRI PRIVIND  
MODELAREA MATEMATICĂ  
A REGIMULUI TERMIC AL  
OȚELULUI LICHID  
LA NIVELUL OALA DE TURNARE-  
DISTRIBUTOR-CRISTALIZOR**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor  
la

Universitatea Politehnica Timișoara  
în domeniul ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR  
de către

**Mat.fiz. Alina Lăscuțoni**

Conducător științific:  
Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Teodor Heput  
Prof.univ.dr.ing. Maria Nicolae  
C.S.P.I dr.ing. Doru Romulus Pascu  
Prof.univ.dr.ing. Victor Budău

Ziua susținerii tezei: 13.03.2015

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Automatică                               | 10. Știința Calculatoarelor                |
| 2. Chimie                                   | 11. Știința și Ingineria Materialelor      |
| 3. Energetică                               | 12. Ingineria sistemelor                   |
| 4. Ingineria Chimică                        | 13. Inginerie energetică                   |
| 5. Inginerie Civilă                         | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 6. Inginerie Electrică                      | 15. Ingineria materialelor                 |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 16. Inginerie și Management                |
| 8. Inginerie Industrială                    | 17. Arhitectură                            |
| 9. Inginerie Mecanică                       |  |

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, 2015

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

## PREFAȚĂ

Ideea acestei lucrări de cercetare a plecat de la problemele care apar în timpul procesului de turnare continuă a oțelului, la o oțelărie electrică echipată cu cuptor cu arc electric tip E.B.T. și instalație de procesare în afara cuptorului tip L.F.

Procesele care au loc la turnarea continuă a oțelului necesită un control strict a temperaturii oțelului lichid care urmează să fie turnat continuu. Având în vedere acestea, este deci necesar ca temperatura oțelului lichid din distribuitor și cristalizor să fie menținută în limite foarte strânse față de temperatura optimă pe care trebuie să o aibă oțelul lichid la ieșirea din cristalizor. Acest lucru se poate realiza numai printr-o cunoaștere cât mai exactă a temperaturii oțelului lichid din distribuitorul instalației de turnare continuă și din cristalizor.

Deoarece realizarea unor măsurători în interiorul băii metalice reprezintă o sarcină foarte grea, uneori chiar imposibil de realizat, nu putem obține informații asupra fenomenelor care se petrec în interiorul oalei de turnare în diferite faze ale procesului și în timpul golirii acesteia în distribuitorul instalației de turnare continuă și apoi a acestuia în cristalizor. Prin natura sa, această lucrare necesită o abordare cu caracter multidisciplinar, pornind de la cu o profundă înțelegere a teoriei curgerii fluidelor și continuând cu solide cunoștințe legate de teoria transferului de căldură, algoritmi și metode numerice, precum și tehnicile moderne de programare.

Doresc să adresez cele mai calde mulțumiri conducătorului științific, domnului Prof.dr.ing. Teodor Hepuț, pentru sugestiile, sfaturile pline de profesionalism și încrederea acordată pe întreg parcursul elaborării tezei.

Doresc să mulțumesc membrilor comisiei de îndrumare: Conf.dr.ing. Vîlceanu Lucia, Conf.dr.ing. Ardelean Erika, Ș.l.dr.ing. Puțan Vasile, precum și membrilor departamentului printre care Conf.dr.ing. Socalici Ana și Conf.dr.ing. Ardelean Marius. De asemenea mulțumesc pentru ajutorul acordat și specialiștilor din Departamentul de Inginerie Electrică și Informatică Industrială Conf.dr. Lemle Dan, Lector dr. Bistriean Diana și Asist.dr.ing. Abrudean Cristian, precum și tuturor colegilor de la Facultatea de Inginerie din Hunedoara care în mod direct sau indirect au fost alături de mine în acest demers.

În final doresc să mulțumesc soțului și fiului meu pentru dragostea, răbdarea și înțelegerea de care au dat dovadă și, nu în ultimul rând, părinților mei fără de care nu aș fi ajuns aici.

Mat. Fiz. Lăscuțoni Alina

## MULȚUMIRI

„Această lucrare a fost finanțată parțial din proiectul strategic POSDRU/159/1.5/S/137070 (2014) al Ministerului Educației Naționale, România, cofinanțat din Fondul Social European – Investește în oameni, în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013”.

Lăscuțoni, Alina

**CERCETĂRI PRIVIND MODELAREA MATEMATICĂ A REGIMULUI TERMIC AL OȚELULUI LICHID LA NIVELUL OALĂ DE TURNARE-DISTRIBUITOR-CRISTALIZOR**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 11, Nr. 46, Editura Politehnica, 2015, 198 pagini, 149 figuri, 20 tabele.

ISSN:1842-7855

ISBN:978-606-554-925-8

Cuvinte cheie: optimizare, variația temperaturii, transfer de căldură, turnare continuă, oală de turnare, distribuitor, cristalizor, modelare matematică, simulare.

Rezumat,

Scopul acestei teze de doctorat este acela de a dezvolta modele matematice pentru a simula transferul de căldură la nivelul oală de turnare – distribuitor – cristalizor, în vederea optimizării variației temperaturii oțelului turnat continuu

Pentru realizarea obiectivelor propuse, s-a efectuat un studiu documentar privind turnarea continuă a oțelului: studiul procesului de elaborare a oțelului în cuptoarele cu arc electric, de tip E.B.T., procesare oțelului în instalații de tip L.F. și a turnării continue precum și stadiul actual al cercetărilor privind regimul termic la turnarea continuă a oțelului.

În cadrul acestei teze s-au efectuat experimentări privind modelarea matematică a regimului termic la turnarea continuă a oțelului; cercetări și experimentări industriale privind elaborarea oțelului în cuptoare cu arc electric tip E.B.T, procesarea în instalația L.F. și turnarea continuă sub formă de semifabricate cu secțiune circulară destinate fabricării țevilor.

Pe baza studiului literaturii de specialitate, experimentărilor industriale și a tehnicii de calcul moderne consider că s-au realizat în această lucrare următoarele contribuții principale:

Stabilirea unor corelații între principalii parametri ai turnării continue și anume: temperatura de turnare, viteza de turnare și parametrii răcirii primare și secundare;

Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire utilizând metoda suprafeței de răspuns;

Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire și de temperatura liquidus a oțelului;

Analiza defectelor cauzate de regimul termic pe fluxul distribuitor-cristalizor - răcire secundară la semifabricatele cu secțiune circulară;

Modelul matematic al procesului de răcire și solidificare a semifabricatelor cu secțiune circulară turnate continuu;

Programul de simulare TCR-HD14 a răcirii și solidificării la nivel de cristalizor, pentru turnarea continuă a semifabricatelor de oțel cu secțiune rotundă, turnat cu adaos de microrăcitori;

Analiza rezultatelor obținute la aplicarea programului de simulare (TCR-HD14) la turnarea continuă a semifabricatului cu secțiune rotundă (diametru 350mm) cu adaos de microrăcitori (1%, 2% și 3% și diametru microrăcitori 1mm, 2mm și 3mm).

# CUPRINS

	Pag.
Listă de tabele .....	9
Listă de figuri .....	10
<b>1. PLAN DE DESFĂȘURARE A EXPERIMENTĂRILOR ȘI CERCETĂRILOR</b> .....	15
<b>1.1. Scopul cercetării</b> .....	15
<b>1.2. Obiectivele cercetării</b> .....	16
<b>1.3. Strategia cercetării</b> .....	16
<b>1.4. Concluzii</b> .....	17
<b>Partea I – STUDIU DOCUMENTAR PRIVIND TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI</b>	
<b>2. STUDIUL PROCESULUI DE ELABORARE A OȚELULUI ÎN CUPTOARELE CU ARC ELECTRIC, DE TIP EBT ȘI A TURNĂRII CONTINUE</b> .....	19
<b>2.1. Analiza procesului de elaborare a oțelului în cuptoarele electrice cu arc, de tip EBT (Excentric Bottom Tapping)</b> .....	19
2.1.1. Considerații tehnologice .....	19
2.1.2. Descrierea agregatului cuptorului electric cu arc E.B.T .....	19
2.1.3. Procesul tehnologic de elaborare a oțelului într-un cuptor electric de tip EBT .....	21
<b>2.2. Tratamentul secundar al oțelului în oala de turnare</b> .....	25
2.2.1. Construcția instalației L.F. (Ladle-Furnace) .....	25
2.2.2. Funcționarea instalației L.F. ....	27
2.2.3. Efecte tehnico – economice .....	28
<b>2.3. Analiza procesului de turnare continuă a oțelului</b> .....	29
2.3.1. Generalități .....	29
2.3.2. Tipuri de instalații .....	29
2.3.3. Elementele instalației de turnare continuă cu fir curbat .....	30
2.3.3.1. Oala de turnare .....	31
2.3.3.2. Distribuitorul .....	32
2.3.3.3. Tubul de imersie .....	33
2.3.3.4. Cristalizoarele .....	34
2.3.3.5. Zona de răcire secundară, elemente de susținere, extragere și îndreptare .....	40
2.3.3.6. Turnarea secvențială .....	43
<b>2.4. Concluzii</b> .....	44
<b>3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND REGIMUL TERMIC LA TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI</b> .....	45
<b>3.1. Circuitul parcurs de oalele de turnare într-o oțelărie modernă</b> ...	45
<b>3.2. Stadiul actual al cercetărilor</b> .....	46
3.2.1. Modele termice pentru investigarea și estimarea vitezei de răcire a oalei de turnare .....	46
3.2.2. Studii referitoare la stratificarea termică a aliajului din oala de turnare în perioada de staționare a acesteia .....	47

3.2.3. Simularea numerică a curgerii aliajului lichid din oala de turnare în timpul golirii acesteia .....	48
3.2.4. Modelarea fizică a hidrodinamicii și regimului termic al aliajului din oala de turnare în perioada ei de staționare și de golire .....	49
<b>3.3. Concluzii</b> .....	50
<b>4. IMPORTANȚA REGIMULUI TERMIC LA NIVELUL OALA DE TURNARE - DISTRIBUTOR - CRISTALIZOR ASUPRA CALITĂȚII OȚELULUI ȘI SCOATERII DE METAL</b> .....	51
<b>4.1. Temperatura de turnare</b> .....	51
4.1.1. Generalități .....	51
4.1.2. Controlul temperaturii la turnarea continuă .....	52
4.1.3. Temperatura oțelului lichid pentru turnarea continuă .....	53
4.1.4. Temperatura la transfer în vederea turnării .....	54
<b>4.2. Procesele de transfer termic la turnarea continuă</b> .....	55
4.2.1. Generalități .....	55
4.2.2. Etapele procesului de transfer termic la turnarea continuă .....	58
4.2.3. Ecuația procesului .....	59
4.2.4. Transferul de căldură peste interstiții .....	62
4.2.5. Bilanțul de masă în stratul de zgură .....	63
4.2.6. Conducția căldurii în cristalizor .....	64
4.2.7. Transmisia căldurii prin convecție în apă .....	65
4.2.8. Zona de stropire de sub cristalizor .....	66
4.2.9. Influența compoziției chimice asupra transferului termic .....	66
4.2.9.1. Importanța fazelor .....	66
4.2.9.2. Importanța analizei chimice .....	67
<b>4.3. Concluzii</b> .....	67
<b>PARTEA a II-a - CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PROPRII PRIVIND MODELAREA MATEMATICĂ A REGIMULUI TERMIC LA TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI</b>	
<b>5. CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND ELABORAREA OȚELULUI ÎN CUPTOARE CU ARC ELECTRIC TIP E.B.T. ȘI TURNAEREA CONTINUĂ</b> .....	69
<b>5.1. Elaborarea oțelului</b> .....	69
<b>5.2. Tratamentul secundar pe instalația de tip L.F.</b> .....	74
5.2.1. Considerații tehnologice .....	74
5.2.2. Analiza procesului de tratare a oțelului lichid în instalația LF .....	74
5.2.3. Procesul de rafinare în instalația LF .....	76
<b>5.3. Turnarea continuă</b> .....	80
<b>5.4. Modelarea matematică a regimului termic al oțelului lichid la nivelul distribuitorului instalației de turnare continuă</b> .....	84
5.4.1. Considerații privind softwer-ul utilizat și metodele de optimizare folosite .....	84
5.4.2. Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire utilizând metoda suprafeței de răspuns .....	87
5.4.2.1. Formularea problemei de optimizare .....	87

5.4.2.2. Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire utilizând metoda suprafeței de răspuns .....	87
5.4.3. Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire și de temperatura liquidus a oțelului .....	90
5.4.3.1. Formularea problemei de optimizare .....	90
5.4.3.2. Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire și de temperatura liquidus a oțelului .....	90
<b>5.5. Concluzii</b> .....	92
<b>6. INFLUENȚA REGIMULUI TERMIC AL OȚELULUI DIN DISTRIBUTOR ȘI CRISTALIZOR ASUPRA DEFECTELOR DE SUPRAFAȚĂ ȘI INTERNE</b> ...	93
<b>6.1. Generalități</b> .....	93
<b>6.2. Defecte de suprafață și interne</b> .....	95
6.2.1. Defecte de suprafață .....	95
6.2.1.1. Crăpături .....	95
6.2.1.2. Depresiuni .....	97
6.2.1.3. Întrerupere turnare .....	98
6.2.1.4. Retasura de capăt .....	98
6.2.2. Defecte interne .....	99
6.2.2.1. Fisuri .....	99
6.2.2.2. Microretasura .....	100
6.2.2.3. Porozitate centrală .....	101
<b>6.3. Concluzii</b> .....	101
<b>7. CERCETĂRI PRIVIND MODELAREA MATEMATICĂ ȘI ȘIMULAREA TRANSFERULUI DE CALDURA LA TURNAREA CONTINUĂ A SEMIFABRICATELOR ROTUNE CU DIAMETRU DE 350 MM</b> .....	103
<b>7.1. Exprimarea sistemului Navier-Stokes în coordonate carteziene și cilindrice</b> .....	103
7.1.1. Coordonate Carteziene .....	103
7.1.2. Coordonate cilindrice .....	103
<b>7.2. Obținerea microrăcitorilor</b> .....	104
<b>7.3. Modelul matematic al procesului din distribuitor la adaosul de microracitori</b> .....	105
<b>7.4. Modelarea matematica a procesului din cristalizor</b> .....	110
7.4.1. Modelarea prin metoda diferențelor finite .....	110
7.4.2. Criteriul de stabilitate a ecuațiilor cu diferențe finite .....	113
7.4.3. Modelul bidimensional al solidificării și răcirii semifabricatului .....	114
<b>7.5. Simularea solidificării țagelilor rotunde turnate continuu cu diametrul 350 mm</b> .....	115
7.5.1. Descrierea și funcționarea programului de solidificare a semifabricatelor rotunde turnate continuu .....	115
7.5.2. Realizarea simulării solidificării țagelilor rotunde turnate continuu cu diametrul de 350mm cu 3% adaos de microracitori în cristalizor .....	116
7.5.3. Realizarea simulării solidificării țagelilor rotunde turnate continuu fără adaos de microracitori în cristalizor .....	122
7.5.4. Influența grosimii stratului de praf de lubrifiere asupra variației temperaturii .....	127

<b>7.6. Concluzii .....</b>	<b>130</b>
<b>Partea a III-a - CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE</b>	
<b>8. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR .....</b>	<b>133</b>
<b>8.1. Concluzii finale recapitulative.....</b>	<b>133</b>
<b>8.2. Contribuții originale .....</b>	<b>135</b>
<b>8.3. Direcții de continuare a cercetărilor .....</b>	<b>136</b>
<b>DISEMINAREA REZULTATELOR .....</b>	<b>137</b>
<b>Anexe .....</b>	<b>139</b>
<b>Bibliografie.....</b>	<b>191</b>



## Lista de tabele

	pag.
<b>Tabelul 2.1.</b> Caracteristicile tehnice ale cuptorului electric tip EBT .....	21
<b>Tabelul 2.2.</b> Parametri medii de exploatare ai cuptorului electric tip EBT .....	21
<b>Tabelul 2.3.</b> Durate de elaborare la cuptorul EBT .....	22
<b>Tabelul 2.4.</b> Componența și compoziția zgurii de la afinare .....	24
<b>Tabelul 4.1.</b> Viteza de răcire a oțelului în funcție de capacitatea oalei de turnare .....	51
<b>Tabelul 4.2.</b> Supraîncălzirea optimă a oțelului la turnarea continuă .....	54
<b>Tabelul 5.1.</b> Încărcătura cuptorului EBT.....	69
<b>Tabelul 5.2.</b> Date privind topirea încărcăturii .....	72
<b>Tabelul 5.3.</b> Date privind tratamentul oțelului în oala de turnare .....	75
<b>Tabelul 5.4.</b> Date privind tratamentul oțelului în instalația LF .....	78
<b>Tabelul 5.5.</b> Compoziția chimică finală a oțelului .....	80
<b>Tabelul 5.6.</b> Parametrii tehnologici de la turnarea continuă .....	80
<b>Tabelul 5.7.</b> Date referitoare la răcirea primară și secundară a semifabricatelor .....	82
<b>Tabelul 5.8.</b> Compoziția chimică a materialului de acoperire .....	87
<b>Tabelul 5.9.</b> Valorile parametrilor și valorile răspunsurilor experimentale folosite în optimizare .....	87
<b>Tabelul 5.10.</b> Valorile parametrilor și valorile răspunsurilor experimentale folosite în optimizare .....	90
<b>Tabelul 7.1.</b> Valorile conductibilității termice .....	109
<b>Tabelul 7.2.</b> Valori ale temperaturii oțelului după adaosul de microrăcitori ...	109
<b>Tabelul 7.3.</b> Variația razei relative a frontului de solidificare în funcție de adaosul de microrăcitori .....	127
<b>Tabelul 7.3.A.</b> Temperatura în fir, funcție de diametrul microrăcitorilor și de cantitatea de microrăcitori adăugată .....	166

## Lista de figuri

	pag.
<b>Fig.2.1.</b> Cuptorul electric cu arc de tip EBT .....	20
<b>Fig.2.2.</b> Fazele de elaborare în cuptorul electric EBT .....	22
<b>Fig.2.3.</b> Schema procesului tehnologic de elaborare .....	24
<b>Fig.2.4.</b> Schema de principiu a instalației de tratament secundar de tip Ladle Furnace .....	25
<b>Fig.2.5.</b> Instalația de tratament secundar de tip LF .....	26
<b>Fig.2.6.</b> Schema procesului tehnologic de tratare în oala de turnare (LF) .....	28
<b>Fig.2.7.</b> Tipurile de turnare continuă verticală a oțelului .....	30
<b>Fig.2.8.</b> Orificii de turnare imersate de diverse tipuri .....	33
<b>Fig.2.9.</b> Alimentarea cristalizorului din distribuitor .....	34
<b>Fig.2.10.</b> Creșterea grosimii crustei solidificate, funcție de viteza de turnare .....	36
<b>Fig.2.11.</b> Cristalizor compact .....	37
<b>Fig.2.12.</b> Oscilația cristalizorului .....	39
<b>Fig.2.13.</b> Zona de răcire secundară .....	40
<b>Fig.2.14.</b> Creșterea grosimii crustei, pe zona de răcire secundară, prin stropire cu apă .....	41
<b>Fig.4.1.</b> Variația temperaturii în oală și distribuitor la o secvență cu 4 oale ...	53
<b>Fig.4.2.</b> Schema de măsurare a temperaturii oțelului lichid în distribuitor .....	55
<b>Fig.4.3.</b> Schema de măsurare continuă a temperaturii în distribuitorul MTC ...	55
<b>Fig.4.4.</b> Schema cu principalele zone de răcire .....	56
<b>Fig.4.5.</b> Schema de principiu a ansamblului cristalizor/role de picior .....	57
<b>Fig.4.6.</b> Câmpul de analiză descompus în elemente rectangulare .....	61
<b>Fig.5.1.</b> Compunerea încărcăturii metalice .....	70
<b>Fig.5.2.</b> Repartizarea încărcăturii pe bene .....	70
<b>Fig.5.3.</b> Durata încărcării benelor .....	71
<b>Fig.5.4.</b> Consumul energetic pentru topirea fiecărei bene de încărcătură .....	71
<b>Fig.5.5.</b> Variația consumului de energie în funcție de durata topirii (capacitate cuptor 100t) .....	72
<b>Fig.5.6.</b> Variația compoziției chimice la topire .....	73
<b>Fig.5.7.</b> Oala de turnare cu oțel lichid .....	74
<b>Fig.5.8.</b> Adaosurile făcute în oala de turnare pentru șarjele studiate .....	75
<b>Fig.5.9.</b> Dependența dintre durata barbotării la cuptor a oțelului și gradientul de temperatură .....	76
<b>Fig.5.10.</b> Variația compoziției chimice a oțelului la intrarea în LF .....	77
<b>Fig.5.11.</b> Adaosurile făcute în instalația LF .....	78
<b>Fig.5.12.</b> Distribuția temperaturii oțelului la sfârșitul tratamentului în LF .....	79
<b>Fig.5.13.</b> Variația temperaturii oțelului, relativ la temperatura lichidus a mărcii studiate .....	79
<b>Fig.5.14.</b> Variația vitezei de turnare pentru cele două profile .....	81
<b>Fig.5.15.</b> Dependența dintre temperatura și viteza de turnare .....	81
<b>Fig.5.16.</b> Variația debitul apei de răcire din cristalizor în funcție de vitezei de turnare .....	82
<b>Fig.5.17.</b> Variația vitezei de turnare, funcție de debitul apei de răcire secundară ...	83
<b>Fig.5.18.</b> Variația debitelor apei de răcire pentru secțiunile $\Phi 310\text{mm}$ și $\Phi 270\text{ mm}$ ...	83
<b>Fig.5.19.</b> Suprafața de răspuns corespunzătoare rezultatelor experimentale...	88
<b>Fig.5.20.</b> Program realizat în MathCAD14 .....	89
<b>Fig.5.21.</b> Variația parametrilor optimali .....	89
<b>Fig.5.22.</b> Suprafața de răspuns corespunzătoare rezultatelor experimentale...	91

<b>Fig.5.23.</b> Variația parametrilor optimali .....	91
<b>Fig.6.1.</b> Fisuri longitudinale .....	95
<b>Fig.6.2.</b> Fisuri transversale .....	96
<b>Fig.6.3.</b> Fisuri stelare .....	97
<b>Fig.6.4.</b> Depresiuni longitudinale .....	97
<b>Fig.6.5.</b> Întrerupere turnare .....	98
<b>Fig.6.6.</b> Retasură de capăt .....	99
<b>Fig.6.7.</b> Fisuri interne marginale .....	99
<b>Fig.6.8.</b> Fisuri interne la centru .....	100
<b>Fig.6.9.</b> Microretasura .....	100
<b>Fig.6.10.</b> Porozitate centrală .....	101
<b>Fig.7.1.</b> Sistemul de coordonate în distribuitor .....	106
<b>Fig.7.2.</b> Interfața principală a programului .....	117
<b>Fig.7.3.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului ...	117
<b>Fig.7.4.</b> Fereastra care indică progresul calculelor, la 1:58min timp real, 3:48min timp simulat .....	118
<b>Fig.7.5.</b> Fereastra care indică progresul calculelor, la 4:41min timp real, 10:02min timp simulat .....	118
<b>Fig.7.6.</b> Fereastra care indică progresul calculelor, la 8:09min timp real, 18:18min timp simulat .....	118
<b>Fig.7.7.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară .....	119
<b>Fig.7.8.</b> Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. ....	119
<b>Fig.7.9.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și timp .....	119
<b>Fig.7.10.</b> Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare .....	120
<b>Fig.7.11.</b> Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului) .....	121
<b>Fig.7.12.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ ...	121
<b>Fig.7.13.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ ...	122
<b>Fig.7.14.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului .....	122
<b>Fig.7.15.</b> Fereastra care indică progresul calculelor, la 1:03min timp real, 36s timp simulat .....	123
<b>Fig.7.16.</b> Fereastra care indică progresul calculelor, la 1:25min timp real, 5:47min timp simulat .....	123
<b>Fig.7.17.</b> Fereastra care indică progresul calculelor, la 1:43min timp real,18:17min timp simulat .....	123
<b>Fig.7.18.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară .....	124
<b>Fig.7.19.</b> Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. ....	124
<b>Fig.7.20.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și timp .....	124
<b>Fig.7.21.</b> Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare .....	125
<b>Fig.7.22.</b> Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului) ...	125
<b>Fig.7.23.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ ...	126
<b>Fig.7.24.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ ...	126
<b>Fig.7.25.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor .....	127
<b>Fig.7.26.</b> Fereastra care indică progresul calculelor pt. grosimea stratului de zgură de 1mm .....	128
<b>Fig.7.27.</b> Fereastra care indică progresul calculelor pt. grosimea stratului de zgură de 2mm .....	128

<b>Fig.7.28.</b> Fereastra care indică progresul calculelor pt. grosimea stratului de zgură de 3mm .....	128
<b>Fig.7.29.</b> Fereastra care indică progresul calculelor pt. grosimea stratului de zgură de 4mm .....	128
<b>Fig.7.30.</b> Fereastra care indică progresul calculelor pt. grosimea stratului de zgură de 5mm .....	129
<b>Fig.7.31.</b> Variația temperaturii firului în funcție de grosimea stratului de praf de lubrifiere .....	129

#### Figuri anexe

<b>Fig.7.32.A.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului .....	166
<b>Fig.7.33.A.</b> Fereastra care indică progresul calculelor la începutul simulării ...	167
<b>Fig.7.34.A.</b> Fereastra care indică progresul calculelor .....	167
<b>Fig.7.35.A.</b> Fereastra care indică progresul calculelor .....	167
<b>Fig.7.36.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară .....	168
<b>Fig.7.37.A.</b> Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. ....	168
<b>Fig.7.38.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și timp .....	168
<b>Fig.7.39.A.</b> Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare .....	169
<b>Fig.7.40.A.</b> Raza relativă a frontului de solidificare .....	169
<b>Fig.7.41.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	169
<b>Fig.7.42.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	170
<b>Fig.7.43.A.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului .....	170
<b>Fig.7.44.A.</b> Fereastra care indică progresul calculelor la începutul simulării ...	171
<b>Fig.7.45.A.</b> Fereastra care indică progresul calculelor .....	171
<b>Fig.7.46.A.</b> Fereastra care indică progresul calculelor .....	171
<b>Fig.7.47.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară	172
<b>Fig.7.48.A.</b> Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. ....	172
<b>Fig.7.49.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și timp .....	172
<b>Fig.7.50.A.</b> Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare .....	173
<b>Fig.7.51.A.</b> Raza relativă a frontului de solidificare .....	173
<b>Fig.7.52.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	173
<b>Fig.7.53.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	174
<b>Fig.7.54.A.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului .....	174
<b>Fig.7.55.A.</b> Fereastra care indică progresul calculelor .....	175
<b>Fig.7.56.A.</b> Fereastra care indică progresul calculelor .....	175
<b>Fig.7.57.A.</b> Fereastra care indică progresul calculelor .....	175
<b>Fig.7.58.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară .....	176
<b>Fig.7.59.A.</b> Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d .....	176
<b>Fig.7.60.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și timp .....	176
<b>Fig.7.61.A.</b> Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare .....	177
<b>Fig.7.62.A.</b> Raza relativă a frontului de solidificare .....	177

<b>Fig.7.63.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	177
<b>Fig.7.64.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	178
<b>Fig.7.65.A.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului .....	178
<b>Fig.7.66.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară .....	179
<b>Fig.7.67.A.</b> Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d .....	179
<b>Fig.7.68.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și timp .....	179
<b>Fig.7.69.A.</b> Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare .....	180
<b>Fig.7.70.A.</b> Raza relativă a frontului de solidificare .....	180
<b>Fig.7.71.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	180
<b>Fig.7.72.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	181
<b>Fig.7.73.A.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului .....	181
<b>Fig.7.74.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară .....	182
<b>Fig.7.75.A.</b> Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d .....	182
<b>Fig.7.76.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și timp .....	182
<b>Fig.7.77.A.</b> Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare .....	183
<b>Fig.7.78.A.</b> Raza relativă a frontului de solidificare .....	183
<b>Fig.7.79.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	183
<b>Fig.7.80.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	184
<b>Fig.7.81.A.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului .....	184
<b>Fig.7.82.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară .....	185
<b>Fig.7.83.A.</b> Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d .....	185
<b>Fig.7.84.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și timp .....	185
<b>Fig.7.85.A.</b> Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare .....	186
<b>Fig.7.86.A.</b> Raza relativă a frontului de solidificare .....	186
<b>Fig.7.87.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	186
<b>Fig.7.88.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	187
<b>Fig.7.89.A.</b> Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului .....	187
<b>Fig.7.90.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară .....	188
<b>Fig.7.91.A.</b> Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d .....	188
<b>Fig.7.92.A.</b> Temperatura în funcție de raza relativă și timp .....	188
<b>Fig.7.93.A.</b> Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare .....	189
<b>Fig.7.94.A.</b> Raza relativă a frontului de solidificare .....	189

<b>Fig.7.95.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	189
<b>Fig.7.96.A.</b> Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$ .....	190

# 1. PLAN DE DESFĂȘURARE A EXPERIMENTĂRILOR ȘI CERCETĂRILOR

La fel ca în alte ramuri industriale și în industria siderurgică în ultimii 50 de ani au fost introduse agregate, instalații și tehnologii moderne de fabricație a oțelului, scopurile finale fiind: creșterea productivității, reducerea consumurilor specifice (energie, metal, refractare, electrozi, oxigen, materiale auxiliare), creșterea calității produselor finite, reducerea gradului de poluare etc. De remarcat că în perioada menționată în oțelăriile electrice au fost instalate cuptoare de putere mare și foarte mare, mai recent cuptoare tip E.B.T., respectiv instalații de procesare a oțelului în oală (L.F., V.D., V.A.D, V.O.D. etc). Referitor la turnarea continuă a oțelului în prezent pe plan mondial peste 90% din oțelul elaborat în societățile cu profil siderurgic se toarnă continuu. În perioada menționată s-au perfecționat instalațiile de turnare continuă prin introducerea calculatoarelor de proces, precum și a tehnologiilor de elaborare prin aplicarea în practică a unor modele matematice de conducere a proceselor.

În ceea ce privește România după puternica restructurare economică începută după 1990, în societățile siderurgice, una echipată cu convertizoare cu oxigen, restul cu cuptoare electrice cu arc, oțelul elaborat se toarnă pe mașini de turnare continuu. De dorit ar fi fost ca o asemenea performanță să fi fost obținută nu prin închiderea definitivă a unor oțelării, ci prin modernizarea acestora.

În ultimii ani, așa-zisul „experiment numeric” începe să fie utilizat din ce în ce mai mult, și cu rezultate tot mai promițătoare, în evaluarea hidrodinamicii și transferului de căldură la nivelul aliajelor lichide. Acest lucru se datorează în primul rând îmbunătățirii tehnicilor de simulare și a algoritmilor numerici.

Pentru elaborarea acestei teze, s-a avut în vedere pe de o parte, efectuarea unor cercetări în fază de laborator, privind conceperea modelelor matematice și a programelor de simulare la turnarea continuă a oțelului sub formă de semifabricate cu secțiune rotundă, iar pe de altă parte o analiză a procesului de elaborare turnare a oțelului în cuptorul cu arc electric și verificarea modelelor matematice prin simulare. Experimentările în fază de laborator s-au efectuat în laboratorul de Optimizarea proceselor industriale din Facultatea de Inginerie din Hunedoara – Universitatea Politehnică Timișoara, iar experimentările industriale la o oțelărie electrică a unei societăți siderurgice din țară cu tradiție în siderurgie de peste 125 de ani (puternic restructurate după 1990).

## 1.1. Scopul cercetării

Scopul acestei teze de doctorat este acela de a dezvolta modele matematice pentru a simula transferul de căldură la nivelul oală de turnare – distribuitor – cristalizor în vederea optimizării variației acesteia. Principalul parametru al turnării continue a oțelului este temperatura acestuia la curgere din distribuitor, respectiv intrare în cristalizor, adică temperatura de turnare (care în mod direct impune valori pentru alt parametru de turnare de importanță deosebită și anume viteza de turnare).

În funcție de temperatura de turnare, determinată de compoziția chimică a oțelului, de supraîncălzire ( $\Delta T$ ) și de secțiunea semifabricatului care se toarnă, se stabilește viteza de turnare și parametrii răcirii primare și secundare. Parametrii menționați determină transferul de căldură, acesta având influență directă asupra calității semifabricatului turnat continuu. Prin modelare se urmărește optimizarea transferului de căldură în timpul turnării și solidificării oțelului.

## 1.2. Obiectivele cercetării

Obiectivele cercetării sunt strâns legate de scopul acestei teze de doctorat, acela de a dezvolta modele matematice pentru a simula transferul de căldură la nivelul oală de turnare – distribuitor - cristalizor în vederea optimizării variației acesteia. În cadrul cercetării s-a urmărit realizarea unui studiu privind regimul termic al oțelului lichid la nivelul oală de turnare – distribuitor – cristalizor. Temperatura și viteza fiind parametrii principali ai procesului de turnare a oțelului, trebuie obligatoriu să fie studiați și optimizați în permanență pentru că aceștia determină în mare măsură calitatea produsului siderurgic și consumurile specifice.

## 1.3. Strategia cercetării

Strategia de cercetare constă în parcurgerea următoarelor etape:

- studiu bibliografic, analiza și interpretarea informațiilor obținute;
- cercetarea documentară cu privire la influența variației temperaturii oțelului lichid la nivelul oală de turnare – distribuitor - cristalizor asupra defectelor de suprafață și interne ale semifabricatelor;
- cercetări și experimentări în fază de laborator;
- cercetări și experimentări industriale;
- cercetări și experimentări cu ajutorul programelor Matlab, Mathcad14, Microsoft Excel, Minitab v.17 și a limbajului de programare C++ și tcr;
- contribuții originale.

Pentru realizarea obiectivelor propuse lucrarea a fost structurată astfel:

- studiu documentar privind turnarea continuă a oțelului:
  - studiu procesului de elaborare a oțelului în cuptoarele cu arc electric, de tip E.B.T., procesare în instalații de tip L.F. și a turnării continue;
  - stadiul actual al cercetărilor privind regimul termic la turnarea continuă a oțelului;
  - importanța regimului termic la nivelul oala de turnare – distribuitor - cristalizor asupra calității oțelului și scoaterii de metal.
- cercetări și experimentări proprii privind modelarea matematică a regimului termic la turnarea continuă a oțelului:
  - cercetări și experimentări industriale privind elaborarea oțelului în cuptoare cu arc electric tip E.B.T, procesarea în instalația L.F. și turnarea continuă sub formă de semifabricate cu secțiune circulară destinate fabricării țevilor;
  - influența regimului termic al oțelului din distribuitor și cristalizor asupra defectelor de suprafață și interne;
  - simularea solidificării țagelilor rotunde turnate continuu cu diametru de 350mm cu 3% adaos de micro răcitori în cristalizor.
- concluzii finale recapitulative, contribuții originale, direcții de continuare a cercetărilor



## 1.4. Concluzii

Alegerea temei de doctorat în domeniul cercetării este justificată de ipotezele prezentate în cadrul prezentului capitol și generează următoarele concluzii emise de către autor:

- pe baza studiului literaturii de specialitate și experimentărilor industriale consider că analiza regimului termic la procesul de elaborare și turnare a oțelului reprezintă un proces care merita în permanență să fie studiat și optimizat.
- stabilirea unor corelații între principalii parametri ai turnării continue și anume: temperatura de turnare, viteza de turnare și parametrii răcirii primare și secundare reprezintă punctul de plecare pentru studiul optimizării transferului de căldură la turnarea continuă a oțelului;
- modelarea matematică și simularea reprezintă în prezent cel mai rapid și ieftin mod de a studia diverse procese tehnologice în vederea optimizării acestora.





## **PARTEA I**

### **STUDIU DOCUMENTAR PRIVIND TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI**

#### **2. STUDIUL PROCESULUI DE ELABORARE A OȚELULUI ÎN CUPTOARELE CU ARC ELECTRIC, DE TIP EBT ȘI A TURNĂRII CONTINUE**

##### **2.1. Analiza procesului de elaborare a oțelului în cuptoarele electrice cu arc, de tip EBT (Excentric Bottom Tapping)**

###### **2.1.1. Considerații tehnologice**

În epoca industrializării societății mondiale, tehnologiile de fabricație a oțelurilor, considerat ca cel mai important material metalic în construcții industriale și infrastructură, au avut drept suport tehnic, în principal următoarele tipuri de agregate termice: convertizoare cu oxigen (tip LD), cuptoare electrice cu arc și cuptoarele Siemens-Martin. După intrarea în funcțiune a convertizoarelor cu oxigen (LD) în 1952 s-a redus simțitor ponderea oțelului elaborat în cuptoarele Siemens Martin, astfel încât în prezent aceasta este sub 1%.

În aceeași perioadă s-a introdus în practică turnarea continuă, astfel încât în prezent ponderea acesteia depășește ponderea de 95% din totalul de oțel turnat (continuu, sub presiune și lingou).

În ceea ce privește România ca urmare a restructurării economice care s-a produs după 1989, cele 4 oțelăriile Siemens Martin au fost dezafectate, ultima O.S.M.II Hunedoara în iunie 1999. Ca urmare au rămas ca agregate de bază pentru elaborarea oțelului convertizoarele cu oxigen și cuptoarele electrice cu arc. Toate oțelăriile au fost echipate cu instalații de turnare continuă.

Ca urmare a privatizării industriei siderurgice românești, în oțelăriile electrice care au rămas funcționale după restructurarea economică, au fost instalate cuptoare electrice cu arc moderne tip EBT (Excentric Bottom Tapping) echipate cu transformatoare de mare și foarte mare putere. De asemenea în aceste oțelării au fost instalații de turnare continuă și ca urmare acestea pot fi considerate oțelării moderne.

###### **2.1.2. Descrierea agregatului cuptorului electric cu arc EBT**

Cuptorul electric cu arc, ca urmare a perfecționărilor aduse din punct de vedere constructiv și tehnologic este preferat la elaborarea oțelului care urmează a fi turnat continuu. Se are astfel în vedere că se pot elabora atât oțeluri carbon obișnuite sau oțeluri slab aliate, cât și oțeluri înalt aliate, aceste cuptoare construindu-se în limite foarte largi de capacitate [1,2,5].

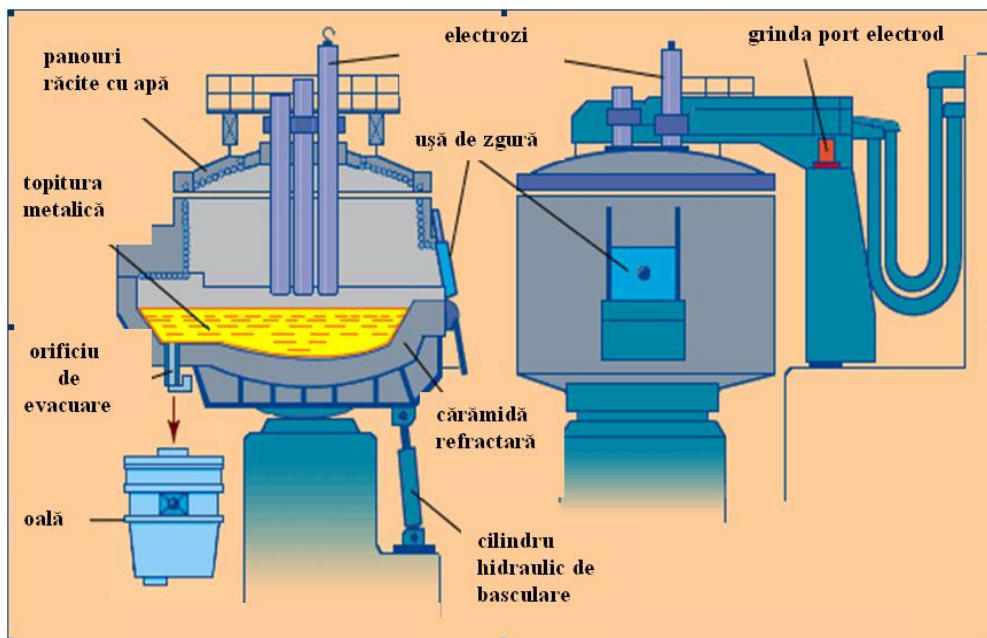
Acest tip de cuptor este prevăzute cu o instalație de desprăfuire a gazelor arse, concentrația de pulberi realizată la emisie având concentrații scăzute de sub 20 mg/m<sup>3</sup>. Agregat tipic pentru topire, cuptorul electric cu arc este alimentat cu curent electric trifazat prin trei electrozi verticali. Arcul electric, se formează între cei trei electrozi prin încărcătura metalică.

Transformarea cuptorului electric în „mașină de topire” și cuplarea acestuia cu instalații de tratament în oală a impus testarea și implementarea de soluții pentru evacuarea din cuptor a oțelului fără zgură, condiție esențială la tratamentul în oală.

Evacuarea fără zgură și într-un timp cât mai scurt au fost principalele deziderate care au condus la ideea evacuării oțelului din cuptor pe la partea inferioară a vetrei.

Acest sistem satisface principalele necesități tehnologice, permițând întreruperea controlată a procesului de evacuare prin înclinarea cuptorului.

Orificiul de evacuare, care în ideea proiectanților era amplasat exact în centrul vetrei, a fost deplasat mai aproape de peretele cuptorului, caracterul de excentric fiind conferit de abaterea de 600-800mm față de centrul vetrei (figura 2.1.)



**Fig.2.1.** Cuptorul electric cu arc de tip EBT, [5,14]

Înainte de încărcare, orificiul de evacuare este umplut cu material refractar uscat, care sinterizează în timpul procesului de topire, în contact cu oțelul lichid. Când orificiul este deschis pentru evacuare, materialul de umplere cade, permițând curgerea oțelului.

Pentru a preîntâmpina antrenarea zgurii, cuptorul se înclină în timpul reșarjării la 4-6°, baia remanentă (10-15% din totalul de oțel lichid) permițând reșinerea integrală a zgurii.

După reșarjare, cuptorul este adus în poziția normală, se curăță orificiul cu o lance de oxigen, se închide clapeta sau sertarul, se umple cu masă refractară și se începe re-încărcarea. Toate aceste operațiuni durează circa 3 minute.

Caracteristicile tehnice ale unui cuptor EBT sunt prezentate în tabelul 2.1 respectiv în tabelul 2.2. unde se evidențiază parametrii medii de exploatare ai cuptorului [2].

Dintre modernizările prezentate anterior, acest cuptor este dotat cu:

- evacuare prin vatră;
- pereți răciți cu apă;
- injectare carbon-oxigen;
- transformator de putere mare;
- arzător oxigaz.

**Tabelul 2.1.** Caracteristicile tehnice ale cuptorului electric tip EBT, [2]

Nr. crt.	Caracteristica	Valoarea
1.	Capacitatea nominală	100 tone
2.	Puterea transformatorului	75 MVA
3.	Tensiune în primar	35 kV
4.	Tensiune în secundar	70-650 V
5.	Diametru electrozi	610 mm
6.	Diametru cuvă	6200 mm
7.	Arzătoare oxigen	5
8.	Lănci răcite cu apă	2 (oxigen +cărbune)
9.	Rest oțel lichid	15t

**Tabelul 2.2.** Parametri medii de exploatare ai cuptorului electric tip EBT, [2]

Nr. crt.	Parametrul	Valoarea parametrului
1.	Încărcare cuptor	3 bene
2.	Consum energie	440 kWh/t
3.	Consum electrozi	2,55 kg/t
4.	Consum oxigen	11,75 Nm <sup>3</sup> /t
5.	Tap-to-tap	112 min
6.	Timp sub sarcină	72%
7.	Temperatură evacuare	1635 °C

### 2.1.3. Procesul tehnologic de elaborare a oțelului într-un cuptor electric de tip EBT

Din punct de vedere a etapelor de elaborare (figura 2.2), acestea sunt similare cu cele de la un cuptor electric clasic, existând însă mici diferențe, avându-se în vedere modernizările suferite de cuptorul electric. Astfel, în cele ce urmează, sunt punctate aceste diferențe și modul în care acestea influențează calitatea oțelului elaborat.



**Fig.2.2.** Fazele de elaborare în cuptorul electric E.B.T., [5,15]

În primul rând, cartea tehnică a cuptorului de tip EBT indică etapele și timpii aferenți – tabelul 2.3.

**Tabelul 2.3.** Durate de elaborare la cuptorul EBT, [2, 5]

<b>Etapă elaborare</b>	<b>Durăță, [min]</b>
Ajustare	6
Încărcare	6
Topire	47
Afinare	9
Evacuare	4
<b>TOTAL</b>	<b>72</b>

**Ajustarea** are loc după fiecare elaborare, după ridicarea și rabaterea bolții cu electrozi și constă în înlăturarea deteriorărilor chimice și mecanice ale pereților și ale vetrei cuptorului. Aceasta se execută prin aruncarea uniformă a dolomitei și a magnezitei arse în cavitățile din vatra cuptorului în vederea astupării acestora. Durata este de cca.5min (de la 20min după eliminarea timpilor morți). Reparațiile mai mari se fac o dată la 2-6 săptămâni, după un program bine stabilit.

**Încărcarea** cuptorului electric se face cu ajutorul benelor în mod mecanizat. Încălzirea încărcăturii se suprapune cu perioada de încărcare.

La încărcarea cuptorului se are în vedere în primul rând gradul de pregătire al încărcăturii, aceasta reprezentând o prioritate în secțiile de pregătire materii prime. Astfel, încărcătura EBT trebuie să corespundă atât din punct de vedere al compoziției chimice cât și condițiilor topirii - să formeze rapid o baie lichidă cu scopul de a proteja vatra, pereții și bolta împotriva radiației căldurii de la arcul electric.

De asemenea, trebuie ținut seama de aceleași reguli care se aplică și la un cuptor clasic privind ordinea în care se face încărcarea materialelor metalice în benă și durata încărcării, având în vedere că aceasta se realizează cu bolta ridicată, ceea ce înseamnă o pierdere de energie de 10-20kWh/t la fiecare ridicare a bolții.

Încărcătura este formată în proporție de 97,5-100% fier vechi iar diferența o reprezintă fontă solidă sau spărturi de electrozi. În cazul în care în încărcătură nu este prevăzută și o anumită cantitate de fontă - pentru obținerea unui <C> necesar, acesta va fi insuflat în timpul afinării sub formă de pulbere de grafit.

La **pregătirea și alcătuirea încărcăturii** trebuie să se țină seama de scopul propus și în același timp, în funcție de conjunctura economică, de disponibilitățile de moment în materii prime și materiale de adaos.

Pregătirea încărcăturii vizează în principal o mai bună utilizare a agregatului de elaborare în sensul micșorării duratei de topire, a pierderilor termice și a creșterii durabilității căptușelii refractare.

Există însă cuptoare la care încărcarea se face continuu, pe la partea superioară, nefiind necesare bene de încărcare.

**Topirea** reprezintă o fază foarte importantă a elaborării, cuptoarele electrice cu arc datorită modificărilor aduse, în agregate performante de topire.

Durata topirii este determinată de gradul de pregătire a încărcăturii, de compactarea încărcăturii, de puterea transformatorului și de conducerea topirii. În timpul topirii, în paralel cu procesul fizic al trecerii încărcăturii în stare lichidă au loc procese fizico-chimice de oxidare a elementelor și de formare a zgurii.

Căldura necesară topirii provine din două surse:

- energia degajată de arcul electric formată între electrozii din grafit. Inițial se stabilește o tensiune intermediară, pe durata căreia cca.15% din încărcătură este topită. După ce electrozii pătrund prin încărcătură, tensiunea este mărită la o treaptă superioară iar căldura radiată de arcul electric format nu mai are o influență atât de negativă asupra bolții. După stabilizarea completă a arcului electric, se poate trece la o putere mărită a transformatorului.
- energia chimică, asigurată de arzătoarele oxi-gaz sau lancea de oxigen.

Arzătoarele oxi-gaz (de regulă în număr de 5) utilizează un amestec de gaz metan și oxigen sau oxigen și aer. Căldura degajată prin arderea acestui combustibil este transferată încărcăturii prin radiație și convecție de către produsele arderei, iar în interiorul încărcăturii prin conducție.

Bucățile mai mari de fier vechi se topesc de regulă mai greu decât fierul vechi mijlociu sau mărunț. În aceste cazuri se utilizează insuflarea prin țevă consumabilă a oxigenului gazos care „taie” aceste bucăți. Odată ce este formată o baie metalică, insuflarea se poate face direct în aceasta, caz în care oxigenul reacționează cu elemente din baie, oxidându-le (C, Mn, Si, P, Al, Fe).

Aceste reacții sunt exoterme (cu cedare de căldură) ceea ce duce la creșterea căldurii din proces. Produsele rezultate trec în zgură sau în gazele de ardere.

Spre sfârșitul topirii este redusă tensiunea în electrozi, prelevându-se totodată probă pentru determinarea compoziției chimice și determinarea temperaturii.

Procesele metalurgice care au loc până la sfârșitul **perioadei de topire** sunt legate în principal de transferul de masă și energie.

**Afinarea** reprezintă perioada în care este continuat procesul de oxidare al elementelor însoțitoare din baia metalică: C, Mn, Si, P, S.

În prezent, tehnologia aplicată la cuptorul de tip EBT prevede o insuflare de grafit de cca. 200-1120 kg/șarjă care, concomitent cu o insuflare de oxigen prin lance răcită cu apă dau valori ale vitezei de decarburare cuprinse în intervalul 1-4% C/h. Se are în vedere și durata fierberii, respectiv de 15-30min.

Oxidarea C la forma CO are loc cu degajarea unei cantități relativ mari de căldură (30-40% din necesarul de căldură). Totodată cu eliminarea CO are loc și degazarea oțelului, respectiv îndepărtarea azotului (la valori de 60-80ppm) și respectiv a hidrogenului (de la 8ppm la 2ppm în 10min).

Manganul poate scădea de regula la 0,06%, reacția de oxidare a acestuia



având loc simultan cu oxidarea C.

În ceea ce privește îndepărtarea fosforului, aceasta este posibilă în proporție de 20-50% din <P>. Însă, dacă temperatura este ridicată și respectiv la un conținut scăzut de FeO în zgură poate avea loc refoforarea băii metalice.

Desulfurarea este posibilă mai ales în oala de turnare (sub o zgură sintetică) sau în agregatul de tratament secundar.

În cea mai mare parte, afinarea se suprapune cu ultima parte a topirii

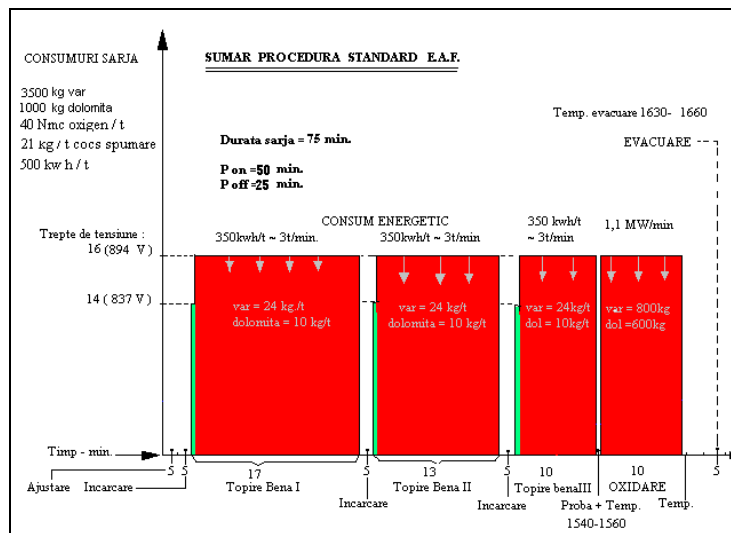
Înainte de evacuarea oțelului din cuptor are loc îndepărtarea zgurii mai ales având în vedere conținutul bogat în compuși ai fosforului. Există posibilitatea injectării de C în zgură în scopul reducerii FeO la forma Fe care difuzează în baie iar formarea de CO ajută la spumarea zgurii.

În tabelul 2.4 este prezentată compoziția chimică a zgurii și sursele de proveniență a oxizilor prezenți.

**Tabelul 2.4.** Componența și compoziția zgurii de la afinare [2, 5]

Component	Sursa	Cantitate, [%]
CaO	încărcătură (var)	40-60
SiO <sub>2</sub>	oxidarea Si	5-15
FeO	oxidarea Fe	10-30
MgO	încărcătură (dolomită)	3-8
CaF <sub>2</sub>	încărcătură (fluorină de calciu)	1-3
MnO	oxidarea Mn	2-5
S	difuzat din oțel	0,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	oxidarea P	0,05

**Evacuarea** (turnarea în oala de turnare) se realizează imediat ce compoziția chimică și temperatura sunt satisfăcătoare, prin deschiderea orificiului de turnare. Oțelul este turnat în oala de turnare, fiind pregătit pentru următoarea operație, dezoxidarea. Se recomandă utilizarea dezoxidanților de tipul FeSi, SiMn și eventual Al pentru șarjele care nu se toarnă continuu.



**Fig.2.3.** Schema procesului tehnologic de elaborare [2, 5]

Pentru a asigura condiții corespunzătoare obținerii unei calități superioare este recomandabil ca la elaborarea oțelurilor să se utilizeze încărcături metalice de calitate bună, neruginite și cu conținut mic de fosfor și sulf (de dorit sub 0,04%), pe cât posibil fără metale neferoase (Cu, Sn, Zn, Pb etc), beton, resturi refractare, pământ etc. Încărcătura metalică trebuie pregătită astfel încât să se asigure încărcarea ei rapidă.

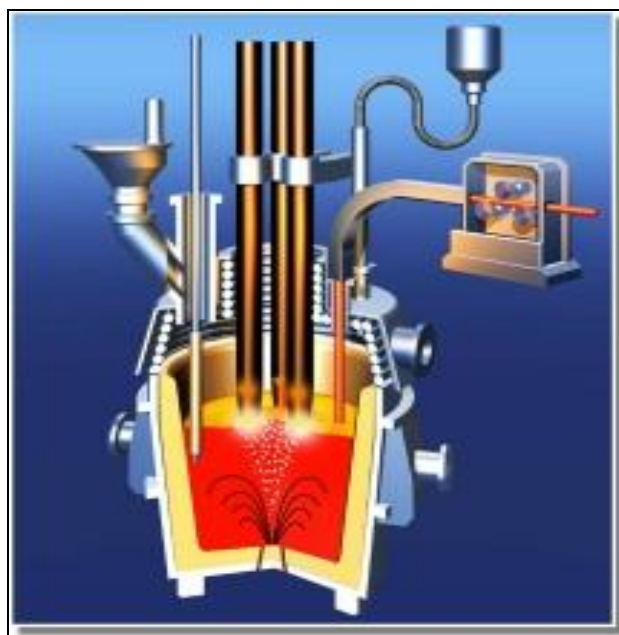
Proporțiile de materiale din întreaga componență a încărcăturii se stabilesc pe baza ecuațiilor de bilanț a elementelor oxigen și carbon.

Procesul de elaborare este controlat cu ajutorul a 4 calculatoare de proces amplasate în cabina de comanda a cuptorului.

## 2.2. Tratamentul secundar al oțelului în oala de turnare

### 2.2.1. Construcția instalației L.F. (Ladle-Furnace)

Introducerea în fluxul tehnologic de elaborare a oțelului a tehnologiilor de procesare a oțelului în oala de turnare (la început fără aport de căldură urmate de cele cu aport de căldură) pe lângă faptul că au redus durata șarjei (evident creșterea productivității), consumul specific de energie electrică determinat creșterea calității oțelurilor.



**Fig.2.4.** Schema de principiu a instalației de tratament secundar de tip Ladle Furnace, [16]

Procedeele LF (Ladle Furnace) valorifică potențialul efect al rafinării oțelului prin încălzirea cu arc electric la presiune atmosferică și amestecării sub influența injectării gazelor inerte.

Schema de principiu a instalației LF de rafinare a oțelului lichid este prezentată în figura 2.4. iar construcția instalației în figura 2.5.



**Fig.2.5.** Instalația de tratament secundar de tip LF,[5]

Instalația LF este asemănătoare din punct de vedere constructiv cu instalația VAD. Astfel, cuptorul – oală, este prevăzut cu închizător cu sertar și cu sistem de insuflare a argonului prin dop poros ceramic, pentru omogenizarea temperaturii. De menționat că omogenizarea băii se poate face și prin agitare electromagnetă. Pe durata desfășurării operațiilor tehnologice, pentru protecție împotriva excesului de radiații, cuptorul – oală este acoperit cu un capac răcit cu apă, în care sunt practicate orificii pentru cei trei electrozi și pentru introducerea adaosurilor în vederea formării zgurii reducătoare, a feroaliajelor (inclusiv sub formă de sârmă, respectiv fir umplut) introducerea adaosurilor din alimentator, pentru prelevarea probelor și pentru măsurarea temperaturii băii metalice. Gazele și praful rezultate din proces sunt captate prin intermediul unei hote și exhaustate după epurare. Unele instalații sunt prevăzute cu posibilități de menținere a unei atmosfere neutre între capac și oțelul lichid, [2, 3, 5, 6].

Încălzirea băii metalice se asigură pe baza arcului electric. Electrozii cuptorului – oală sunt conectați la transformator prin intermediul rețelei scurte, a cablurilor flexibile răcite cu apă și a conductorilor, răciți de asemenea cu apă. Arcele electrice formate între electrozi și topitura metalică sunt controlate automat. O caracteristică a funcționării arcului electric este aceea că el lucrează acoperit, sub stratul de zgură, aspect care permite reducerea radiațiilor termice și o transmisie mai bună a căldurii către baie, [2, 3, 5, 6].

Căptușeala refractară a recipientului de tratament metalurgic este realizată din materiale super-aluminoase, iar în planul zgurii din cromito-magnezit. Pe mantaua de oțel a oalei, după stratul de azbest, se zidește un strat din cărămizi de șamotă, cu 40%  $Al_2O_3$ .

### 2.2.2. Funcționarea instalației LF

Instalațiile LF funcționează în sistem duplex cu agregatul de elaborare primară, cuptorul electric cu arc sau convertizorul cu suflare de oxigen.

Pe durata procesului de tratament în instalația LF au loc următoarele operații tehnologice (prezentate și în figura 2.6) în cazul unei oale de capacitate 100 t oțel lichid, [2, 5, 6]:

- barbotare la cuptor, timp de circa 5 minute și o serie de adaosuri la oală, adaosuri constând în feroaliaje pentru continuarea dezoxidării (FeMn, FeSi, la unele șarje Al) și alte materiale pentru obținerea unei zguri desulfurante (var,bauxita).

- preluarea oalei cu oțel lichid pe transferarul LF, conectarea la rețeaua de barbotare, poziționarea transferarului (oala cu oțel) sub capacul LF, măsurarea temperaturii oțelului în oală, prelevarea probei de compoziție chimic și reglarea debitului de barbotare cu argon în jurul valorii de 45l/min;

- înainte de începerea tratamentului secundar, se imersează aluminiu sub formă de sârmă și silico-calciu sub formă de fir umplut;

- încălzirea cu arc electric și formarea zgurii de rafinare prin adaosuri de var (1800 kg) și bauxită (600 kg) în 3 porții egale (600 var+200 bauxită), timp de 20 min. În acest timp, după formarea zgurii se fac adaosurile de FeSi, grafit, FeMn și SiMn în cantitățile necesare pentru încadrarea în ecarterile chimice corespunzătoare mărcii de oțel din programul de elaborare;

- se decuplează arcul electric, se măsoară temperatura oțelului, se prelevează proba de compoziție chimică intermediară;

- se procedează la încălzirea finală pentru încadrarea în limitele de temperatură specifice fiecărei mărci de oțel (4-8 min.), timp în care se fac corecțiile finale la compoziția chimică a oțelului;

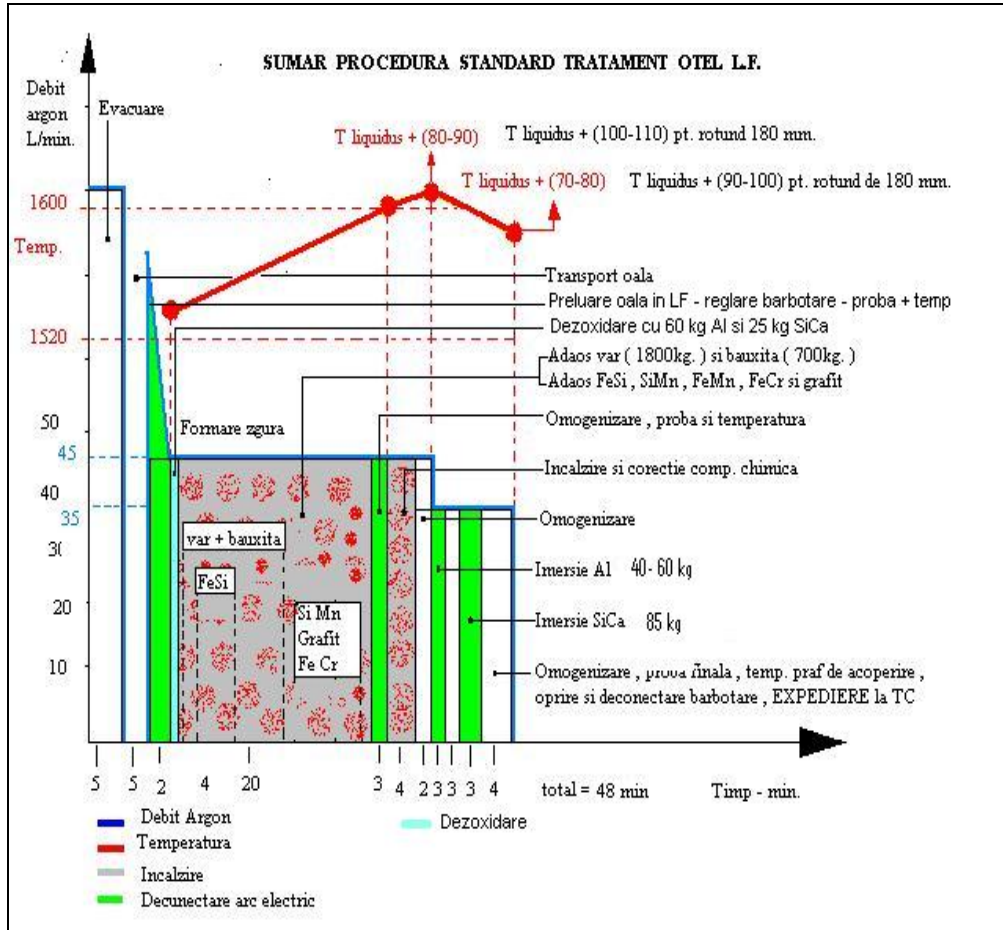
- se reduce intensitatea barbotării la un debit de Argon de 35 l/ min;

- se adaugă prin imersare de Al fir (40-60 kg) și după o pauză de 3-4 min, se imersează SiCa fir (90 kg.);

- după 4min. de omogenizare, se prelevează proba finală de compoziție chimică, se măsoară temperatura oțelului, se adaugă praf de acoperire pe zgură , se oprește și se deconectează barbotarea cu Argon și se expediază oala cu oțel la mașina de turnare continuă;

- se preia șarja (oala) următoare;

- timp total de tratament secundar este de 44 - 50 min.



**Fig.2.6.** Schema procesului tehnologic de tratare în oala de turnare (LF), [2, 5]

Procesul tehnologic de tratament secundar este condus prin intermediul unui sistem computerizat de control care optimizează funcționarea instalației LF.

### 2.2.3. Efecte tehnico - economice

În instalația de tratament secundar LF se realizează corecția compoziției chimice, formarea unei zguri corespunzătoare (activă) pentru o bună degazare, desulfurare și dezoxidare și încadrarea temperaturii oțelului în limitele prescrise de tehnologia de turnare continuă.

Procesarea oțelului în instalația LF asigură obținerea următoarelor efecte metalurgice, [2, 3, 4, 6, 9, 12]:

- reglarea temperaturii oțelului lichid;
- corecția compoziției chimice;
- dezoxidarea și desulfurarea cu sau fără zguri sintetice;
- îmbunătățirea purității oțelului în incluziuni nemetalice și degazarea.

Între aceste efecte și factorii care le condiționează există o strânsă interdependență, reflectată și de succesiunea etapelor procesului și anume:

- a. la adaosul zgurilor sintetice se realizează:

- ecranarea arcului electric, cu efecte benefice asupra randamentului termic, micșorării uzurii materialelor refractare ale cuptorului - oală;
  - reducerea contactului băii metalice cu atmosfera oxidantă;
  - desulfurarea;
  - dezoxidarea;
  - creșterea purității incluzionare.
- b.** încălzirea oțelului cu o viteză de 3-5 °C/min permite:
- topirea varului, a fluorinei și obținerea unei zguri reducătoare, fluide și active;
  - injectarea materialelor pulverulente cu caracter desulfurant;
  - adaosul elementelor speciale de dezoxidare-aliere, a firelor de aluminiu sau a celor umplute cu elemente dezoxidante sau modificatoare.
- c.** injecția argonului duce la:
- omogenizarea compoziției chimice și a temperaturilor topiturilor metalice;
  - intensificarea reacțiilor zgură-topitură, mai ales în cazul desulfurării;
  - flotarea și decantarea incluziunilor nemetalice și, ca urmare, îmbunătățirea purității în incluziuni nemetalice a oțelului.

Efectele economice care se obțin în urma desfășurării procesului de elaborare - rafinare a oțelului pe ansamblul duplexului metalurgic CAE - LF se reflectă în:

- reducerea temperaturii de evacuare din agregatul primar de elaborare cu 40-80°C;
- scurtarea duratelor de elaborare în agregatul primar;
- micșorarea uzurii și a consumului de materiale refractare cu 10-20%, datorită funcționării cu temperatură mai scăzută;
- scăderea consumului energetic cu 20-50kWh/t și a celui de electrozi cu 0,1-0,2kg/t.

## 2.3. Analiza procesului de turnare continuă a oțelului

### 2.3.1. Generalități

Progresul extrem de rapid al turnării continue a oțelului atât din punct de vedere metalurgic, cât și în ceea ce privește construcția instalațiilor, a permis ca acest procedeu să se răspândească larg în industrie.

Pe lângă preocupările pentru utilizarea cât mai intensă a acestui procedeu, specialiștii își îndreaptă tot mai mult atenția asupra îmbunătățirii caracteristicilor mașinilor de turnare, a calității semifabricatelor obținute ca și a trecerii pe acest flux a unui număr tot mai mare de mărci de oțel, [7].

În ceea ce privește construcția mașinilor de turnare continuă, în ultima perioadă nu s-au făcut modificări esențiale, tipul construcției utilizat în prezent fiind cel cu cristalizor și fir curbat după o singură rază .

Preocupările în acest domeniu se referă mai ales la posibilitatea creșterii cantității de oțel turnat și la îmbunătățirea calității acestuia, [5, 8].

### 2.3.2. Tipuri de instalații

Instalațiile cu fir curbat de tip I se pretează la turnarea cu viteză scăzută a semifabricatelor cu secțiuni mari și a țevelor cu diametru mare, complicând și ridicând posturile construcției – figura 2.7.

La instalațiile de tipul II (a), cu solidificare verticală și curbarea firului la orizontală, se reduce parțial înălțimea de construcție (în medie cu 20%), care ajunge până la 30 m.

La astfel de instalații, prin curbarea și îndreptarea firului se pot introduce tensiuni interne și chiar fisuri locale în material, datorită rezistenței mecanice reduse la temperaturile de ieșire din zona de răcire secundară (850 – 950 °C).

Acest lucru permite obținerea unor semifabricate de oțel cu grosimi maxime de 250–270 mm pentru secțiunile pătrate și dreptunghiulare, pe secțiunile circulare limita este și mai coborâtă.

O reducere în continuare a înălțimii instalației, evidențiată la tipul II (b), fixează limita superioară a acestuia la 25 m și în aceste cazuri, la turnarea semifabricatelor apare pericolul apariției tensiunilor și fisurilor în material. Este recomandat la obținerea unor sortimente variate calitativ și dimensional.

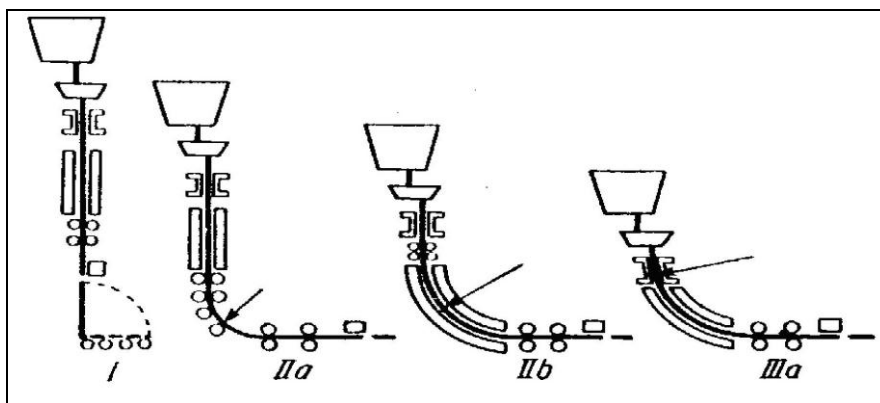


Fig.2.7. Tipurile de turnare continuă verticală a oțelului, [19]

Utilizarea mașinilor de turnare continuă de tipul III (a) conduce la o reducere a cheltuielilor de investiții cu 20% pentru hală și pentru instalații auxiliare. Reducerea înălțimii față de tipul I este de 60 – 70 %.

Micșorarea presiunii ferostatice din coloana de metal lichid a permis mărirea vitezei de turnare, facilitată și de mărirea capacității de răcire a cristalizorului, simultan cu mărirea secțiunii de turnare, acest tip de instalație reprezintă varianta cea mai răspândită în prezent, [2, 7, 8, 9, 12, 19]

### 2.3.3. Elementele instalației de turnare continuă cu fir curbat

În prezent în țările dezvoltate circa 90% din oțelul lichid este turnat continuu. Japonia cel mai mare producător din țările industrializate toarnă continuu 93% din oțelul elaborat.

Din țările Comunității Europene, Franța și Italia toarnă continuu 94% din producția de oțel, Germania peste 90%, iar toată Comunitatea Europeană 84%. Marea majoritate a țărilor vestice toarnă continuu peste 60% din producție. Turnarea continuă este foarte răspândită și poate fi aplicată la aproape orice marcă de oțel, având numeroase avantaje, [6, 9, 10].

Noile dezvoltări în turnarea continuă au oferit producătorilor de oțel alternative la turnarea continuă convențională, prin scăderea dimensiunilor semifabricatelor, în sensul apropierei lor de dimensiunea finală.

Tendința producătorilor de a se apropia cât mai mult de dimensiunea finală

prin turnare continuă își găsește justificarea prin economiile importante de energie care sunt realizate în urma scurtării reducerii (simplificării) fluxului tehnologic (energie necesară atât încălzirii, cât și lucrului mecanic de deformare), prin micșorarea pierderilor de metal în timpul procesării și prin eliminarea unor instalații care presupuneau investiții, personal, întreținere.

Problema majoră a apropierii semifabricatului turnat continuu de dimensiunea produsului finit este cuplarea "în linie" a mașinii de turnat continuu cu laminorul, urmărindu-se valorificarea optimă a căldurii fizice a semifabricatului și implicit mărirea productivității.

Instalațiile de turnare continuă indiferent de varianta tehnologică (orizontală, verticală sau cu fir curb) au următoarele părți componente: distribuitor, cristalizor, sistemul de răcire secundară, sistemul de ghidare și de tragere, sistemul de debitare și sistemul de basculare.

#### **2.3.3.1. Oala de turnare**

Reprezintă elementul de legătură între cuptorul de elaborare a oțelului și mașina propriu-zisă de turnare continuă și trebuie să îndeplinească o serie de funcții tehnologice, dintre care cele mai importante sunt: menținerea unei temperaturi cât mai constante a oțelului; separarea cât mai completă a zgurii; curgerea cât mai liniștită a metalului și debit constant de turnare. În același timp, oala de turnare trebuie să prezinte o siguranță cât mai mare în exploatare și o durabilitate avansată a căptușelii refractare.

Capacitatea oalelor de turnare variază între limite largi, în funcție de dimensiunile semifabricatelor, numărul firelor, viteza de turnare, de căderile admisibile de temperatură a oțelului lichid, precum și de necesitatea preluării întregii șarje din agregatul de elaborare. Astfel cele mai mici instalații industriale, care toarnă țagle cu productivități reduse, sunt alimentate cu oale de 5-10t capacitate, în timp ce instalațiile noi de sleburi mari folosesc oale până la 300-400 t capacitate.

Deoarece tehnologia modernă de turnare continuă se bazează pe turnarea întregii șarje într-o singură oală (divizarea șarjelor prezintă dificultăți în ceea ce privește sincronizarea turnării și conduce la căderi mai mari de temperatură), capacitatea oalelor de turnare este egală, în general, cu capacitatea cuptorului de elaborare, [11, 12].

Căderile practice de temperatură variază astfel: 0,10°C/min pentru șarjele de 250 t, 0,30°C/min pentru șarjele de 100 t, 0,70°C/min pentru șarjele de 50 t și 10°C/min pentru șarjele de 20 t. Căptușeala oalei, care nu este nevoie să difere de cea a oalelor utilizate pentru turnarea convențională a lingourilor, depinde de cerințele locale și de metoda intenționată de tratament în oală, [6, 20].

Căptușelile bazice ale oalei sunt utilizate în special pentru turnare continuă a profilelor rotunde deoarece turnarea acestora necesită de obicei tratament intensiv al oțelului în oală.

Durabilitatea medie este în general de 20-30 șarje (și peste) pentru pereții oalei și 10-15 șarje pentru fund.

Dacă insuflarea cu oxigen prin lance durează prea mult timp, distribuitorul și tuburile de imersie se răcesc prea mult și pot cauza probleme majore pentru începerea turnării. Când se folosește un nisip adecvat și o practică corectă de umplere, frecvența de "deschidere" ar trebui să fie de circa 95%.

În vederea uniformizării temperaturii băii metalice se prevede barbotarea (agitarea) oțelului cu gaze inerte (argon, azot), realizată ori cu lănci de gaz introduse în baia de oțel prin partea de sus sau prin cărămizi poroase amplasate la



fundul oalei.

Lăncile oferă avantajul că sunt independente de oală, dar efectul de agitare este inferior celui realizat prin introducerea gazului inert pe la partea inferioară a oalei, deoarece reacția de agitare nu începe de la fundul oalei.

Prin urmare, lăncile ar trebui introduse destul de adânc în oală, aproape de fundul ei.

Barbotarea cu introducerea gazului pe fundul oalei, utilizând dacă este posibil 2-3 cărămizi poroase, asigură o agitare mai eficientă. De asemenea, prezintă avantajul că barbotarea poate fi deja începută în timpul golirii cuptorului. Riscul producerii unor avarii la oala de turnare este minim, dacă materialele din care sunt confecționate părțile componente ale ansamblului de insuflare a gazului inert sunt adecvate și dacă se supraveghează cu atenție uzura oalei, [5,,6].

Timpul de agitare ar trebui să fie de cel puțin 7 minute dar preferabil 10 minute sau mai multe minute pentru a realiza o omogenizare satisfăcătoare a temperaturii, compoziției chimice și pentru a aduce o îmbunătățire a purității oțelului.

O perioadă scurtă de așteptare de 10-15 minute trebuie să fie între sfârșitul agitării și începutul turnării pentru a permite oxizilor din topitură să se ridice la suprafață/să decanteze. Timpul necesar pentru transportul oalei din oțelărie la mașina de turnare sau timpul necesar pentru analiza probelor din oală poate fi utilizat ca parte a perioadei de așteptare.

Prin urmare, nu este de dorit să se agite oțelul în oală pe turnul rotitor sau alt suport al oalei de pe mașina de turnare și apoi să se înceapă turnarea. Dar dacă timpul de așteptare după agitare este foarte lung, se poate folosi o reagitare scurtă (necesară pentru omogenizarea termică) chiar înainte de a începe turnarea.

Șarjele turnate fără zgură sau cu puțină zgură, trebuie acoperite în oală, cu un compus de izolare (prafuri termoizolante) pentru a evita sau a reduce scăderea de temperatură și pentru a împiedica reoxidarea. Desigur astfel de compuși nu ar trebui să reacționeze cu oțelul și nu ar trebui să formeze o zgură foarte fluidă care ar putea fi absorbită în distribuitor și posibil în cristalizor.

Semifabricate turnate continuu cu conținut scăzut de incluziuni nemetalice oxidice se pot produce doar dacă oțelul lichid este protejat împotriva reoxidării de către oxigenul din aer.

Gradul de puritate este de o mare importanță pentru calitatea produsului turnat. Scopul protecției oțelului împotriva reoxidării între oală și distribuitor este să alimenteze cristalizorul mașinii de turnare cu oțel cu conținut scăzut de impurități de oxizi. Măsurile privind reducerea impurităților de oxizi din oțel trebuie să înceapă deja în timpul procesului de elaborare a oțelului.

Este necesară de asemenea acoperirea băii de oțel din oală și distribuitor cu compuși neutri de izolare cu conținut scăzut în FeO, pentru a evita reoxidarea, de o importanță deosebită fiind protecția împotriva reoxidării între oală, distribuitor și cristalizor.

### **2.3.3.2. Distribuitorul**

Distribuitorul servește mai multor scopuri în același timp. Un distribuitor urmează să distribuie oțel tuturor cristalizoarelor fără pierderi majore de căldură și trebuie să permită impurităților grosiere să se ridice la suprafața băii de metal. Distribuitorul trebuie să servească de asemenea ca o capacitate tampon între oală și cristalizoare, să permită controlul fluxului de oțel în cristalizoare și trebuie să ofere suficientă capacitate de stocare pentru schimbarea oalei în cazul turnării secvențiale.

Fundul și pereții laterali trebuie să fie drepecți, fără colțuri inutile pentru a evita eroziunea sau „înghețarea” oțelului. Distribuitorul trebuie să fie suficient de înalt pentru a asigura întotdeauna o adâncime suficientă a băii de oțel, chiar atunci când oalele sunt schimbate astfel încât zgura sau compusul de acoperire să nu poată curge prin orificiile distribuitorului în cristalizoare.

Practica a demonstrat că o adâncime adecvată a distribuitorului este de circa 600mm pentru distribuitoare controlate cu dispozitive de oprire. Capacitatea distribuitorului trebuie să fie destul de mare pentru a reduce viteza de turnare inutilă când alimentarea acestuia cu oțel este întreruptă în timpul schimbării oalei. În funcție de viteza de turnare și numărul de fire, capacitatea distribuitorului poate fi în domeniul 12-35 tone. Un distribuitor trebuie să aibă un jgheab de revărsare pentru a evita revărsarea necontrolată în cazul unui distribuitor cu funcționare liberă[8,9].

### 2.3.3.3. Tubul de imersie

Turnarea continuă cu tuburi de imersie este practica generală pentru toate dimensiunile de fire suficient de mari. Tubul de imersie servește unui rol multiplu:

- protejează oțelul lichid împotriva reoxidării de către oxigenul din aer, din mediul înconjurător în drumul său de la distribuitor la cristalizor;
- conduce oțelul prin zgura de turnare care plutește pe partea superioară a oțelului în cristalizor, astfel încât nici o particulă de zgură nu este antrenată în oțel – figura 2.8.

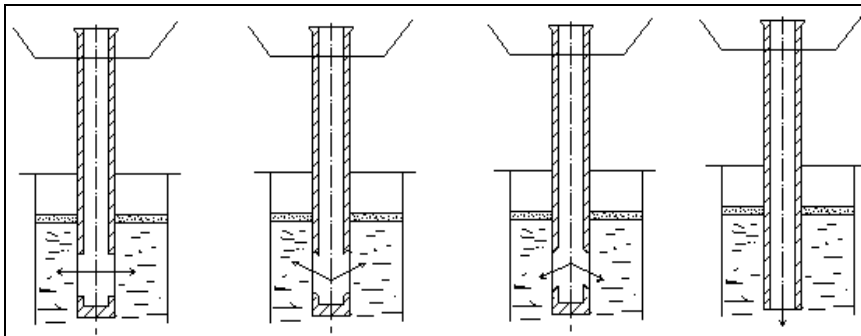


Fig.2.8. Orificii de turnare imersate de diverse tipuri, [12]

Mărimea și forma unui tub de imersie trebuie aleasă în concordanță cu condițiile instalației de turnare continuă și viteza de turnare.

Tubul de imersie trebuie să fie suficient de lung pentru a asigura că ieșirea este de la 50 până la 80mm sub nivelul oțelului, când distribuitorul este în poziție joasă. Acesta înseamnă o distanță de 150 până la 180mm de la marginea superioară a tubului cristalizorului. Lungimea tubului de imersie este de asemenea importantă în context cu determinarea mișcării de ridicare a căruciorului distribuitorului sau a distribuitorului și spațiul deasupra acestuia care este limitat de către oală.

Diametrul interior al tubului de imersie trebuie să fie destul de larg. Vitezele de turnare de până la 700kg/min necesită un diametru al orificiului de 55mm.

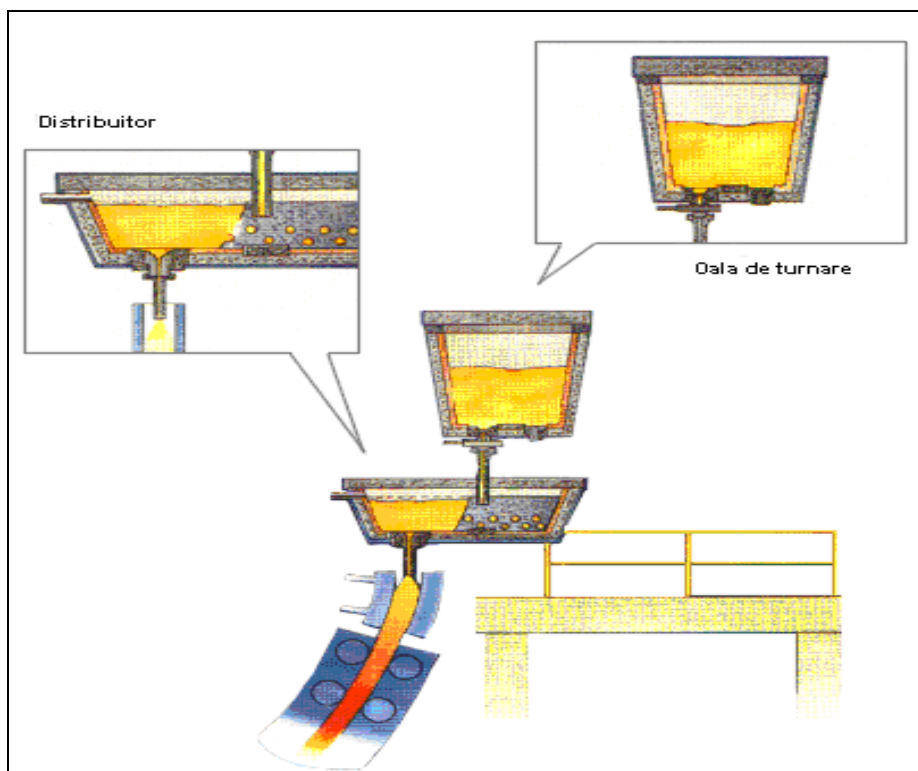
Materialul refractar al tuburilor de imersie este supus condițiilor grele de lucru în timpul turnării. Acestea trebuie să aibă rezistență mare la șocurile termice, având în vedere temperaturile care variază pe lungimea și grosimea tubului, (aerul și oțelul lichid); în plus, materialul tubului trebuie să reziste suficient la acțiunea corozivă a oțelului și a zgurii de turnare [8].

#### 2.3.3.4. Cristalizoarele

Reprezintă partea cea mai importantă a mașinilor de turnare continuă. Construcția lor, conductibilitatea termică, precizia de prelucrare și de asamblare a cristalizoarelor joacă un rol important pentru obținerea unei productivități maxime și a unei calități superioare a semifabricatelor.

În timpul turnării, cristalizorul primește oțelul lichid în partea sa superioară în condiții precise de temperatură și debit, iar la partea inferioară se extrage cu viteză constantă un semifabricat având o crustă solidificată și miezul lichid. În primă fază, datorită contactului direct dintre metal și cristalizorul răcit cu apă, transmisia de căldură este rapidă și se formează în scurt timp o crustă solidă de grosime mică – figura 2.9.

Produsul coborând în cristalizor, crusta solidă se contractă, rezultând un interstițiu de aer între semifabricat și cristalizor, ceea ce înrăutățește considerabil transmisia de căldură. În această fază poate să apară străpungerea metalului topit prin crusta subțire, mai ales dacă interstițiul de aer nu are o grosime constantă pe perimetrul cristalizorului; în acest caz eforturile datorate presiunii ferostatice sunt maxime în regiunea unde crusta are grosime mică, deformările și rupturile fiind cele mai frecvente în această zonă.



**Fig.2.9.** Alimentarea cristalizorului din distribuitor, [17]

Poziția în care semifabricatul s-a separat complet de cristalizor determină lungimea utilă a acestuia, deoarece în continuare, este mai eficientă răcirea directă cu apă.

Ținând seama de înrăutățirea transmisiei de căldură în cazul unui timp mai

îndelungat de deplasare a metalului în cristalizor, apare necesitatea ca cristalizorul să fie cât mai scurt posibil, pentru a putea trece cât mai repede la evacuarea căldurii prin stropire directă cu apă. Această tendință este limitată de anumiți factori de exploatare (de exemplu oscilarea nivelului de metal la turnarea secțiunilor mici) precum și de necesitatea micșorării vitezei de turnare, pentru a asigura obținerea unei cruste solide, suficient de rigide la ieșirea din cristalizor.

Prin utilizarea unor cristalizoare mai lungi se poate mări viteza de turnare, rezultând însă o creștere a presiunii ferostatice și a înălțimii instalației.

Datorită scăderii randamentului de extragere a căldurii se impune o lungime cât mai mică de cristalizor, astfel încât după răcire în cristalizor, firul turnat continuu este răcit direct cu apă, îmbunătățind considerabil condiția de transmitere a căldurii.

Lungimea cristalizorului este însă limitată în jos de rezistența la cald a crustei solidificate față de acțiunea presiunii ferostatice.

Limitarea în sus a lungimii este necesară pentru limitarea dezvoltării pe verticală a instalației, ceea ce se reflectă în costul ei. Lungimi mai mari de cristalizor permit însă viteze superioare de turnare și deci productivitate sporită. Între cele două tendințe se găsește un punct optim de economicitate.

Pentru vitezele actuale de turnare, respectiv capacitățile de răcire intensivă, lungimile uzuale ale cristalizoarelor variază între 600 - 800mm, corespunzând unei durate de trecere de 15-55 s și unei grosimi de crustă de 14-30 mm [9, 12].

Cristalizorul standard, lung de 700 mm. permite aplicarea apei de răcire secundară la timp, ceea ce are ca rezultat o cantitate corectă de căldură îndepărtată. Până acum, nu este încă clar dacă un cristalizor mai lung, de exemplu de 900mm lungime, va da rezultate mai bune. În orice caz, un cristalizor mai lung prezintă dezavantaje în ceea ce privește forțele de frecare dintre fir și suprafața cristalizorului.

O altă metodă de mărire a vitezei de turnare constă în creșterea capacității de răcire a cristalizorului, adică a cantității de căldură evacuată pe unitatea de timp și pe unitatea de suprafață, mărindu-se deci viteza de formare a crustei – figura 2.10. În scopul măririi capacității de răcire, cristalizoare se construiesc cu pereți subțiri și se adaugă o răcire eficientă cu apă. Pe de altă parte însă, pereții subțiri micșorează rigiditatea și durabilitatea cristalizorului, [7, 9, 12, 13].

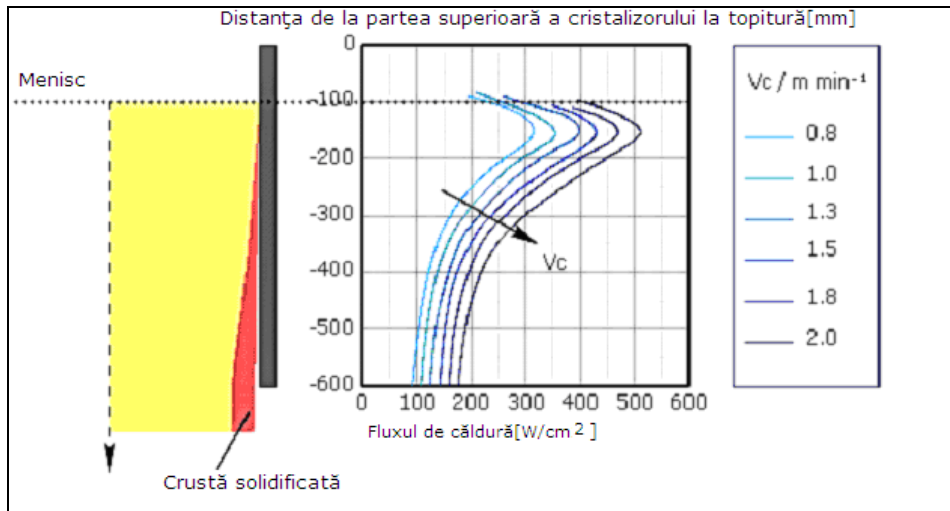
În scopul măririi capacității de răcire, cristalizoarele se prevăd cu o anumită conicitate (6-9 %), laturile fiind mai mici în partea inferioară. În felul acesta se asigură o perioadă mai lungă de contact dintre metal și cristalizor.

Pentru asigurarea în practică a unei conicități corecte, cristalizoarele trebuie prelucrate cu o precizie deosebită. Excepție reprezintă fețele mari ale cristalizoarelor pentru brame, unde presiunea ferostatică readuce crusta la perete. Pentru o ghidare mai bună și pentru simplificarea construcției, aceste fețe se execută paralele.

În regiunea de contact între metal și cristalizor, nu se poate evita frecarea; dacă s-ar utiliza cristalizoare fixe, deplasarea metalului ar produce tensiuni de întindere în crusta subțire solidă și ar apare rupturi în aceasta. Acest inconvenient se elimină prin aplicarea unei mișcări oscilante a cristalizorului, având o viteză de coborâre egală cu viteza de turnare sau mai mare (durata perioadei de coborâre fiind de 1-1,5s) și o viteză de ridicare de 2-3 ori mai mare decât viteza de turnare. Acest ciclu se repetă continuu în timpul turnării, [7, 9, 12, 13].

Tensiunile de întindere în crusta solidificată nu pot fi eliminate integral și este important ca trecerea de la mișcarea de coborâre la cea de ridicare să se facă cât mai lină, deoarece în această poziție tensiunile din metal sunt maxime.

Materialul cristalizorului trebuie să facă față unor cerințe foarte diferite: trebuie să aibă o duritate satisfăcătoare, de exemplu, rezistență împotriva abraziunii și a acțiunilor mecanice; totodată, acesta trebuie să aibă de asemenea o conductibilitate termică ridicată, pentru a preveni ca temperatura suprafeței de lucru a cristalizorului să devină prea ridicată.



**Fig.2.10.** Creșterea grosimii crustei solidificate, funcție de viteza de turnare,[13]

Cuprul electrolitic nealiat, fără oxigen, cu 99,9% Cu este unul dintre materialele standard pentru cristalizoarele de turnare continuă. Cuprul electrolitic prezintă în oarecare măsură costuri mai scăzute ale materialelor în comparație cu cuprul aliat, dar ca un dezavantaj, are un conținut ridicat rezidual al fosforului de dezoxidare [7, 8, 9].

Acest conținut de fosfor efectuează pe de o parte o temperatură înaltă de recristalizare, dar și scade conductibilitatea termică a cuprului, pe de altă parte. Astfel, rezistența înaltă la transferul de căldură al cuprului electrolitic duce la o sarcină termică considerabilă pe suprafața laturilor de oțel ale cristalizorului, în special în zona nivelului de turnare. În plus, cuprul electrolitic are o comportare comparativ nesatisfăcătoare la contracție și la fluaj sub sarcini termice alternative, care pot crea distorsiunea și deformarea țevii de cupru. Prin urmare, cuprul electrolitic mai este utilizat doar pentru cristalizoarele mari cu plăci.

Totuși, aceste dezavantaje joacă un rol minor doar pentru cristalizoarele pentru profile rotunde, deoarece geometria lor este mai favorabilă și mărimea lor mai mică. De aici, cuprul electrolitic nealiat servește ca material adecvat pentru cristalizoarele pentru profile rotunde.

Aliajele de cupru cu adaosuri de Cr (0,7%), Zr (0,06%), și mici adaosuri de Co, Be și Ag au fost testate în special pentru a găsi materialele cu proprietăți de contracție și fluaj îmbunătățite. Rezultate excelente au fost obținute cu cuprul care conține argint, care prezintă o conductibilitate termică foarte bună [7, 8, 9].

Fără îndoială, acest material este foarte potrivit pentru cristalizoarele pentru profile rotunde. Totuși, trebuie verificat în acest caz singular dacă cheltuielile mai ridicate pentru materiale sunt compensate de avantajele suficient de mari la funcționare.

Când se analizează aceste avantaje, nu trebuie ținut seama doar de durata

de funcționare a unui tub de cupru, ci și de siguranța funcțională mai bună datorată deformării mai mici a cristalizorului, ca și disponibilitatea mai mare a mașinii, modificării mai reduse a cristalizorului.

În condițiile alierii cu crom se ating duriții de 160-180 HB.

Uzura cuprului poate fi evitată prin aplicarea de straturi protective pe suprafața cristalizorului. Acesta este posibilă de exemplu, prin galvanizarea unui strat de 0,10 mm de crom pe peretele de cupru, care asigură duriții până la 100 HB [7, 8, 9, 12].

Durabilitatea cristalizoarelor variază în limite foarte largi, date fiind influența factorilor implicați: calitatea și temperatura oțelului, intermitența turnării respectiv realizarea turnării secvențiale, randamentul ungerii, calitatea apei de răcire, respectarea parametrilor optimi de turnare. Cristalizoarele moderne tubulare ating 100-400 turnări, iar cele cu plăci (executând operații intermediare de rabotare și rectificare) până la 1000 de turnări.

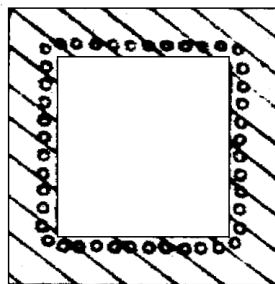
Cristalizorul determină forma secțiunii transversale a unui profil turnat. Solidificarea oțelului lichid începe în cristalizor iar crusta firului se formează și continuă să crească în timpul procesului de răcire în cristalizor și în zonele următoare de răcire prin pulverizare.

În funcție de aplicația finală a semifabricatelor turnate, pot fi turnate o varietate de profile ale secțiunii transversale de diverse dimensiuni, de exemplu: profile pătrate, profile dreptunghiulare, profile cave, profile poligonale, profile rotunde.

Constructiv se realizează trei tipuri de cristalizoare și anume: compacte, tubulare și cu plăci tubulare [8, 12].

Cristalizoarele compacte (figura 2.11) sunt formate dintr-un bloc forjat sau turnat din cupru, găurit în interior conform secțiunii semifabricatului. În pereți sunt prevăzute orificii pentru circulația apei de răcire, distribuite uniform în jurul perimetrului și cât mai aproape de fața interioară pentru a favoriza răcirea.

Acest tip de cristalizor însă se utilizează destul de rar, și numai pentru blumuri mijlocii și mari, datorită capacității reduse de răcire, ceea ce limitează viteza de turnare. De asemenea, prezintă două dezavantaje majore: costuri ridicate de prelucrare și imposibilitatea de re-prelucrare pentru suprafețele lor de lucru fără creșterea ariei secțiunii transversale a cristalizorului.



**Fig.2.11.** Cristalizor compact, [12]

Datorită vitezei mici de turnare, zona de contact direct dintre metal și cristalizor este foarte scurtă (150-200 mm). Lungimea cristalizoarelor compacte construite de Concast este de 600-700 mm, iar a celor sovietice de 1000-1500 mm. Datorită posibilității de recondiționare, cristalizoarele compacte au o durabilitate ridicată, de 600-1000 șarje.

Cristalizoarele tubulare sunt foarte răspândite pentru turnarea țagtelor și blumurilor mici cu secțiunea pătrată și dreptunghiulară (sub 200 x 200mm) și a țagtelor rotunde cu diametre până la 300mm destinate țevilor. Aceste cristalizoare sunt formate dintr-o țeavă de cupru înconjurată de o carcasă prin care circulă apa de răcire. Datorită capacității mare de răcire, cristalizoarele tubulare sunt foarte frecvent utilizate pentru turnarea cu viteză mare a țagtelor, atât pe instalații verticale cât și pe instalații curbe [9, 12, 13].

Calitatea suprafeței semifabricatelor turnate continuu este influențată, pe lângă o serie de factori tehnologici și de caracteristicile prafurilor de turnare.

Prafurile de turnare utilizate la turnarea continuă a oțelurilor, au un rol complex, ele trebuind să asigure prevenirea reoxidării oțelului la turnarea continuă, captarea și reținerea incluziunilor nemetalice din oțelul lichid, izolarea termică, asigurarea transferului termic și lubrifierea între crusta de oțel solidificată și peretele cristalizorului.

Pentru a răspunde acestor cerințe, prafurile de turnare continuă trebuie analizate, având în vedere următoarele caracteristici: fuzibilitatea, vâscozitatea, tensiunea superficială și interfațială, capacitatea de absorbție a incluziunilor.

Aceste proprietăți, la rândul lor, sunt în mare măsură determinate de compoziția chimică și mineralogică, repartiția granulometrică, umiditatea fizică și chimică a prafului și respectiv a zgurii de praf de turnare [6, 12].

La adaosul prafului de turnare în cristalizor, acesta trebuie să se răspândească repede și uniform pe suprafața oțelului, acoperind astfel în întregime oglinda de metal. În acest mod se formează un strat izolator care reduce substanțial pierderile de căldură prin radiație.

Praful de turnare nu trebuie să ardă și să se topească prea repede pe suprafața oțelului, pentru a nu se forma un strat prea gros de zgură, dar în timp util, pentru a se asigura o ungere corespunzătoare a cristalizorului. În urma proceselor care au loc la suprafața băii metalice, trebuie să se formeze un strat relativ subțire de zgură lichidă, capabilă să absoarbă incluziunile nemetalice din oțel și în același timp să curgă în jos peste meniscul de metal, în spațiul dintre fir și peretele cristalizorului.

În plus, praful de turnare și zgura formată nu trebuie să carbureze și să impurifice oțelul, și nici să degaje gaze toxice în mediul înconjurător [12].

Oscilația cristalizorului (figura 2.12) este efectuată de către un motor electric, prin oscilator sau placa de oscilație. Diverse soluții tehnice sunt disponibile pe piață. Mișcarea în jos și în sus a cristalizorului evită lipirea crustei nou formate a firului de peretele cristalizorului. În figura 2.12 este prezentată o simulare a oscilației cristalizorului, pentru o viteză de turnare de 1m/min.

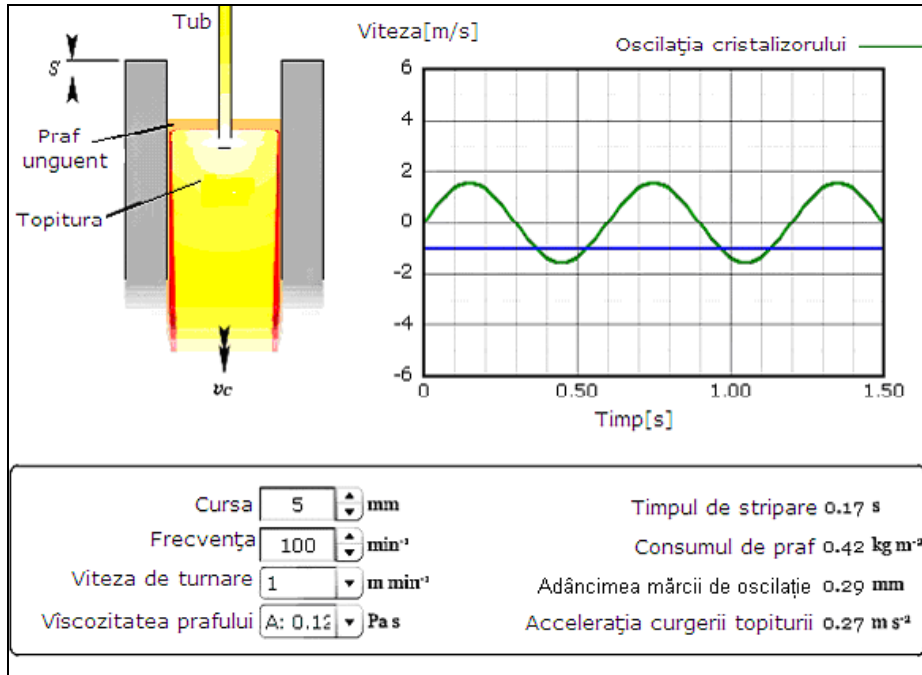
Orice soluție ar fi aleasă, ar trebui să garanteze că cristalizorul se mișcă exact pe linia mașinii de turnare. Cu cât acționarea conține mai puține părți de mișcare, cu atât este mai bine pentru siguranța și exactitatea oscilatorului. Uzura lagărelor și a îmbinărilor sistemelor complicate pot duce ușor la vibrații și la o mișcare de rostogolire a cristalizorului. Acesta va deteriora definitiv calitatea firului și chiar va cauza ruperi.

Oscilația cristalizorului, împreună cu fluctuațiile nivelului de turnare, ca și cu vâscozitatea, tensiunea suprafeței de separație a oțelului lichid și a prafului de turnare (praf, zgură) va influența mult aspectul suprafeței firului și va produce urme de oscilație pe semifabricat.

Aceste urme sunt cauzate de preluarea unui supra-debit al coroanei (crustei) meniscului de-a lungul peretelui cristalizorului declanșat de mișcările cristalizorului și de unduirile nivelului oțelului. Astfel de semne de oscilație sunt în

anumite limite de dorit din punct de vedere metalurgic, deoarece ele asigură o suprafață a firului care are o influență favorabilă asupra cedării căldurii.

O suprafață complet plată a firului ar ceda inițial prea multă căldură și ar răci și contracta prea repede firul. Astfel s-ar pierde prea repede contactul dintre fir și peretele cristalizorului datorită contracției, iar distribuția tensiunii și a căldurii nu ar mai fi uniformă și probabil ar cauza fisurarea [9, 12].



**Fig.2.12.** Oscilația cristalizorului, [13]

Urmele de oscilație, din contră stabilesc contactul dintre crusta firului și peretele cristalizorului la un număr de puncte separate în loc de arii, astfel că răspândirea căldurii la nivelul oțelului lichid din cristalizor se reduce. Timpul total de contact între fir și cristalizor, totuși, se prelungește datorită urmelor de oscilație, iar extragerea căldurii este satisfăcătoare și uniformă, fără să rezulte distorsiunea crustei.

Crusta de oțel care se formează în interiorul cristalizorului se contractă în timpul solidificării și răcirii ulterioare. În zona superioară a cristalizorului, crusta inițială a firului este foarte subțire și fierbinte și prin urmare necesită să fie susținută de peretele cristalizorului. În zona inferioară a cristalizorului, crusta este destul de stabilă pentru a se susține, dar nu trebuie, cu toate acestea, să fie în contact cu peretele cristalizorului pentru îndepărtarea în continuare a căldurii [9, 12].

În practică o conicitate de 1,0-1,2% s-a dovedit utilă pentru un cristalizor rotund de 700mm lungime și pentru viteze de turnare de până la 3,5m/min.

Când se toarnă la viteze mari ar putea fi util să nu se întrebuițeze o conicitate liniară, de exemplu, o conicitate constantă pe lungimea totală a cristalizorului, ci una variabilă, la care se aplică o valoare mai mare a conicității în zona superioară a cristalizorului și una mai mică în secțiunea inferioară a



cristalizadorului.

O toleranță de  $\pm 0,1\text{mm}$  pentru măsura interioară a cristalizadorului ar trebui să fie la cristalizoarele noi.

În cazul infiltrării apei între tubul cristalizadorului și armătura pentru apă, cristalizadorul trebuie schimbat. De obicei, durata de funcționare a tubului cristalizadorului este de aproximativ 20.000 tone de oțel turnat. După acesta, tubul este scos din cristalizor și dat la deșeuri fără re-prelucrare.

Sistemul de control al nivelului cristalizadorului supraveghează nivelul actual al oțelului din cristalizor și în conformitate, controlează debitul (curgerea) de oțel din distribuitor în cristalizor prin controlarea deschiderii orificiului tubului distribuitorului [7, 8, 9, 12].

### **2.3.3.5. Zona de răcire secundară, elemente de susținere, extragere și îndreptare**

Scopul răcirii secundare – figura 2.13. este să continue răcirea firului după ce a ieșit din cristalizor și să solidifice complet secțiunea transversală a firului.



**Fig.2.13.** Zona de răcire secundară, [12]

Totuși, avansarea solidificării este limitată de anumite restricții naturale, cum ar fi: conductibilitatea termică în crusta firului, eficiența de răcire a agentului răcitor și nu în ultimul rând, considerații de calitate a semifabricatului.

Crusta formată în cristalizor conferă forma secțiunii turnate. În majoritatea cazurilor ea nu prezintă însă suficientă rezistență mecanică la acțiunea presiunii ferostatice. Pentru desăvârșirea solidificării și ghidarea în condiții bune a firului, este amenajată zona de răcire secundară.

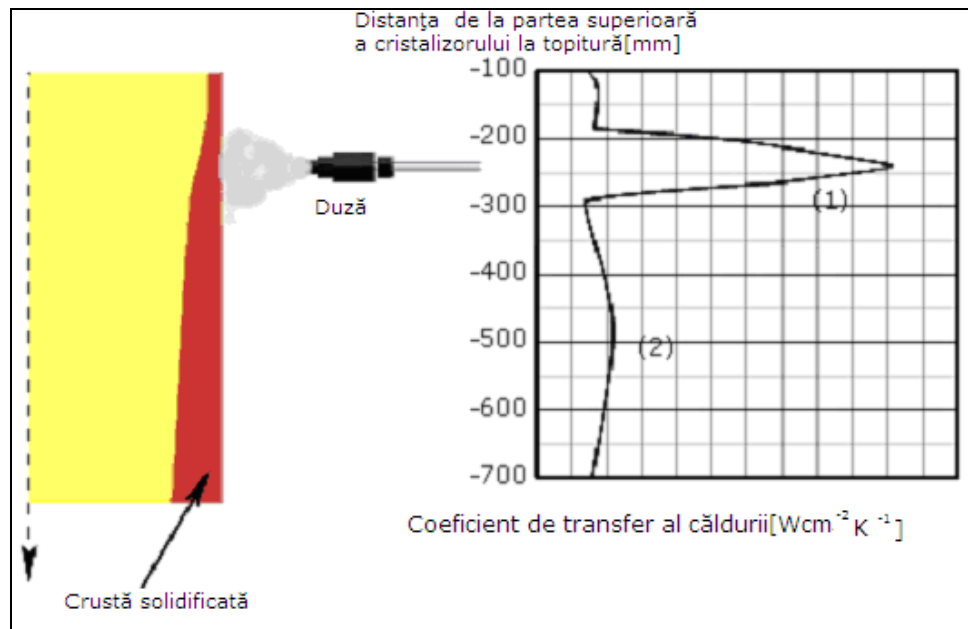
Această răcire se realizează prin stropire directă cu apă sub presiune – figura 2.14, prin duze, capabilă să străbată stratul de abur format prin evaporare și să asigure contactul continuu și permanent apă-metal. Răcirea cea mai intensă este aplicată oțelurilor inoxidabile austenitice, în vederea prevenirii precipitărilor de

carburi. Regimul de răcire al oțelurilor susceptibile la formarea de tensiuni interne impune organizarea zonei în mai multe subzone [13].

Această organizare este favorabilă în același timp unui program larg de secțiuni turnate, conferind elasticitate instalației. În unele cazuri răcirea secundară are loc prin pulverizarea apei cu aer comprimat sau liber în aer, fără stropire. Aerul cald se evacuează prin tiraj natural sau forțat, printr-o hotă special amenajată.

Eficacitatea răcirii în zona secundară este determinată atât de debitul de apă utilizat (proporțional cu viteza de turnare), cât și de repartizarea apei pe suprafața metalului. Stropirea trebuie să asigure răcirea continuă, corespunzătoare unei căderii constante de temperatură de la 1200-1300 °C la ieșire din cristalizor la 700 – 900 °C la capătul zonei secundare [9, 12].

Căderea de temperatură se realizează mai ușor în cazul secțiunilor pătrate sau rotunde, unde zona lichidă se micșorează repede. Conținutul de căldură în cazul bramelor este în schimb ridicat un timp mai îndelungat, ceea ce explică existența conului de solidificare și în agregatul de extragere [13].



**Fig.2.14.** Creșterea grosimii crustei, pe zona de răcire secundară, prin stropire cu apă, [13]

Zona de răcire secundară urmează imediat după cristalizor și în general se extinde peste 30 până la 50% din lungimea miezului lichid. Este divizată în subzone, care sunt controlate individual. Mediul de răcire, care este apa sau un amestec de aer și apă, este pulverizat prin duze la suprafața firului și este astfel controlat încât temperatura suprafeței firului scade uniform în direcția de turnare. Temperatura ar trebui să fie uniformă pe circumferința firului.

Extragerea căldurii în cristalizor este în principal determinată de tranziția căldurii de la suprafața firului la peretele cristalizorului. În zona de răcire secundară, totuși, cedarea căldurii este în special dependentă de fluxul de căldură în interiorul crustei firului. În anumite limite, transferul de căldură în crustă poate fi

mărit prin creșterea diferenței de temperatură dintre interiorul și exteriorul crustei de oțel. Temperatura interiorului crustei, de exemplu suprafața de separație lichid - solid, este mai mult sau mai puțin invariabilă. Ca urmare, temperatura suprafeței exterioare a crustei - pe lângă grosimea crustei - va determina viteza de solidificare și de aici lungimea miezului lichid al firului; o temperatură scăzută a suprafeței exterioare înseamnă o diferență mare de temperatură în interiorul crustei. Totuși, posibilitățile de a realiza un timp scurt de solidificare prin răcirea intensă a pulverizării sunt limitate de conductibilitatea termică scăzută a crustei de oțel [9].

Răcirea foarte intensă nu duce la un gradient care coboară constant în interiorul crustei, ci la o scădere bruscă a curbei de temperatură în crustă spre suprafața exterioară. Acesta cauzează tensiuni termice locale în crustă și în consecință fisurarea internă și superficială în fir. Unele oțeluri cu rezistență ridicată sunt deosebit de sensibile în această privință.

Sistemul de răcire prin pulverizare este divizat în bucle și zone controlate individual. În general, debitul apei pulverizate (în l/ m<sup>2</sup>·min) ar trebui să scadă de la cristalizor în direcția de turnare. Debitul apei pulverizate ar trebui să fie mai mari în partea superioară a mașinii de turnare pentru a realiza creșterea rapidă a crustei firului și astfel să îmbunătățească rezistența crustei în funcție de efort. Scăderea intensității răcirii în direcția de turnare trebuie să prevină ca temperatura suprafeței să devină prea scăzută în punctele de îndreptare [7, 9, 12, 18].

Duzele de pulverizare, unghiul de pulverizare, distanțele dintre duze și presiunea apei trebuie să fie în așa fel reglate încât o temperatură uniformă sau aproape uniformă a suprafeței să se realizeze în jurul periferiei firului la un anumit nivel. Mai multe zone de răcire sunt aranjate în succesiune de-a lungul firului și sunt controlate pentru a asigura scăderea debitelor de pulverizare și eficiența răcirii în concordanță cu viteza și cu lungimea miezului lichid al firului.

Cantitatea de apă de pulverizare necesară depinde de viteza de turnare. Se presupune un punct de lucru reprezentând debitul la viteza maximă de turnare ca bază de referință.

Modificările debitului de apă sunt în proporție liniară față de viteza de turnare. Unitatea de control calculează o valoare de referință care servește ca multiplicator pentru a determina debitul actual la fiecare viteză de turnare. Pulverizarea este menținută constantă la un nivel minim preselectat. Acesta este necesar pentru a menține un minim al răcirii chiar la viteze scăzute de turnare.

Toate zonele de pulverizare sunt supravegheate pentru a putea detecta duzele înfundate, țevile sau furtunurile sparte. Din acest motiv, sistemele de control compară continuu raportul teoretic presiune în funcție de debit al fiecărei zone (curba caracteristică a duzei) cu presiunile și debitele actuale ale apei. Se inițiază o alarmă dacă apar discrepanțe. Sunt supravegheate și debitele actuale și cele dorite ale apei.

Cu agregatul de extragere-îndreptare se realizează pe lângă funcțiunile de extragere și îndreptare a firului și operația de introducere a barei false. În acest scop el este prevăzut cu role libere, răcite la interior sau stropite cu apă, viteza lor periferică reprezentând propriu-zis viteza de turnare.

Rezistențele opuse de material depind de mărimea secțiunii semifabricatului turnat, de calitatea oțelului și temperatură și determină forțele de apăsare la contactul metal-rolă. Suplimentar apar rezistențe datorită degajărilor din zonele unde crusta, accidental prea subțire, cedează sub acțiunea presiunii ferostatice. Aceste forțe au valoare limitată datorită rezistenței mecanice a materialului solidificat total sau parțial. Creșterea numărului de perechi de role motrice reduce solicitarea mecanică asupra firului turnat [9, 12, 18].

Bara de turnare obturează partea de jos a cristalizorului la începutul turnării și antrenează firul turnat până la angajarea lui între rolele de extragere. La ieșirea din agregatul de extragere-îndreptare, bara trebuie desprinsă și îndepărtată din traseul firului. Comparativ cu instalațiile de turnare cu fir vertical, unde bara de pornire se prezintă ca o tijă verticală, evacuată lateral, în instalațiile cu fir curb bara este executată din elemente articulate de lanț cu plăci.

Capul de prindere avea într-o variantă inițială profil coadă de rândunică, asigurând o priză bună cu metalul. El rămânea solidar cu firul după decuplarea lui de restul firului. În etapa actuală el se execută detașabil, cu profil de gheară, care permite decuplarea ușoară printr-o mișcare de ridicare.

Capul de prindere se execută din oțel de calitate sau slab aliat, cu 0,2-0,25% C sau din fontă cenușie. Înainte de introducerea în cristalizor el se preîncălzește la 200 °C și se acoperă cu mortar refractar și grafit. Fundul cavității capului pătrunde deasupra muchiei inferioare a cristalizorului cu 100-150 mm.

Interspațiile între cap și pereții cristalizorului se închid etanș cu fire de azbest și se acoperă cu bucăți de tablă. Pentru accelerarea solidificării primei porții de oțel turnat și în vederea creării jocului de contracție în cavitatea capului se încarcă fâșii de tablă.

Debitarea firului turnat continuu la lungimile de utilizare se execută prin tăiere mecanică sau cu oxigen. Față de tăierea mecanică cu foarfeci sau cu ferăstraie, care produce pierderi mai mici de metal și necesită o întreținere mai simplă, dar ocupă un spațiu mai mare și reclamă cheltuieli de instalare mai ridicate (în special la secțiunile mari), tăierea cu oxigen s-a impus practic în unanimitate. Ea este dezavantajată doar de consumul de metal mai mare (fâșia de tăiere - lățimea flăcării), de obligativitatea întreținerii curente a arzătoarelor și de gaze și de zgură. Este de remarcat economicitatea tăierii cu oxigen la secțiunile mari de țagă, la blumuri și la brame și menajarea muchiilor de tăiere [9, 12, 18].

La agregatele de tăiere cu oxigen se utilizează oxigen cu puritate minimă de 99,5% la presiunea de 12-20 daN/cm<sup>2</sup>. Consumul de oxigen depinde de secțiunea și lungimile tăiate și variază între 0,2-0,3Nm<sup>3</sup>/t pentru țagle și blumuri de 6m lungime și 0,8-1Nm<sup>3</sup>/t pentru țagle și blumuri de 2m și brame de 6m, tăierea având loc la 800 °C, odată cu scăderea temperaturii consumul specific de oxigen crește.

Pentru instalațiile de tăiere cu oxigen se utilizează combustibili cu aprindere lentă - gaz natural, propan și în cazuri de necesitate acetilenă sau hidrogen - la presiunea de 2 daN/cm<sup>2</sup> și un consum mediu 0,03 Nm<sup>3</sup>/t. Lățimea fâșiei de tăiere depinde de temperatură și grosimea secțiunii de turnare între 6-10 mm pentru grosimile de tablă, blumuri și brame de 100-300 mm.

Viteza de tăiere depinde de temperatură și grosimea semifabricatului, fiind la temperatura uzuală de 800 °C de 0,75 m lățime/min pentru 100 mm grosime, de 0,55m/min pentru 200mm și de 0,4m/min pentru 300 mm, iar la temperatura de 1000°C viteza poate crește cu 15% [9, 12, 18].

#### **2.3.3.6. Turnarea secvențială**

La începutul folosirii în practica industrială a instalațiilor de turnare continuă, acestea se caracterizau printr-un regim discontinuu de lucru, la care după fiecare șarjă, instalația se golea și se pregătea pentru șarja următoare. În acest scop era necesară evacuarea metalului turnat, introducerea barei de pornire și etanșarea capului acesteia în cristalizor, precum și pregătirea unui distribuitor cu elemente noi pentru porțiunile solicitate (dop și orificiul de turnare). În funcție de tipul acestor instalații, durata acestor operații era de 15-60 min., ceea ce limita

timpul efectiv de lucru la 50% [ 9, 12, 18].

Prin introducerea unor materiale refractare de calitate superioară și prin unele măsuri constructive și de exploatare, a devenit posibilă turnarea fără întrerupere a unui număr mai mare de șarje, procedeu denumit turnare secvențială.

În prezent turnarea secvențială reprezintă tehnologia standard a tuturor instalațiilor de turnare continuă (variind însă numărul șarjelor turnate într-o secvență și frecvența secvențelor), care sunt prevăzute cu dispozitive de schimbare rapidă a oalei de turnare și a distribuitorului.

Această largă răspândire a turnării secvențiale se datorează avantajelor importante ale acestui procedeu, și anume [9, 12, 18]:

- mărirea productivității și a randamentului în urma reducerii timpilor pauză între șarje;
- micșorarea consumului de metal (respectiv mărirea scoaterii de metal bun) datorită reducerii resturilor de la șarje și de la capete;
- un echilibru termic mai favorabil al mașinii și cheltuieli de întreținere și exploatare mai mici (în special pentru rolele intermediare și manoperă).
- Menționăm însă că turnarea secvențială pe o perioadă mai lungă impune și o serie de condiții, în special tehnologice, dintre care cele mai importante sunt:
- comenzi mari din aceeași marcă de oțel și dimensiune de semifabricat;
- sincronizarea perfectă între ciclurile de elaborare a cuptoarelor și ciclurile de turnare continuă;
- corectitudinea și constanța compoziției chimice și a temperaturii de turnare a oțelului, pentru a putea fi dirijat mereu la turnarea continuă și a putea amesteca șarjele;
- funcționarea corectă a instalației de turnare continuă pentru a reduce la minimum opririle;
- calitatea superioară a cristalizoarelor, care să permită turnarea prelungită, asigurând o transmisie constantă de căldură și păstrarea formei inițiale.

## 2.4. Concluzii

Din studiul efectuat se desprind următoarele concluzii:

- în prezent majoritatea oțelărilor electrice sunt echipate cu cuptoare cu arc electric de mare putere tip EBT și mașini de turnare continuă;
- durata șarjei la asemenea cuptoare este cuprinsă între 45-75 min, deci în medie 60 min;
- productivitatea în medie 100t/h;
- în fluxul de fabricație este prevăzută procesarea oțelului prin așa numita metalurgie în oală, de regula în instalații de tip L.F.
- durata procesării în asemenea instalații este cuprinsă între 42-80 minute, fiind influențată de structura secvenței de turnare;
- se tinde spre creșterea cantității de oțel turnat într-o secvență (respectiv a numărului de oale turnate);
- instalațiile moderne de turnare asigură turnarea unei game variate de semifabricate de diferite secțiuni poligonale, circulare și produse plate.
- tendința actuală este de a se turna semifabricate cu secțiuni cât mai apropiată de cea finală.

### **3. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND REGIMUL TERMIC LA TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI**

#### **3.1. Circuitul parcurs de oalele de turnare într-o oțelărie modernă**

În oțelăriile moderne, turnarea continuă este un proces care predomină în obținerea de semifabricate de oțel (*blumuri, sleburi, țagle, brame etc*). În acest proces tehnologic oalele de turnare ocupă un rol extrem de important.

În prezent pentru elaborarea oțelului se utilizează ca agregate cuptoarele cu arc electric și convertizoarele cu oxigen, oțelul lichid obținut în aceste agregate, este transferat în oala de turnare și apoi este transportat la stația de rafinare secundară. Aici, cu ajutorul unor instalații specifice metalurgiei secundare (LF- ală cuptor, CAS-OB, RH, VAD, VOD etc.), au loc diferite operații tehnologice, ca: desulfurare, decarburare, dezoxidare, aliere, degazare, insuflare de gaze inerte, agitare electromagnetică, încălzire sau răcire, etc.

După aceste operații, oala cu oțel lichid este transportată la stația de turnare continuă, unde oțelul este turnat continuu sub formă de sleburi, brame, blumuri, țagle sau diferite alte semifabricate, [22].

După golire oala este trimisă la atelierul de întreținere unde se realizează o serie de operații tehnologice de curățare a orificiului de evacuare a oțelului și dacă este cazul repararea sau înlocuirea zidăriei refractare, după care oala de turnare poate fi trimisă direct la cuptorul de elaborare primară, de unde preia o noua șarjă de oțel, sau poate fi supusă operației de preîncălzire cu ajutorul unui arzător cu gaz.

Procesele care au loc la turnarea continuă a oțelului necesită un control riguros a temperaturii oțelului lichid aflat în cristalizorul instalației de turnare continuă. Dacă temperatura este prea mare se obține, în produsul turnat continuu, o zonă mare cu structură sub formă de cristale columnare, cauză a unor defecte care apar în semifabricatele turnate continuu (segregații, porozitate axială, crăpături interne, etc.) în loc de cristale fine echiaxiale, așa cum este de dorit. De regulă în aceste cazuri semifabricatele au o crustă subțire ceea ce conduce la formarea mai multor defecte de suprafață (fisuri transversale și longitudinale), [22].

Pe de altă parte, o temperatură prea scăzută a oțelului în cristalizorul instalației de turnare continuă, duce la apariția unor condiții nefavorabile pentru îndepărtarea incluziunilor, respectiv gazelor și poate genera apariția unor probleme tehnologice, cum ar fi: blocarea orificiului de golire a oțelului lichid din distribuitor în cristalizor, formarea de aderențe pe pereții cristalizorului, întreruperea firului etc. [22].

Având în vedere toate acestea, este deci necesar ca temperatura oțelului lichid din cristalizor să fie menținută în limite strânse față de temperatura optimă pe care trebuie să o aibă oțelul lichid la ieșirea din cristalizor. Aceasta se poate realiza numai printr-o cunoaștere cât mai exactă a temperaturii oțelului lichid care curge din oala de turnare în distribuitor și din distribuitor în cristalizor, [22].

Omogenizarea temperaturii oțelului lichid din oala de turnare, se poate realiza fie prin agitare electromagnetică, fie prin insuflarea de gaze inerte în baia metalică.

Atât în timpul acestor procese, cât și în perioada de staționare a oalei de turnare între diverse faze ale procesului, sau în timpul golirii oțelului lichid din oală

în distribuitor, baia metalică suferă o pierdere de căldură spre mediul ambiant, prin pereții oalei de turnare și prin stratul de zgură care acoperă baia metalică. Această pierdere de căldură determină mișcarea oțelului lichid în oală (datorită fenomenului de convecție naturală), care are ca efect stratificarea termică a oțelului în oala de turnare. Stratificarea termică influențează foarte mult temperatura pe care o va avea oțelul în timpul evacuării acestuia din oală. Pentru a cunoaște cât mai exact temperatura pe care o va avea oțelul în distribuitorul instalației de turnare continuă, este deci necesară o bună cunoaștere, atât a pierderilor de căldură cât și a fenomenului de stratificare termică, [22].

### 3.2. Stadiul actual al cercetărilor

#### 3.2.1. Modele termice pentru investigarea și estimarea vitezei de răcire a oalei de turnare

După cum s-a precizat, cunoașterea pierderilor de căldură a oțelului din oalele de turnare, este esențială pentru a avea control asupra temperaturii oțelului lichid care urmează a fi turnat.

În literatura de specialitate există deja numeroase studii legate de această problemă. **Fredman**, [23] a realizat cu ani în urmă o trecere în revistă a acestor cercetări scoțând în evidență faptul că există două metode de investigare a pierderilor de căldură la nivelul oalei de turnare, [22].

O metodă constă în măsurarea directă a variației temperaturii pereților oalei și a oțelului din oală [22, 24...32, 41], iar cealaltă metodă reprezintă modelarea matematică a acestor pierderi [27...37]. Modelarea matematică prezintă o serie de avantaje din punct de vedere al eficienței, eforturilor și costurilor, conducând totodată, la dezvoltarea unui mare număr de modele matematice [22].

Spre exemplu, **Tamazin** [27], împreună cu alți cercetători au dezvoltat o metodă bazată pe modelarea cu diferențe finite pentru studiul influenței pierderilor de căldură la nivelul oalei de turnare asupra temperaturii de turnare a acestuia.

**Muccardi** [28], a studiat distribuția energiei pierdute de oțelul lichid din oală, între zidăria refractară a acesteia și mediul înconjurător utilizând un program de calcul (**FASTP**).

Cercetătorii **Chen și Wang** [29], au stabilit un model numeric pentru realizarea unui grafic adecvat de preîncălzire a oalei de turnare, pe baza căruia se poate determina temperatura pe care trebuie să o aibă oțelul lichid la evacuarea din convertizor [22].

**Bjorkman și Olik** [30] au reușit să estimeze atât temperatura zidăriei refractare a pereților oalei, cât și temperatura oțelului din oalele de turnare aflate în producție utilizând un program de simulare profesional (**TEMPSIM**), care simulează transferul de căldură la nivelul oalei de turnare.

**Fredman și Saxen** [32, 33] au realizat două modele matematice pentru calculul transferului de căldură în oalele de turnare aflate în producție: primul pentru a ajuta la luarea unor decizii atunci când se proiectează o oală de turnare și cel de-al doilea pentru a estima pierderea de căldură a oalei [22].

**Hlinka**, împreună cu alți cercetători [34], au stabilit un model numeric care simulează atât pierderile de căldură prin pereții oalei cât și neuniformitatea termică a oțelului lichid din oala de turnare [22].

**Zoryk și Reid** [35] au dezvoltat un model numeric care poate urmări, în timp real starea termică a mai multor oale de turnare.

**Puțan Vasile** [22] a studiat transferul de căldură în instalația de turnare a oțelului utilizând programul de simulare (**ADINA**).

În cadrul acestor studii de modelare au fost folosite o varietate de metode de verificare, pentru a compara rezultatele simulărilor (temperaturi) cu datele reale. Cea mai folosită metodă este aceea de a introduce termocuple în zidăria refractară a oalelor de turnare [28, 30, 32, 35]. Această metodă dă o bună verificare a temperaturii reale din zidăria refractară, dar necesită mult timp și costuri mari [22].

Măsurarea temperaturii aliajului lichid, conținut de oala de turnare este o metodă indirectă de verificare a modelelor matematice, aceasta fiind des întâlnită în practica industrială [22, 30, 34, 42].

O altă metodă simplă este aceea prin care se utilizează pirometre cu radiație pentru a măsura temperatura suprafeței interioare a zidăriei refractare și/sau a suprafeței exterioare a pereților oalei de turnare [27, 29, 30]. Cu toate că această metodă nu oferă atât de multe informații, ca cea care presupune introducerea termocuplelor în zidăria refractară a oalelor de turnare, este simplu de realizat și cu ajutorul său se poate realiza o calibrare regulată a modelelor termice utilizate în diverse studii [22].

### **3.2.2. Studii referitoare la stratificarea termică a aliajului din oala de turnare în perioada de staționare a acesteia**

Din cauza pierderilor inevitabile de căldură a oalelor de turnare, apare în timpul perioadei de staționare a acestora fenomenul de convecție. O consecință a acestui fenomen o reprezintă stratificarea termică a băii metalice conținută de către oala de turnare. Datorită pierderii de căldură a aliajului lichid care intră în contact cu zidăria refractară a pereților oalei de turnare, acesta se răcește și devine mai dens decât restul aliajului. Aliajul lichid mai rece și mai greu, coboară spre fundul oalei de turnare de unde împinge în sus aliajul mai cald și mai ușor. O consecință a acestui fenomen este apariția în baia metalică a unui gradient de temperatură în direcție verticală, deoarece baia metalică conținută de către oala de turnare, este formată din straturi de aliaj, mai rece spre fundul oalei de turnare și mai cald în partea superioară a acesteia. Acest fenomen a fost denumit în literatura de specialitate „stratificarea termică”, [22].

Temperatura oțelului lichid care curge din baia metalică stratificată a unei oale de turnare, va avea un impact direct asupra temperaturii oțelului lichid din distribuitorul instalației de turnare continuă (evident și a celei din cristalizor), deci investigarea acestui impact este absolut necesară, însă acest fapt presupune, mai întâi, o bună înțelegere a fenomenului de stratificare termică din interiorul oalei de turnare, [22].

Din studiului literaturii de specialitate existente până în prezent se observă faptul că există destul de puține lucrări referitoare la aceste aspecte, iar majoritatea studiilor efectuate au la bază, în principal măsurători de laborator și industriale, modelare matematică și modelare fizică.

Hlinka și Miller [38] au realizat primele încercări de măsurare a stratificării termice a băii metalice conținută de o oală de turnare pilot, cu capacitatea de 7,5 tone. Pentru aceasta au utilizat o tijă realizată din materiale refractare, pe care aceștia au montat la diferite niveluri trei termocuple.

Petegnief ș.a. [39], au măsurat stratificarea termică a băii metalice dintr-o oală de turnare cu capacitatea de 7 tone, în mod similar cu Hlinka și Miller.

Wester [40] și Jonsson [41], pentru a pune în evidență fenomenul de stratificare termică a băii metalice din oala de turnare, au instalat trei termocuple, la diferite niveluri, în pereții zidăriei refractare a unei oale de turnare cu capacitatea de 7 tone, termocuple care au pătruns în baia metalică o distanță de 50 mm [22].

Rieche ș.a. [42] și Grip [43, 44], au reușit să pună în evidență stratificarea



termică existentă în oalele de turnare industriale, introducând în baia metalică din oalele de turnare un instrument realizat din materiale refractare, echipat cu termocuple montate la diverse înălțimi.

Aceste măsurători, atât cele la scară industrială cât și cele la scară pilot, au demonstrat existența unor gradienti de temperatură pe verticala băii metalice și au confirmat existența fenomenului de stratificare termică în baia metalică conținută de oalele de turnare. În plus, Grip [43] a arătat că stratificarea termică poate fi prevenită ușor prin intermediul agitării temporare a băii metalice prin insuflare de argon. Totuși, stratificarea termică debutează aproape imediat după ce încetează insuflarea de argon, din cauza faptului că oala de turnare pierde continuu căldură, deci convecția naturală are loc permanent. Aceste rezultate au demonstrat că, atâta timp cât baia metalică din oala de turnare este „liniștită” stratificarea termică este inevitabilă fără luarea unor măsuri pentru agitarea băii metalice, [22].

Metodele de măsurare directă a stratificării termice a băii metalice conținută de către oalele de turnare necesită consum mare de efort și timp precum și costuri ridicate. Din această cauză nu sunt recomandate pentru studierea stratificării termice în oalele de turnare, ele pot fi totuși folosite pentru verificarea modelelor matematice dezvoltate în scopul simulării acestor fenomene, [22].

Având la bază teoria CFD (*Computational Fluid Dynamics*), au fost realizate câteva modele matematice pentru simularea convecției naturale în oalele de turnare. Aceste modele rezolvă, numeric, ecuațiile cu derivate parțiale, de tip Navier-Stokes, ale curgerii turbulente, ecuații care descriu fenomenele de transfer termic și de curgere care au loc în tipul convecției naturale. Prin rezolvarea acestor ecuații rezultă câmpul de viteze și distribuția de temperaturi din interiorul oalelor de turnare, [22].

Ilegbusi și Szekely [45] au dezvoltat de asemenea un model CFD bidimensional pentru a simula fenomenul de stratificare termică a băii metalice într-o oală de turnare dotată cu un agitator electromagnetic. Studiile acestora au pus în evidență existența fenomenului de stratificare termică și au arătat că neomogenitatea termică a băii metalice, din oala de turnare, poate fi diminuată și prin agitarea electromagnetică a băii metalice, [22].

Koo, ș.a. [46] având în vedere același scop au realizat un model CFD bidimensional, cu diferența că agitarea băii metalice a fost făcută prin intermediul insuflării de argon. Rezultatele acestora au arătat că, pentru o perioadă de staționare a oalei de turnare de 20 minute, diferența de temperatură dintre partea superioară și cea inferioară a băii metalice din oala de turnare poate ajunge până la 24 °C. Agitarea băii metalice prin insuflare de argon poate reduce această diferență de temperatură până la 3 °C, [22].

Austin, ș.a. [47], au dezvoltat și ei un model CFD bidimensional pentru a calcula stratificarea termică a băii metalice din oale de turnare de capacități diferite (125, 200 și 275 tone). Chakraborty și Y.Sahai [48] au stabilit de asemenea un model CFD bidimensional pentru simularea fenomenului de stratificare termică a băii metalice din oalele de turnare, concentrându-se asupra efectului pe care îl are grosimea stratului de zgură de la suprafața băii metalice asupra acestui fenomen, [22].

### **3.2.3. Simularea numerică a curgerii aliajului lichid din oala de turnare în timpul golirii acesteia**

Pe baza cunoașterii distribuției temperaturii (stratificare termică) și a modelului de curgere (convecției naturale) în oalele de turnare, în perioada de staționare a acestora, înaintea golirii lor, se poate studia ce impact are stratificarea

termică, asupra curgerii fluidului și a transferului de căldură din oalele de turnare, în timpul golirii acestora asupra temperaturii jetului de oțel lichid care curge din acestea.

Austin ș.a. [47] au dezvoltat modele CFD tridimensionale, pentru a investiga efectul stratificării termice asupra jetului de aliaj lichid care curge din oala de turnare dar rezultatele obținute de ei se referă doar la prima treime a timpului de golire a oalei de turnare, timp în care curg doar 80 de tone de oțel lichid, din totalul de 275 tone, deci nu pot fi trase concluzii asupra întregii perioade de golire a oalei de turnare [22].

Chakraborty și Sahai [48] au realizat un model CFD bidimensională a golirii oalelor de turnare cu orificiu de golire aflat pe axa de simetrie a acestora, deci concluziile trase se pot referii doar la golirea acestui tip de oale.

Ca o dezvoltare a modelului bidimensional de mai sus, Grip ș.a. [49] au realizat o modelare CFD tridimensională pentru a analiza golirea oalelor de turnare cu capacitate de 105 tone, prevăzute cu orificiu de golire excentric. Acest model utilizează, drept condiții pe frontieră fluxul de căldură pierdut de oala de turnare prin pereți, flux considerat constant și uniform și stabilit experimental, [22].

#### **3.2.4. Modelarea fizică a hidrodinamicii și regimului termic al aliajului din oala de turnare în perioada ei de staționare și de golire**

Modelarea fizică reprezintă o alternativă a modelării CFD, prin intermediul căreia se poate urmări același scop. Modelarea fizică spre deosebire de măsurarea directă a stratificării termice a băii metalice din oalele de turnare, este mai ușor de realizat, mai economică și eficientă în implementare iar rezultatele acesteia pot fi utilizate pentru validarea modelelor matematice.

Modelele pe bază de apă au utilizare largă pentru a simula curgerea fluidelor în agregatele termice care lucrează la temperaturi înalte. Până în prezent cea mai mare parte a acestor modele au fost utilizate pentru a simula procese izoterme. S-au realizat însă și câteva aplicații ne-izoterme ale modelelor pe bază de apă [50...56], cu ajutorul cărora se studiază curgerea aliajului lichid și transferul de căldură în distribuitorii instalațiilor de turnare continuă.

O primă lucrare care poate fi găsită în literatura de specialitate în ceea ce privește aplicarea modelelor pe bază de apă pentru simularea proceselor care au loc în oalele de turnare, este lucrarea cercetătorilor Hlinka și Miller [38], apărută în urmă cu mai mult de 40 de ani. Aceștia au utilizat un model pe bază de apă realizat din plastic acrilic, pentru a simula oțelul lichid și zidăria refractară a oalei de turnare. Cu ajutorul acestui model s-a studiat hidrodinamica aliajului și transferul de căldură în oala de turnare, rezultatele acestor studii după mărirea la scară putând fi aplicate asupra sistemului oală de turnare-distribuitor instalație de turnare continuă. Această lucrare a reprezentat un punct de pornire în ceea ce privește utilizarea modelelor pe bază de apă pentru simularea ne-izotermă a proceselor de curgere existente în oala de turnare, influențate de fenomenul de convecție naturală, [22].

În prezent pe plan mondial turnarea oțelului în proporție de peste 90% se face pe instalații de turnare continuă, iar restul de 10% sub formă de lingouri sau semifabricate turnate sub presiune. La turnarea continuă a oțelului, formarea, respectiv solidificarea semifabricatului este condiționată de aceleași legi fundamentale ca și formarea lingoului care se obține în urma solidificării oțelului într-o lingotieră clasică sau semifabricatului într-o forma de grafit la turnarea sub presiune. Având în vedere viteza de solidificare a oțelului turnat continuu comparativ cu cel turnat sub formă de lingouri, vitezele diferite de eliminare a căldurii, este evident că factorii tehnologici de turnare au o influență considerabil

mai mare. De menționat că majoritatea parametrilor tehnologici în cazul turnării continue sunt controlați și reglați automat. Viteza de turnare a oțelului nu permite o reglare manuală a acestor parametri, lucru posibil în cazul turnării clasice. De asemenea trebuie menționat faptul că în cazul turnării continue sunt mult mai numeroși parametri de turnare decât la turnarea clasică.

În practica curentă a turnării continue este necesar să se cunoască modul în care avansează solidificarea oțelului lichid, de exemplu când și unde se solidifică complet un fir. Numai cunoscând modul de avansare a frontului de solidificare în semifabricatul turnat continuu, se pot lua o serie de decizii cu privire la parametrii turnării (viteza de turnare, de tragere, debitul și presiunea apei la răcirea primară și secundară etc.). Deci, fenomenele solidificării oțelului la turnarea continuă sunt mult mai complexe. Metodele de calcul analitice sunt prea complicate și greu de aplicat în practica curentă.

### 3.3. Concluzii

Având în vedere cele menționate în subcapitolele anterioare, se pot concluziona următoarele:

- s-a acordat și se acordă și în prezent o atenție deosebită modelării fizice a hidrodinamicii și regimului termic al aliajului din oala de turnare în perioada ei de staționare și de golire, precum și simulări numerice a curgerii aliajului lichid din oala de turnare în timpul golirii acesteia;
- turnarea continuă reprezintă un proces mult mai complex decât turnarea clasică deci fenomenele solidificării oțelului la turnarea continuă sunt mult mai complexe;
- se studiază în continuare procesul de solidificare a oțelului în cristalizor, prin elaborarea de modele matematice și în mod deosebit prin aplicarea programelor de simulare;
- o atenție deosebită se acordă semifabricatelor cu secțiune rotundă.

## 4. IMPORTANȚA REGIMULUI TERMIC LA NIVELUL OALA DE TURNARE – DISTRIBUTOR - CRISTALIZOR ASUPRA CALITĂȚII OȚELULUI ȘI SCOATERII DE METAL

### 4.1. Temperatura de turnare

#### 4.1.1. Generalități

Unul din factorii de influență de primă importanță la turnarea continuă a oțelului asupra calității semifabricatelor și produselor finite, este reprezentat de temperatura de turnare.

Soluția optimă pentru a obține un semifabricat de bună calitate, este aceea ca oțelul lichid să ajungă la cristalizor cu o temperatură constantă în timp, puțin mai mare decât temperatura de solidificare a mărcii respective de oțel (10-20 °C). Lucrul acesta nu se poate realiza în totalitate în practică, deoarece scăderile de temperatură în timpul turnării ating valori importante, fapt ce impune supraîncălzirea oțelului pentru a putea asigura o temperatură suficientă pe întreaga perioadă de turnare continuă [7, 58]

Ținând seamă de specificul procesului tehnologic de turnare continuă, temperatura oțelului la sfârșitul elaborării (inclusiv tratamentul secundar) este mai ridicată decât în cazul turnării sub formă de lingouri [58, 59].

Temperatura oțelului lichid în diferite faze ale procesului tehnologic, depinde de mai mulți factori [7]:

- calitatea oțelului, mai precis compoziția chimică determină temperatura liquidus și solidus;
- greutatea șarjei;
- mărimea și forma secțiunii semifabricatelor;
- condițiile de amplasare a instalației de procesare a oțelului în oala de turnare (L.F., V.A.D., V.O.D. etc) și a halei de turnare continua în fluxul tehnologic.

Factori amintiți mai sus, influențează pierderile de căldură a băii metalice din oala de turnare de la ieșirea din instalația de tratament secundar, până la poziționarea acesteia deasupra instalației de turnare continuă.

Temperatura oțelului la începutul turnării variază între 1600-1700°C, în funcție de factorii menționați mai sus (la instalațiile de turnare moderne acest interval de variație a temperaturii este mai mic, aceasta fiind cuprinsă între 1620-1650°C), [58].

**Tabelul 4.1.** Viteza de răcire a oțelului în funcție de capacitatea oalei de turnare, [58]

Viteza de răcire a metalului, [°C/min.]	Capacitatea oalei de turnare, [t]
1,00	20
0,75	40
0,3	100
0,1	250-300

Viteza de răcire a oțelului din oala de turnare depinde de mărimea șarjei și de capacitatea oalei de turnare. În tabelul 4.1 sunt date câteva valori ale vitezei de răcire pentru oale de turnare cu diverse capacități [58].

Temperatura oțelului din oală în timpul turnării continue trebuie să fie cu aproximativ 30-60°C peste temperatura de topire, cuprinsă de obicei între 1570-1620°C. Temperatura din distribuitor trebuie să fie cu 15-40°C mai mare decât temperatura de topire (fiind cuprinsă în general între 1550-1580°C). Viteza de răcire în distribuitoarele instalațiilor de turnare continuă variază la instalațiile de capacitate mare între 2-5°C/min, timpul de staționare fiind de câteva minute, deci rezultă o scădere a temperaturii metalului din distribuitor relativ mică (10-20°C).

Pentru buna funcționare a instalației de turnare continuă, trebuie asigurat un control riguros al temperaturii oțelului, precizia necesară față de temperatura prescrisă la intrarea în cristalizor trebuie să fie de  $\pm 5...10^\circ\text{C}$ , [7, 58, 59].

Dacă temperatura de turnare este prea mică, aceasta poate cauza astuparea orificiilor de turnare ale distribuitorului, în special în cazul țagtelor de secțiune mică și în cazul sleburilor, putând conduce de asemenea la apariția defectelor de suprafață [7, 58, 59].

O temperatură de turnare prea ridicată necesită o viteză de turnare redusă și o răcire secundară intensă, având drept consecință defecte interne și de suprafață, datorate tensiunilor termice; de asemenea, temperatura prea ridicată a oțelului determină o crusta subțire, crescând astfel pericolul străpungerii semifabricatului sub cristalizor, [7, 58, 59].

#### 4.1.2. Controlul temperaturii la turnarea continuă

Controlul temperaturii este foarte important în timpul turnării continue (TC), deoarece acest parametru are mare impact asupra condițiilor de turnare și capacități de turnare a mașinii de turnare continuă (MTC). Energia termică a oțelului din oala de turnare este cea care generează căldura și temperatura din distribuitor în timpul turnării. Este extrem de important să se diminueze pierderile de căldură în faza de transport a oalei cu oțel lichid pe traseul LF-MTC, astfel încât să fie posibilă turnarea unei secvențe cu cât mai multe șarje. Temperatura oțelului lichid din oală și ulterior din distribuitor, respectiv gradientul de temperatură (supraîncălzirea) impun viteza de turnare a mașinii de turnare continuă. Dacă temperatura este prea scăzută există riscul de a nu putea turna din cauza solidificării oțelului în distribuitor sau pe tubul de imersie (obturare termică). În caz contrar, o temperatură prea ridicată face să apară perforări de fir cauzate de ruperea crustei marginale, iar la suprafața semifabricatului apar defectele specifice supraîncălzirii oțelului lichid și de asemenea defecte centrale (segregații, fisuri, etc.). Supraîncălzirea exagerată a oțelului lichid conduce la creșterea uzurii materialelor refractare, deci reducerea durabilității acestora, [60, 62].

De menționat faptul că oalele cu zidărie refractară nouă vor pierde căldură cu o viteză mai mare decât cele vechi (datorită absorbției unei cantități de căldură mai mari pentru încălzirea căptușelii refractare) la primele trei șarje; în continuarea acestea au o stabilitate termică o bună perioadă de timp până în finalul campaniei, când oalele de turnare încep să piardă căldură datorită deteriorării stratului refractar de uzură. În practica curentă, repararea stratului de uzură se reface prin torcretare, dar la o uzură avansată a acestuia nu se mai justifică ajustarea acestuia și se trece la refacerea completă a stratului de uzură sau dacă se impune la refacerea întregii zidării refractare, [60].

În figura 4.1 se prezintă modul cum variază temperatura în oală și distribuitor pe durata unei secvențe cu patru oale de turnare, [60].

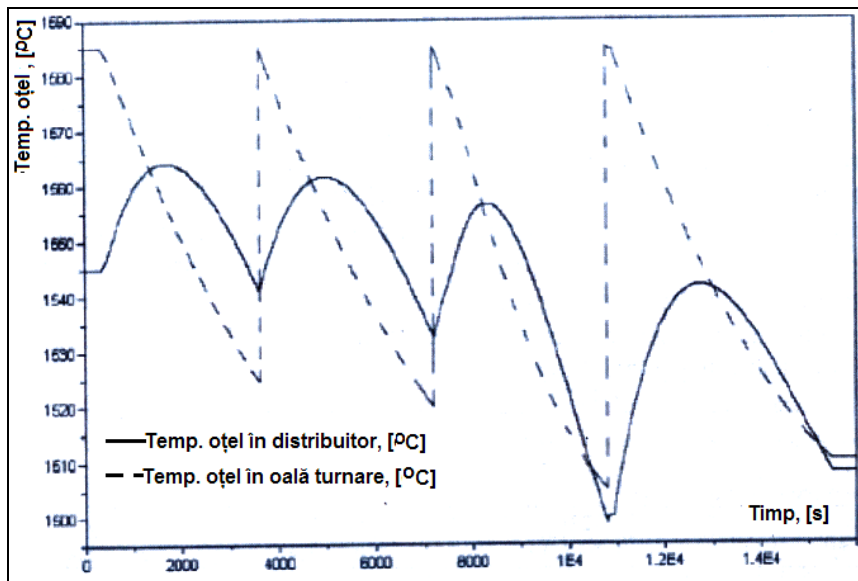


Fig.4.1. Variația temperaturii în oală și distribuitor la o secvență cu 4 oale, [60]

#### 4.1.3. Temperatura oțelului lichid pentru turnarea continuă

Temperatura oțelului lichid pentru turnarea continuă este dependentă de următorii factori, [60]:

- gradul de încălzire a căptușelii refractare a oalei de turnare;
- gradul de încălzire a căptușelii refractare a distribuitorului;
- timpul total de transport a oalei cu oțel lichid;
- timpul total de turnare;
- temperatura minimă admisă în distribuitor înainte de închiderea oalei de turnare ( $T_d = T_L + \Delta T_{min}$ ;  $T_d$  - temperatura oțelului în distribuitor, [°C];  $T_L$  - temperatura lichidus a oțelului [°C];  $\Delta T_{min}$  - supraîncălzirea minimă admisibilă în distribuitor pentru familia dată de oțeluri [°C];
- pierderea de temperatură a oțelului la transferul din oala de turnare în distribuitor;
- temperatura la finalul tratamentului LF sau VD;
- timpul total de prelucrare al oțelului în LF sau VD.

Temperatura necesară pentru turnarea fiecărei familii de mărci de oțel se calculează cu formula [60]:

$$T_0 = T_d + T_w + \Delta T \cdot t_{total} + T_x \quad (4.1)$$

unde:  $T_0$  - temperatura oțelului la ieșire din instalația LF pentru turnare, [°C];  
 $T_d$  - temperatura minimă din distribuitor, [°C];  
 $T_w$  - media pierderilor de temperatură la transferul oțelului din instalația LF în distribuitor ( $\cong 20$  °C);  
 $\Delta T$  - pierderea de temperatură a oțelului prin căptușeala refractară a oalei de turnare (0,2°C/min - 0,3°C/min);  
 $t_{total}$  - timpul de transport + durata turnării [min];  
 $T_x$  - pierderile de temperatură ale oțelului prin căptușeala refractară a distribuitorului ( $\cong 10$ °C).

#### 4.1.4. Temperatura la transfer în vederea turnării

Temperatura în vederea turnării continue la prima șarjă din secvență este majorată cu 5–10 °C (la prima oală din secvență zidăria oalei are temperatura mai scăzută și are capacitate mai mare de absorbție de căldură).

Pentru estimarea temperaturii lichidus ( $T_L$ ) și solidus ( $T_S$ ) sunt acceptate astăzi următoarele relații [60]:

$$T_L = 1539 - (90C + 6,2Si + 1,7Mn + 28P + 40S + 2,6Cu + 2,9Ni + 1,8Cr + 5,1Al) \quad (4.2)$$

$$T_S = 1536 - (415,3C + 12,3Si + 0,8Mn + 124,5P + 183,9S + 1,4Cr + 1,8Cr + 4,1Al) \quad (4.3)$$

Supraîncălzirea optimă a oțelului,  $\Delta T$ , pentru diferite grupe de oțel se prezintă în tabelul 4.2.

**Tabelul 4.2.** Supraîncălzirea optimă a oțelului la turnarea continuă, [60]

Tip profil	Grupa 1	Grupa 2	Grupa 3	Grupa 4
Blum 240x270mm	18 – 35 °C	18 – 30 °C	20 – 30 °C	25 – 35 °C
Rotund de 150mm	18 – 28 °C	18 – 28 °C	18 – 28 °C	20 – 30 °C
Rotund de 180mm	18 – 30 °C	20 – 30 °C	20 – 30 °C	25 – 35 °C

Grupa 1-oțel carbon obișnuit; Grupa 2- oțel carbon superior, cu conținut de carbon scăzut sau mediu (0,18 – 0,25%), oțel slab aliat cu %C ≤ 0,15; Grupa 3- oțel cu %C ≥ 0,25, oțeluri aliate %C mediu, oțel de rulmenți; Grupa 4 – oțel resulfurat obișnuit.

Mai mulți cercetători [66], pe baza analizei procesului tehnologic de turnare continuă a oțelului referitor la regimul termic al oțelului și a urmării foarte riguros în practica curentă a calității semifabricatelor turnate continuu, au fost scoase în evidență următoarele [66]:

- pentru oțelurile carbon este recomandat ca supraîncălzirea să fie cât mai scăzută în distribuitor (în domeniile optime stabilite de cercetători și tehnologi pe baza cercetărilor). Motivele sunt siguranța în funcționare și calitatea semifabricatelor (îmbunătățirea structurii interne, prevenirea fisurilor, eliminarea retasurilor etc.). Trebuie ținut cont de faptul că fiecare marcă de oțel se comportă diferit în procesul de solidificare datorită valorilor diferite ale vâscozității acesteia. Este cunoscut faptul că cele mai mari dificultăți la turnarea continuă sunt create de oțelurile cu conținut scăzut de carbon, în special dacă au și conținut ridicat de aluminiu; practic aceste oțeluri sunt cele mai nedorite de turnat, alături de cele resulfurate, datorită vâscozității ridicate și la temperatura de turnare, putând produce astfel blocarea tuburilor de imersie (SEN), fenomen cunoscut în practică și cercetare sub denumirea de clogging (înfundare).

- oțelurile cu conținut de carbon sau siliciu ridicat, care au o fluiditate foarte bună și o altă evoluție a solidificării generată de diagrama de echilibru, nu creează probleme deosebite din punct de vedere al turnării, dar pot crea dificultăți la răcirea pe paturi;

- temperatura de turnare a primei șarje din secvență trebuie să fie mai ridicată cu 5 – 10 °C decât la următoarele șarje din secvență;

- scăderea de temperatură între ultima măsurătoare efectuată în oala de turnare și distribuitor este diferită de la o oțelărie la alta, aceasta fiind dependentă de: starea de încălzire a oalei de turnare, durata dintre cele două măsurători, pierderea normală de temperatură în °C/min, modul de curgere a oțelului din oala de turnare în distribuitor, starea de încălzire a distribuitorului etc.

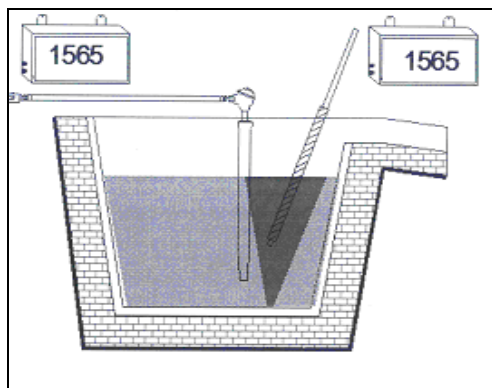
- calitatea semifabricatelor turnate continuu depinde în cea mai mare parte de corelarea vitezei de turnare cu temperatura de turnare rezultate din măsurări. Corelarea celor doi parametri de turnare influențează grosimea crustei firului care

părăsește cristalizorul. Ca urmare, la o supraîncălzire mai mare de 40 – 45 °C, crusta marginală este foarte subțire, ceea ce trebuie compensat cu o viteză mică de turnare pentru a obține o crustă suficient de groasă care să nu permită formarea fisurilor de suprafață, respectiv perforarea firului, supraîncălzirea trebuind compensată cu o viteză de turnare mai mică. Procesul de turnare continuă este condus mai ușor dacă se lucrează cu o supraîncălzire mare, dar aceasta atrage după sine o serie de influențe asupra calității produsului turnat (vizibile după 8 – 12 ore la analiza țaglei /semifabricatului turnat continuu).

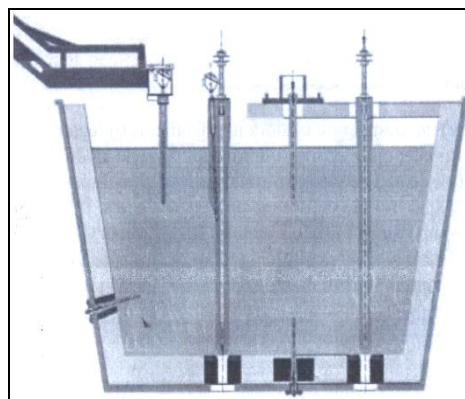
- pe baza datelor din practică este indicat ca supraîncălzirea în distribuitor să nu fie sub 20°C, atunci când comportarea crustei marginale este greu de prevăzut iar scăderea temperaturii este greu de anticipat [60].

Temperatura oțelului la transferul din oală în distribuitor în vederea turnării poate fi mărită cu 5 – 7 °C față de datele prezentate în tabelul 4.2. În cazul: turnării forțate, pierderea unui fir datorită unor evenimente ca de exemplu perforarea firului, blocare stopper-ului (dop), defectarea echipamentului, utilizarea unei oale cu zidărie nouă sau insuficient încălzită, temperatură scăzută în distribuitor în momentul tratamentului la LF a șarjei care urmează la turnare. Această creștere de temperatură are ca scop continuarea secvenței de turnare până la eventual alte intervenții tehnologice. Temperatura oțelului la transferul acestuia în vederea turnării este în funcție de temperatura lichidus, secțiunea semifabricatului și numărul șarjei în serie, plecând de la necesitatea de a obține temperatura necesară oțelului în distribuitor (conform instrucțiunilor tehnologice). În practica turnării continue sunt cunoscute următoarele metode de determinare a temperaturii oțelului în distribuitor:

- măsurarea discontinuă utilizând termocupla de imersie figura (4.2);
- măsurarea continuă figura 4.3.



**Fig.4.2.** Schema de măsurare a temperaturii oțelului lichid în distribuitor a) continuă; b) discontinuă cu termocupla de imersie,[66]



**Fig.4.3.** Schema de măsurare continuă a temperaturii în distribuitorul MTC, [66]

## 4.2. Procesele de transfer termic la turnarea continuă

### 4.2.1. Generalități

Pentru rezolvarea problematicii transferului de căldură la turnare continuă a oțelului (TC) este necesară analiza proceselor de, [60]:

- transfer de căldură în cristalizor;
- solidificare și formare a crustei marginale;

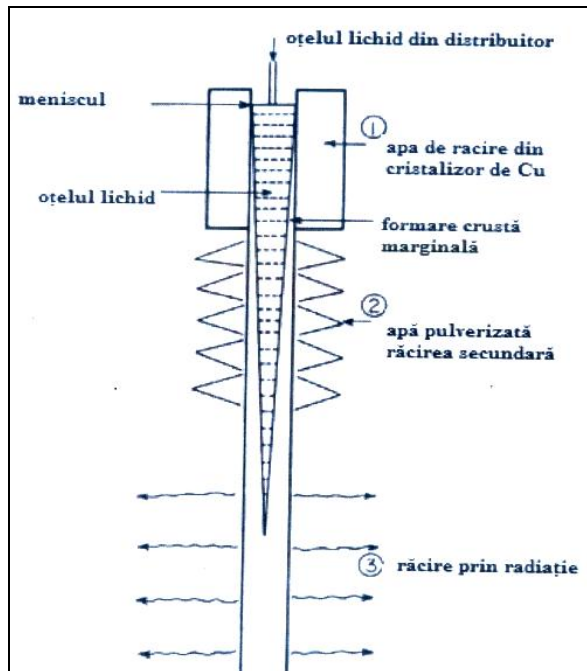


- echilibru între cantitatea de căldură –masă-viteza de turnare;
- preluare căldurii de către apa de răcire în zona creuzetului;

Pentru modelarea procesului de transfer de căldură este necesară cunoașterea, [60]:

- mărcii de oțel;
- temperaturii liquidus;
- temperaturii inițiale a oțelului în cristalizor;
- temperaturii de turnare;
- vitezei de turnare;
- debitului și temperatura apei de răcire în cristalizor și răcirea secundară;
- temperaturilor de transformare de fază și a curbelor de echilibru;
- căldurii latente de solidificare;
- coeficienților de convecție și conducție;
- amănunte dimensionale ale sistemului cristalizor/tub imersie ș.a.

Cantitatea de căldură generată de supraîncălzirea oțelului lichid, reprezintă sursă internă de căldură în cristalizor la suprafața crustei marginale - oțel lichid. Când unui nod termic îi scade temperatura sub temperatura liquidus, se generează o creștere a fracției solide care aderă la suportul solid, reprezentat de suprafața interioară a crustei marginale, producându-se astfel un salt energetic negativ, care reprezintă căldura latentă de solidificare, fenomen care de fapt este o subrăcire. În condițiile prezentate crusta marginală devine un front de solidificare, stimulând germinare eterogenă și coalescența fracției solide.



**Fig.4.4.** Schema cu principalele zone de răcire: 1-primară- în cristalizor; 2 - secundară; 3 terțiară - în zona paturilor de răcire

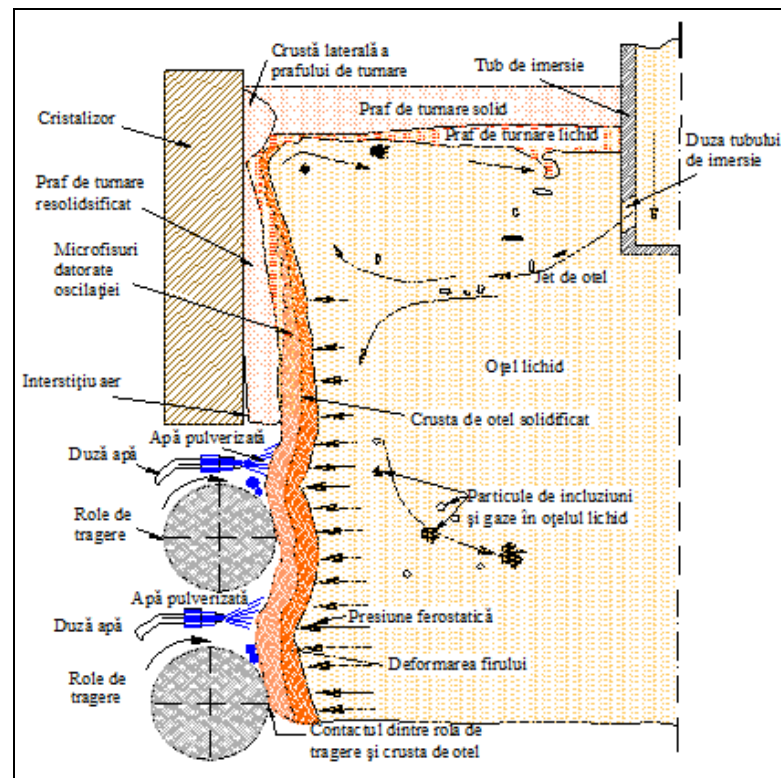
Prin natura sa, turnarea continuă este un proces de conversie a lichidului în solid, implicând eliminarea de energie sub forma de căldură, astfel [60]:

- căldură de supraîncălzire a oțelului lichid din distribuitor și până la intrarea acestuia în cristalizor;
- căldură latentă de solidificare specifică transformării de stare lichid-solid;
- căldură specifică formării crustei marginale, răcirea oțelului sub temperatura solidus;

răcirea semifabricatului turnat până la temperatura mediului ambiant sau la o altă temperatură impusă de fluxul tehnologic.

Schimbul de căldură este posibil datorită următoarelor mecanisme de transfer termic, [60]:

- convecție în oțelul lichid aflat în mișcare;
- conducție termică între crusta solidificată și tubul rece de cupru;
- transfer de căldură prin radiație;
- combinații de radiație, convecție și conducție pentru diverse poziții ale ansamblului, cristalizor, oțel lichid, crustă marginală, praf unguent, apă de răcire, mediu ambiant.



**Fig.4.5.** Schema de principiu a ansamblului cristalizor/role de picior, [67]

Pentru procesul de turnare continuă este important controlul strict al procesului de transfer de căldură înainte de începerea turnării oțelului în cristalizor. Temperatura, respectiv supraîncălzirea oțelului lichid este de importanța majoră pentru turnarea fiecărei șarje, iar temperatura din oală și distribuitor (controlul pierderilor de căldură în mediul ambiant) reprezintă un aspect tehnologic fundamental pentru calitate și productivitate la turnarea continuă.

#### 4.2.2. Etapele procesului de transfer termic la turnarea continuă

În procesul de turnare continuă sunt implicate simultan mai multe fenomene de transfer de căldură, transfer de masă, transformări de fază și de stare. Transferul de căldură limitează productivitatea și influențează calitatea, mai ales aspectele legate de suprafață și de formare a fisurilor interne (cauzate de contracția din timpul răcirii și de transformarea în stare solidă a oțelului). Schimbul de căldură influențează și rezistența la bombare a crustei marginale, sub efectul presiunii ferostatice din oțelul lichid, ducând uneori la perforări (figura 4.5.), [60].

Transferul de căldură în procesul de turnare continuă se realizează astfel:

- răcire principală – în cristalizor;
- răcire secundară – în zona segmentilor cu pulverizar/stropire cu apă;
- răcire terțiară – în zona paturilor de răcire.

Răcire principală din cristalizor poate fi descrisă sintetic astfel, [60]:

- jetul de oțel lichid curge în tubul de cupru al cristalizorului prin tubul de imersie, fiind dirijat de geometria acestuia. Direcția jetului de oțel lichid generează turbulențe ale oțelului lichid din cristalizor, care influențează schimbul de căldură la interfața lichid – crustă și deci, se poate considera că influențează procesul de solidificare și integritatea crustei marginale. Oțelul lichid se solidifică sub influența diferenței de temperatură cauzată de apa de răcire pe suprafața exterioară a tubului de cupru care vine în contact cu oțelul lichid, proces care conduce la creșterea grosimii crustei, pe măsură ce firul coboară în cristalizor, proporțional cu viteza de turnare, [60];
- praful de cristalizor (praf unguent) adăugat pe suprafața liberă a oțelului lichid se topește și formează zgură lichidă, care asigură lubrifierea între crusta marginală și peretele tubului de cupru a cristalizorului, cât timp acesta rămâne lichid. Practic zgura lichidă se interpune sub forma unui film (pelicule) cu grosime de câțiva microni, în interstițiul format între peretele interior al cristalizorului și fața exterioară a crustei marginale ca urmare a contracției acesteia (figura 4.4.), [60];
- zgura lichidă în contact cu pereții cristalizorului se răcește rapid formând un strat de praf zgurificat, cristalin care uneori rămâne blocat pe pereții cristalizorului și este antrenat în jos cu o viteză mai mică decât viteza de turnare fapt ce uneori concură la apariția de defecte de suprafață (pori) sau perforări. Transferul termic prin praful zgurificat depinde de grosimea stratului și de proprietățile de conductivitate termică a acestuia, care depind la rândul lor de viteza de turnare, de temperatura de cristalizare, de viscozitate și de natura stratului. Conductivitatea termică a zgurii depinde de forma de cristalizare a acesteia și de evoluția stratului intern, dizolvarea de gaze și formarea de bule, [60];
- procesul de contracție a crustei marginale, depărtarea acesteia de peretele tubului de cupru și formarea unui interstițiu ce se umple cu praf lubrifiant aflat în procesul de zgurificare, generează o rezistență acceptabilă la transferul de căldură. În practica curentă se întâlnesc uneori situații în care interstițiul este format din golurile de aer, care opun rezistență diferită la schimbul de căldură, conducând astfel la deformarea conturului crustei, acest proces producându-se în special atunci când praful lubrifiant lipsește sau din diverse motive nu poate pătrunde în această zonă. Calitatea suprafeței depinde de tendința apariției procesului de fierbere la interfața lichid-menisc în zona crustei în timpul solidificării. Crusta marginală formează în zona meniscului o suprafață rugoasă, uneori cu scobituri destul de adânci pe direcția mărcii de oscilație, iar dacă fenomenul acesta este

accentuat, poate conduce la imperfecțiuni în zona interstițiului pe contur. Rezistența termică a straturilor (zonelor) succesive care formează sistemul, are rol predominant asupra controlului schimbului de căldură, împreună cu debitul și viteza de curgere a apei de răcire, care circulă prin interiorul cristalizorului confecționat din cupru, [60];

- temperatura pereților cristalizorului este strâns legată de temperatura apei de răcire la evacuare. În acest moment al procesului de transfer de căldură este foarte important să nu apară discontinuități pe direcția transferului de căldură, cum ar fi interpuneri sub formă de depuneri de săruri pe peretele (fața rece) care este în contact direct și convectiv cu apa de răcire. Formarea unui strat de zgură în interstițiu este principalul factor tehnologic care influențează transferul de căldură, iar uneori rezistența termică mare a acestuia este determinată de depunerile de pe tubul de cupru, ce apar uneori, producând mărirea dimensiunii interstițiului cu efecte semnificative asupra modificării transferului termic și asupra formei și calității semifabricatului turnat continuu. Depunerile pot conduce la apariția fenomenului de „fierbere locală”, care înrăutățește transferul termic și poate produce deteriorarea tubului de cupru. Cauza principală o reprezintă nivelul mare de impurități din apa de răcire, care se depun pe suprafața spălată de apa de răcire, producând creșterea semnificativă a temperaturii zonale, în special în apropierea meniscului, [60];
- după ieșirea din cristalizor, semifabricatul cu crustă marginală formată, se deplasează pe rolele de sprijin, iar inelele cu duze de pulverizare a apei de răcire, asigură formarea în jurul semifabricatului a unui duș fin până la consistența ceții, [60];
- repartizarea fluxului de căldură transferat este dependent de viteza de turnare și de poziția în cristalizor a zonei analizate aflate în curs de solidificare. Cea mai mare cantitate de căldură se evacuează în intervalul 90 – 150 mm din lungimea cristalizorului, începând cu nivelul de turnare (acesta fiind considerat la un grad de umplere a cristalizorului de 80 – 85%). Procesul de transfer de căldură după cca 400mm de la nivelul de turnare (figura 2.10, capitolul 2). Densitatea fluxului de căldură se exprimă în energie raportată la suprafața de schimb de căldură și timp, iar rezistența termică la transferul de căldură ca densitate raportată la diferența de temperatură [60, 69];
- fluxul de căldură este determinat de cantitatea de oțel turnată în funcție de timp. Energia termică specifică degajată din cristalizor, poate fi exprimată ca o energie raportată la cantitatea de oțel turnată (determinată de viteza și timpul de turnare), măsurată în J/Kg sau Kcal/Kg. Fluxul termic mediu de căldură se exprimă ca fiind cantitatea de căldură raportată la suprafața de schimb de căldură și măsurată în  $W/cm^2$ . Factorul fundamental care influențează schimbul de căldură este viteza de turnare, vitezele mari ducând la o scădere uniformă a cantității de căldură evacuată datorită faptului că, semifabricatul turnat cu viteză mare este în contact cu cristalizorul rece un timp mai redus, deci ca urmare se evacuează o cantitate de căldură redusă, [60].

#### 4.2.3. Ecuația procesului

Următoarele ipoteze de lucru pot fi utilizate pentru un model matematic [60, 70] care să descrie procesul de solidificare a oțelului în timpul turnării continue la MTC:

- procesul de turnare continuă este în stare de echilibru;
- semifabricatul este simetric;
- energia evacuată în procesul de frecare internă în lichid este neglijabilă;
- suprafața liberă a lichidului este acoperită cu un strat de protecție, prin care se presupune că pierderea de căldură este zero.

Ecuția pentru transfer termic la turnarea continuă este [60, 70, 71]:

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - v \rho C_p \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (4.4)$$

Ținând seamă că în zona meniscului  $z=0$  și  $t=0$  rezultă că la un timp  $t$  dat, vom avea:

$$z = vt \quad (4.5)$$

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.6)$$

Conducția axială de căldură este neglijabilă comparativ cu efectul convecției. Conducția termică este luată în considerare numai în direcția radială.

Ținând seamă de această condiție, ecuația devine:

$$k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.7)$$

condițiile la limită sunt:

- în zona meniscului temperatura de turnare  $T_t$ ,  $z=0$ ,  $0 < x < X$ ,  $0 < y < Y$ ,  $0 < r < R$ ;  
 $T(x, y) = T_t \quad (4.8)$
- pentru suprafața exterioară:

$$x = 0, k \frac{\partial T}{\partial x} = q_0 \quad (4.9)$$

$$y = 0, k \frac{\partial T}{\partial y} = q_0 \quad (4.10)$$

Se consideră coeficientul de transfer de căldură prin convecție  $\alpha$  ca fiind egal cu:

$$\alpha = \frac{q_0}{\Delta T} \quad (4.11)$$

unde  $\Delta T$  este diferența de temperatură între suprafața semifabricatului și mediul de răcire [60].

Rezolvarea ecuației (4.7) folosind condițiile la limită a reprezentat pentru o bună perioadă o temă predilectă pentru matematicienii și inginerii care studiau acest domeniu. În timp subiectul a fost abordat folosindu-se mai multe metode, [70]:

Integrala de profil – subiect tratat de Goodman [72] și adaptat la tehnologia de turnare continuă de către Hill [73, 74] care rezolva problema considerând că profilul termic poate fi asumat utilizând seriile de puteri. Metoda și modelul de lucru au fost îmbunătățite de Brimacombe [75] utilizând observațiile altor doi cercetători, Miyazawa și Muchi [76] efectuate la turnarea continuă a sleburilor. Seriile de puteri reprezintă o generalizare naturală a funcțiilor polinomiale și tot odată o clasă particulară de serii de funcții, motiv pentru care putem afirma că posedă aproape toate proprietățile pentru o bună modelare a turnării continue, acestea având și

posibilitatea introducerii unor proprietăți speciale (continuitate, integrabilitate, derivabilitate, etc.) care le leagă de funcțiile polinomiale, [60].

**Diferențele finite explicite** – metoda are ca bază de plecare evoluția discretă în subdiviziunile unei secțiuni  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  în timpul  $\Delta t$ . Dacă câmpul de analiză se descompune în elemente rectangulare (fig.4.6) atunci transmisia căldurii este guvernată de ecuația fluxului de căldură  $q_0$ , sistemul este evaluat doar prin pașii de timp  $\Delta t$  și astfel se obține o formă explicită a ecuației cu derivate finite, [60]:

$$T'_{i,j} = T_{i,j} + \alpha \Delta t \left[ \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{(\Delta y)^2} \right] \quad (4.12)$$

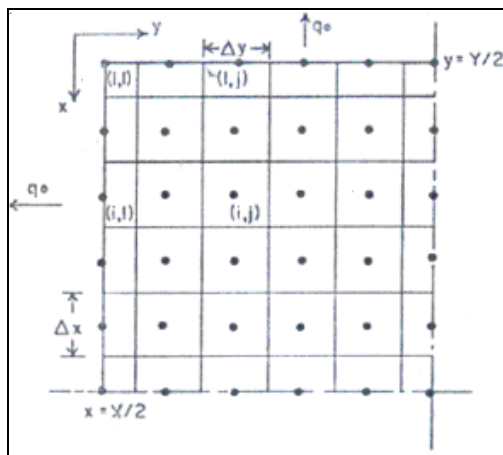


Fig.4.6. Câmpul de analiză descompus în elemente rectangulare, [60, 71]

Ecuația (4.12) oferă informații pentru nodul  $(i,j)$  și pentru pasul următor. În acord cu această metodă, următoarea temperatură se calculează pornind de la o temperatură cunoscută, având ca pas timpul,  $\Delta t$ . Pentru explicarea ecuației cu diferențe finite mărimea spațiului de lucru este  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta t$ , dar ea nu poate fi aleasă arbitrar, doar dacă se cunosc condițiile stabile de plecare, criteriu care conduce spre determinarea distribuției temperaturii numai în condițiile satisfacerii inegalității (4.13) pentru elementele interioare [60]:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2\alpha[(\Delta x)^{-2} + (\Delta y)^{-2}]} \quad (4.13)$$

Elementul  $(\Delta x, \Delta y)$  este implicat în calcul iar pasul de timp este folosit pentru a se obține o soluție stabilă. Restricția impusă de inegalitatea (4.13) este totuși de nedorit dacă calculul se extinde pentru o perioadă mai lungă de timp [60].

Diferențele finite implicite – derivata spațială este în acest caz variabilă, urmărind evaluarea fluxului de căldură pentru nodul  $(i,j)$  cu variația timpului, de forma[60]:

$$-\lambda t_{i-1,j} + (1 + 2\lambda + 2\beta)T'_{i,j} - \lambda T'_{i+1,j} - \beta T'_{i,j-1} - \beta T'_{i,j+1} = T_{i,j} \quad (4.14)$$

unde  $T$  reprezintă temperatura elementului unitar în pasul următor de timp,  $t$ ;

$$\lambda = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2}, \quad \beta = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta y^2} \quad (4.15)$$

Ecuatie de mai sus nu poate fi rezolvată deoarece are cinci necunoscute (temperaturi), motiv pentru care trebuie scrisă câte o ecuație pentru fiecare element și pas de timp în parte. Pentru soluționarea acestor ecuații se recomandă soluția dată de Carnahan, Luther și Wikes [60, 77, 78].

Pentru un semifabricat rotund, țagla țevă, considerând dimensiunea semifabricatului ca fiind definită prin  $r$  (raza), se poate scrie pentru suprafața semifabricatului fluxul de căldură  $q_0$  cu relația:

$$q_0 = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4.16)$$

echivalentă cu,

$$\alpha \Delta T = -k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (4.17)$$

Coeficientul de conductivitate termică variază cu temperatura liniar, astfel:

$$k = a + bT \quad (4.18)$$

Conducția termică în oțelul lichid este  $k=420W/mK$ .

Ca urmare a simetriei semifabricatului, condiția la centru ( $r = r_i$  și  $0 \leq z \leq L$ ) este:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4.19)$$

interfețe solid/lichid ( $r = r_i$  și  $0 \leq z \leq L$ ):

$$\left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right)_l + \left( k \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{cm} = \rho Q_l \frac{dr_i}{dt} \quad (4.20)$$

Ecuatia diferențială, împreună cu condiția la limită se rezolvă prin metoda elementului finit [60].

#### 4.2.4. Transferul de căldură peste interstiții

Transferul de căldură la nivelul cristalizorului se realizează în general prin conducție la interfața dintre suprafața crustei și cristalizor. Cea mai mare dificultate în modelarea transferului de căldură o reprezintă determinarea cantității de căldură transferate în zona interstițiului ( $q_{gap}$ ), aceasta variind în funcție de timp, de poziția pe înălțimea cristalizorului a crustei interstițiului, de grosime ( $d_{gap}$ ) și de proprietățile interstițiului, strat de ungere care umple spațiul, cum ar fi  $h_{gap}$ ,  $h_{rad}$  [60].

$$q_{gap} = \left( h_{rad} + \frac{h_{gap}}{d_{gap}} \right) (T_{cm}^0 - T_k^0) \quad (4.21)$$

unde:  $T_{cm}^0$  - temperatura oțelului în crusta marginală;

$T_k^0$  - temperatura oțelului în cristalizor;

$h_{rad}$  - coeficient de schimb de căldură prin radiație;

$h_{gap}$  - coeficient de transfer termic;

Transferul de căldură prin interstițiu, reglează transferul fluxului de căldură din oțel ( $q_{int}$ ) spre cristalizor. Pentru calculul acestuia în fiecare poziție (pe verticală, în jos), trebuie evaluat coeficientul de transfer de căldură  $h_{gap}$ , între temperatura de suprafață a crustei marginale și cea a cristalizorului [60]:

$$q_{\text{int}} = h_{\text{gap}}(T_{\text{cm}} - T_k) \quad (4.22)$$

Conducția căldurii depinde de rezistența termică a patru straturi diferite de materiale: crustă, zgură lichidă, zgură solidă și interstițiu (funcție de timp, de grosimea medie a celor patru straturi și de conductivitatea termică a acestora).

Căldura latentă de solidificare a zgurii lichide reprezintă o mică parte din căldura transferată (putând fi considerată neglijabilă în cadrul unui model matematic) [60, 79].

Diferența de contracție este influențată de forma și conicitatea cristalizorului.

În cadrul unui model toate neregularitățile din suprafața crustei pot fi încorporate în adâncimea mărcii,  $d_{\text{mark}}$ , și lățimea acesteia  $L_{\text{mark}}$ .

Dacă se consideră că mărcile de oscilație sunt de formă triunghiulară atunci adâncimea medie a oscilației este:

$$d_{\text{osc}} = \frac{0,5 \cdot L_{\text{mark}} \cdot d_{\text{mark}}}{L_{\text{pitch}}} \quad (4.23)$$

unde  $L_{\text{pitch}}$  reprezintă distanța dintre două mărci de oscilație consecutive.

Mărcile de oscilație influențează transferul de căldură în două moduri:

- reduc conducția căldurii datorită apariției unui spațiu suplimentar în contact cu crusta;
- consumă zgură (deci afectează grosimea stratului de zgură).

Mărcile de oscilație se presupune că sunt umplute fie cu aer, fie cu zgură sau cu amestec de cele două, funcție de temperatura locală a suprafeței crustei marginale.

Transmisia căldurii prin radiație are loc doar în stratul cald și reprezintă aproximativ 10% din transferul total de căldură [60].

#### 4.2.5. Bilanțul de masă în stratul de zgură

Cantitatea de căldură degajată în acest proces este dependentă de:

- parametrii tehnologiei de turnare continuă;
- proprietățile fizice și chimice ale oțelului;
- proprietățile fizice și chimice ale prafului de lubrifiere (un praf cu proprietăți de fuzibilitate necorespunzătoare generează frecvent un strat suplimentar de zgură care mărește rezistența de transfer a căldurii dinspre crustă spre peretele cristalizorului).

Deoarece schimbul de căldură este legat și de transferul de masă se prezintă în continuare câteva aspecte teoretice legate de bilanțul de masă al prafurilor de turnare în procesul de topire, trecere în stare lichidă și apoi zgurificare, cristalizare și legătura acestora cu schimbul de căldură din cristalizor.

În mod natural zgura curge în interstițiu și formează două straturi diferite, unul solid și altul lichid care se deplasează cu viteze diferite.

Viteza stratului solid ( $V_{zs}$ ) este cuprinsă întotdeauna între zero și viteza de turnare ( $V_t$ ). Aceasta poate fi exprimată în funcție de intrările de zgură sau prafuri solide din sistem ( $f_p$ ), astfel:

$$V_{zs} = f_p V_t \quad (4.24)$$

Presupunând că fluxul lichid are o mișcare de tip laminar Couette, viteza stratului lichid de zgură este caracterizată de relația Navier-Stokes:



$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial V_z}{\partial x} \right) = (\rho_{ol} - \rho_z) \quad (4.25)$$

Forța care se opune fluxului din interstițiu, este generată de diferența dintre presiunea ferostatică a oțelului lichid,  $\rho_{ol}g$ , care presează crusta solidă și greutatea medie a zgurii,  $\rho_z g$ . Viteza medie a zgurii lichide rezultă aplicând condițiile la limită pentru viteza de turnare în zona caldă și pentru viteza zgurii solide în zona rece. Vâscozitatea este o proprietate care influențează întregul bilanț termic și de masă. Vâscozitatea zgurii topite variază exponențial cu temperatura:

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T_0 - T_{fsol}}{T - T_{fsol}} \right)^n \quad (4.26)$$

unde  $\mu$  este vâscozitatea măsurată la temperatura de referință de 1300°C iar  $n$  și respectiv  $T_{fsol}$  sunt parametrii potriviți datelor măsurate.

Pentru a determina consumul de pulbere este nevoie de un echilibru de masă. Neglijând consumul de carbon, care arde în timpul procesului putem exprima consumul de praf ca fiind masa de zgură raportată la tona de semifabricat turnat [60,69,79,80].

#### 4.2.6. Conducția căldurii în cristalizer

Este importantă cunoașterea modului în care are loc transferul de căldură de la oțelul lichid spre cristalizer concomitent cu fenomenul de formare a crustei, acest fenomen având influență majoră asupra calității semifabricatului și asupra bunei funcționări a mașinii de turnare continuă. Conform modelelor studiate până în prezent de către mai mulți cercetători, printre care și Meng și Thomas [79], se poate afirma că transferul de căldură din cristalizer este descris destul de bine din punct de vedere tehnologic, dacă într-o secțiune verticală se acceptă o stare de echilibru, cu o variație a temperaturii în planul XZ, având în partea superioară o conductivitate constantă, astfel:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} T + \frac{\partial^2}{\partial z^2} T = 0 \quad (4.27)$$

Ecuatia (4.27) se rezolvă folosind soluția Fourier, deci fluxul de căldură în cristalizer se poate scrie astfel:

$$q_{int} = -\alpha_k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.28)$$

unde  $\alpha_k$  - coeficientul de transfer de căldură.

$$T_{kHot} = T_{apa} + q_{int} \left( \frac{1}{\alpha_{apa}} + \frac{d_k}{k_k} \right) \quad (4.29)$$

unde:  $T_{kHot}$  – temperatura pe fața fierbinte a cristalizerului din cupru;  
 $T_{apa}$  – temperatura apei de răcire;  
 $q_{int}$  – fluxul de căldură în întreaga interfață;  
 $\alpha_{apa}$  – coeficientul de transfer de căldură pentru apa de răcire;  
 $d_k$  – grosimea cristalizerului;  
 $d_k/k_k$  – rezistența;

și meniscul este poziționat la 70-100 mm de partea superioară.

Căldura totală extrasă din cristalizor,  $Q$ , se determină în funcție de diferența de temperatură a apei de răcire la ieșire și la intrare, astfel:

$$Q = \frac{V_t}{z_k} \sum_k q_i \Delta t \quad (4.30)$$

unde  $z_k$  – înălțimea.

Rata de transfer de căldură trebuie să fie egală cu creșterea temperaturii apei de răcire din cristalizor.

$$\Delta T_{apa \text{ fata fierbinte}} = \sum_k \frac{q_{int} L_{ch} V_t \Delta t}{\rho_{apa} c_{apa} V_t w_{ch} d_{ch}} \quad (4.31)$$

unde:  $q_{int}$  – fluxul de căldură în întreaga interfață;  
 $w_{chr}$ ,  $d_{chr}$ ,  $L_{ch}$  – dimensiunile camerei de răcire ( $L_{ch}$ - înălțimea) [60, 79];

#### 4.2.7. Transmisia căldurii prin convecție în apă

În zona cristalizorului apa care spală suprafața exterioară a țevii de cupru primește încontinuu căldură de la aceasta. Transferul efectiv de căldură între suprafața exterioară a cristalizorului și apa de răcire se calculează ținând seamă de rezistența termică a eventualelor depuneri de pe suprafața tubului de cupru spălată de apa de răcire,  $d_{dep}$ , și coeficientul acestor depuneri,  $k_{dep}$ , relația fiind [79]:

$$\alpha_{apa} = \frac{1}{\frac{1}{h_f} + \frac{d_{dep}}{k_{dep}}} \quad (4.32)$$

Ținând seamă de complexitatea procesului de transfer de căldură pe lățimea cristalizorului, coeficientul de transfer termic între cristalizor și apa de răcire,  $\alpha_f$ , încorporează fluxul de căldură din canalul de apă și cel de la bază.

Coeficientul de transfer de căldură între apă și părțile laterale ale canalului cu apă,  $\alpha_w$ , se poate calcula presupunând curgerea turbulentă printr-o conductă cu diametrul echivalent  $D$ , astfel, [60]:

$$\alpha_w = \frac{k_{apa}}{D} \left( 5 + 0,015 \text{Re}_{apaf}^{c_1} \text{Pr}_{apaw}^{c_2} \right) \quad (4.33)$$

unde:  $k_{apa}$  – coeficientul de transfer termic prin conducție în apă;  
 $c_1, c_2$  – constante empirice date de relațiile de mai jos;  
 $\text{Re}_{apaf}$  – criteriul Reynolds pentru apa care curge pe fața rece a cristalizorului;  
 $\text{Pr}_{apaw}$  – criteriul Prandtl pentru apa din cristalizor pe fața rece;

$$D = \frac{2d_{ch} w_{ch}}{d_{ch} + w_{ch}} \quad (4.34)$$

$$c_1 = 0,88 - \frac{0,24}{4 + \text{Pr}_{apaw}} \quad (4.35)$$

$$c_2 = 0,333 + 0,5e^{-0,6\text{Pr}_{apaw}} \quad (4.36)$$

Prezența canalului cu apă poate crește sau poate diminua transferul termic la tubul cristalizorului de grosime uniformă,  $d_k$ .

Dimensiunile aripioarelor  $d_{chr}$ ,  $L_{chr}$  și  $w_{ch}$  influențează de asemenea

coeficientul de transfer termic, în sensul mărimii,  $\alpha_{fin} > \alpha_w$  (dar în cele mai multe cazuri au valori apropiate) [60].

$$\alpha_{fin} = \frac{\alpha_w w_{ch}}{L_{ch}} + \frac{\sqrt{2\alpha_w k_k - w_{ch}}}{L_{ch}} + \tanh \sqrt{\frac{2\alpha_w d_{ch}}{k_k (L_{ch} - w_{ch})}} \quad (4.37)$$

#### 4.2.8. Zona de stropire de sub cristalizor

Sub cristalizor fluxul de căldură de la suprafața semifabricatului turnat continuu este evacuat în apa de stropire pulverizată între rolele de sprijin prin duzele de pulverizare. Fluxul de căldură are mai multe componente, [79]:

- $\alpha_{spray}$  – componenta convectivă în apa de stropire;
- $\alpha_{rad-spray}$  – componenta convectivă de radiații în mediul pulverizat;
- $\alpha_{conv}$  – convecția naturală;
- $\alpha_{roll}$  – conducția termică în rolele de sprijin în zonele de contact cu semifabricatul;

În viziunea multor cercetători renumiți printre care Meng și Thomas [79] pentru a explica fenomenele care se produc în aceasta etapă modelele au un rol foarte important, acestea având o importanță deosebită pentru inginerii practicieni și sunt cu atât mai utile cu cât sunt mai simple, mai ușor de înțeles și aplicat.

Modelul permite simularea fenomenelor de transfer de căldură în timpul turnării continue, atunci când semifabricatul ajunge în zona de răcire secundară, extracția de căldură în apa pulverizată este în funcție de debitul apei utilizate, cu următoarea formulă [79]:

$$\alpha_{spray} = A Q_{apa}^c (1 - b T_{spray}) \quad (4.38)$$

unde:  $Q_{apa}$  (l/m<sup>2</sup>s) – debitul specific de apă în zonele de stropire;

$T_{spray}$  (°C) – temperatura apei de stropire;

$A, c, b$  – coeficienți de corelație empirici stabiliți de Nazaki, [79]:

$$A = 0,3925;$$

$$c = 0,55;$$

$$b = 0.0075;$$

$$\alpha_{rad-spray} = \sigma \varepsilon_{ol} (\theta_s - \theta_{amb}) (\theta_s^2 + \theta_{spray}^2) \quad (4.39)$$

unde:  $\sigma$  – constanta Stefan Boltzman;

$\varepsilon$  – coeficient de radiație;

$\theta_s, \theta_{amb}, \theta_{spray}$  – temperaturile exprimate în grade Kelvin.

Convecția naturală poate fi considerată ca fiind constantă pentru fiecare zonă de stropire. Pentru simplificare în cazul apei de stropire se poate utiliza valoarea de 8,7 W/m<sup>2</sup>K.

Cel mai bun transfer de căldură are loc atunci când pulverizarea apei ajunge la consistența ceții.

Conducția termică în rolele de sprijin și de ghidare în zonele de contact cu semifabricatul se poate calcula cu formula:

$$\alpha_{roll} = \frac{(\alpha_{rad-spray} + \alpha_{conv} + \alpha_{spray}) L_{spray} + (\alpha_{rad-spray} + \alpha_{conv}) (L_{spray-pitch} - L_{spray} - L_{roll-cont})}{L_{roll-cont} (1 - f_{roll})} \quad (4.40)$$

Valoarea uzuală pentru  $f_{roll}$  este de 0,05, [60].

#### 4.2.9. Influența compoziției chimice asupra transferului termic

##### 4.2.9.1. Importanța fazelor

Din diagrama de fază Fe-C, folosind regula pârghiei putem determina fazele

fiecărei mărci de oțel.

Influența compoziției chimice asupra transferului termic a fost studiată de Kagawa și Okamoto [82] în scopul determinării curbelor de temperatură specifice, pe baza cărora s-au determinat pentru fiecare analiză chimică temperatura liquidus, temperatura solidus și temperatura pentru transformarea peritectică și proporția fazelor [60].

Modelul analitic stabilit în acest sens de Clyne-Kurz a fost mai apoi dezvoltat și extins de Thomas și Won [83]. Astfel pentru un oțel cu 0,044%C, 0,022%Mn, 0,009%Si, 0,006%S, 0,01%P, și 0,049%Al, oțel carbon simplu având temperaturile  $T_{liq}=1528^{\circ}\text{C}$  și  $T_{sol}=1509^{\circ}\text{C}$ , cu o viteză de răcire de  $10^{\circ}\text{C/s}$ , modelul dă valorile:  $T_{liq}=1532^{\circ}\text{C}$  și  $T_{sol}=1510^{\circ}\text{C}$ . Modelul utilizat, ține seamă de fenomenele de microsegregație din spațiul dintre brațul dendritelor și de proporția fazei în funcție de rata de răcire și compoziția oțelului [60].

#### 4.2.9.2. Importanța analizei chimice

Pentru oțelurile carbon au fost determinate următoarele funcții dependente de procentul de carbon și temperatura [82,83]:

- Coeficientul de conducție termică

$$K = k_a f_a + k_{\delta} f_{\delta} + k_{\gamma} f_{\gamma} + k_l f_l \quad (4.41)$$

unde:  $k_a = (80,91 - 9,9269 \times 10^{-2} T + 4,613 \times 10^{-5})(1 - a_1(\%C)^{a_2})$

$$k_{\delta} = (20,14 - 9,313 \times 10^{-3} T)(1 - a_1(\%C)^{a_2})$$

$$k_{\gamma} = 21,6 - 8,35 \times 10^{-3} T$$

$$k_l = 39$$

$$a_1 = 0,425 - 4,385 \times T^{-4}$$

$$a_2 = 0,209 + 1,09 \times T^{-3}$$

- Căldura specifică:

$$C_p = C_p^{\alpha} f_{\alpha} + C_p^{\gamma} f_{\gamma} + C_p^{\delta} f_{\delta} + C_p^l f_l \quad (4.42)$$

unde  $C_p^i = f(\theta)$  temperatura în grade K, pentru  $i = a, \gamma, \delta$  fazele specifice transformărilor la scăderea temperaturii;  $f_i$  – proporția din faza respectivă.

- Densitatea:

$$\rho(\theta) = \rho_a f_a + \rho_{\gamma} f_{\gamma} + \rho_{\delta} f_{\delta} + \rho_l f_l \quad (4.43)$$

unde:  $\rho_a = f(\theta)$ ,  $\rho_{\gamma} = f_1(\theta, \%C)$ ,  $\rho_{\delta} = f_2(\theta, \%C)$ ,  $\rho_l = f_3(\theta)$  sunt funcții de temperatura în grade K și de %C, [60].

### 4.3. Concluzii

Din studiul efectuat rezultă următoarele concluzii:

- pentru elaborarea unui model matematic care să descrie procesul de solidificare în timpul turnării continue la MTC au fost utilizate următoarele ipoteze de lucru: procesul de turnare continuă este în stare de echilibru; semifabricatul este simetric; energia evacuată în procesul de frecare internă în lichid este neglijabilă; suprafața liberă a lichidului (zona de sus a cristalizorului) este acoperită cu un strat de protecție (zgoră), prin care se presupune că pierderea de căldură este zero.
- rezolvarea ecuației modelului de transfer de căldură folosind condițiile la limită a fost abordat folosindu-se mai multe metode: integrala de

- profil; diferențele finite explicite; diferențele finite implicite etc.
- transferul de căldură la nivelul cristalizerului se realizează în general prin conducție la interfața dintre suprafața crustei și cristalizer. Cea mai mare dificultate în modelarea transferului de căldură o reprezintă determinarea cantității de căldură transferate în zona interstițiului;
- cantitatea de căldură degajată în acest proces este dependentă de: parametrii tehnologiei de turnare continuă; proprietățile fizice și chimice ale oțelului; proprietățile fizice și chimice ale prafului de lubrifiere (un praf cu proprietăți de fuzibilitate necorespunzătoare generează frecvent un strat suplimentar de zgură care mărește rezistența de transfer a căldurii dinspre crustă spre peretele cristalizerului), de grosimea acestuia;
- cunoașterea modului în care are loc transferul de căldură de la oțelul lichid spre cristalizer concomitent cu fenomenul de formare a crustei, prezintă importanță deosebită, având în vedere că acest fenomen are influență majoră asupra calității semifabricatului și asupra bunei funcționări a mașinii de turnare continuă.
- transferul efectiv de căldură între suprafața exterioară a cristalizerului și apa de răcire se calculează ținând seamă de rezistența termică a eventualelor depuneri de pe suprafața tubului de cupru spălată de apa de răcire;
- repartizarea fluxului de căldură transferat din cristalizer, este dependent de viteza de turnare și de poziția în cristalizer a zonei analizate aflate în curs de solidificare, cea mai mare cantitate de căldură fiind evacuată în intervalul 90 – 150 mm din lungimea cristalizerului, începând cu nivelul de turnare (acesta fiind considerat la un grad de umplere a cristalizerului de 80 – 85%);
- în zona de răcire secundară (sub cristalizer) fluxul de căldură de la suprafața semifabricatului turnat continuu este evacuat în apa de stropire pulverizată între rolele de sprijin prin duzele de pulverizare;
- în viziunea multor cercetători modelele au un rol foarte important, acestea având o importanță deosebită pentru inginerii practicieni și sunt cu atât mai utile cu cât sunt mai simple, mai ușor de înțeles și aplicat.

## PARTEA a II-a

### CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PROPRII PRIVIND MODELAREA MATEMATICĂ A REGIMULUI TERMIC LA TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI

#### 5. CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND ELABORAREA OȚELULUI ÎN CUPTOARE CU ARC ELECTRIC TIP E.B.T ȘI TURNAREA CONTINUĂ

##### 5.1. Elaborarea oțelului

Experimentările s-au efectuat la o Oțelărie Electrică (O.E) din țară, echipată cu un cuptor cu arc electric tip EBT, de capacitate 100t, instalație de procesare în oală tip L.F. și o mașină de turnare continuă (MTC) cu 5 fire. Pentru studiul influenței temperaturii asupra regimului termic la elaborarea și turnarea oțelului în cadrul experimentărilor au fost urmărite un număr de 12 șarje de oțel pentru țevi, marca S 235 conform EN 10297-1, sub formă de țagă cu secțiunea  $\Phi 310\text{mm}$  și  $\Phi 270\text{mm}$ .

**Tabelul 5.1.** Încărcătura cuptorului EBT

Nr. crt.	Încărcătură metalică, [t]								Durată încărcare /benă, [min]				Cantitate încărcată/benă, [t]			
	f.v. ușor	f.v. greu	șpan	baloți	deșeu intern	scurtături	fontă	Total	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
1.	8,6	10	58,3	10,2	24,9	9,2	10	131,2	5	5	5	4	52,7	36,6	25,7	16,2
2.	9,5	20	46,8	10	14,2	9,9	10,3	114,45	5	5	5	-	52,6	39,1	28	-
3.	8,2	10	55,5	10,7	21,9	9,2	10,1	126,5	5	4	4	-	50	38,9	37,6	-
4.	8,5	10	48,4	10,8	25,6	10	9,8	123,1	5	5	3	-	54,1	36,9	32,1	-
5.	9,5	10	54,1	11	16,2	10	10,5	121,3	5	3	3	-	56,2	41,2	23,9	-
6.	11	10	52,5	10,9	19,2	10	11	124,6	5	3	3	-	61,2	38,9	24,5	-
7.	7,9	15	46,2	9,9	22,6	13,7	9,7	125	5	4	5	-	68,9	39,1	17	-
8.	3,1	15	69,7	14,8	19	5,1	9,5	136,2	5	5	5	-	51,7	47,3	37,2	-
9.	3,5	15	47,1	16,1	15,7	7,3	10,1	114,8	6	5	5	-	51,6	41,7	21,5	-
10.	7,2	15	56,9	15,5	9,8	6,4	8,6	119,4	5	5	5	-	47	44,5	27,9	-
11.	5,6	15	53,5	15,4	13	6,1	10,3	118,9	5	5	5	-	50	41,3	27,6	-
12.	8,6	10	20,1	16	41,8	3,9	9,9	110,3	5	5	3	-	48,7	41,5	20,1	-

Structura încărcăturii metalice, numărul de bene, încărcătura și durata încărcării/benă se prezintă în tabelul 5.1 și în figurile 5.1-5.3. De asemenea consumul de energie pentru topirea încărcăturii din fiecare benă, durata topirii, temperatura oțelului la terminarea topirii și compoziția chimică sunt prezentate în tabelul 5.2 și figura 5.4.

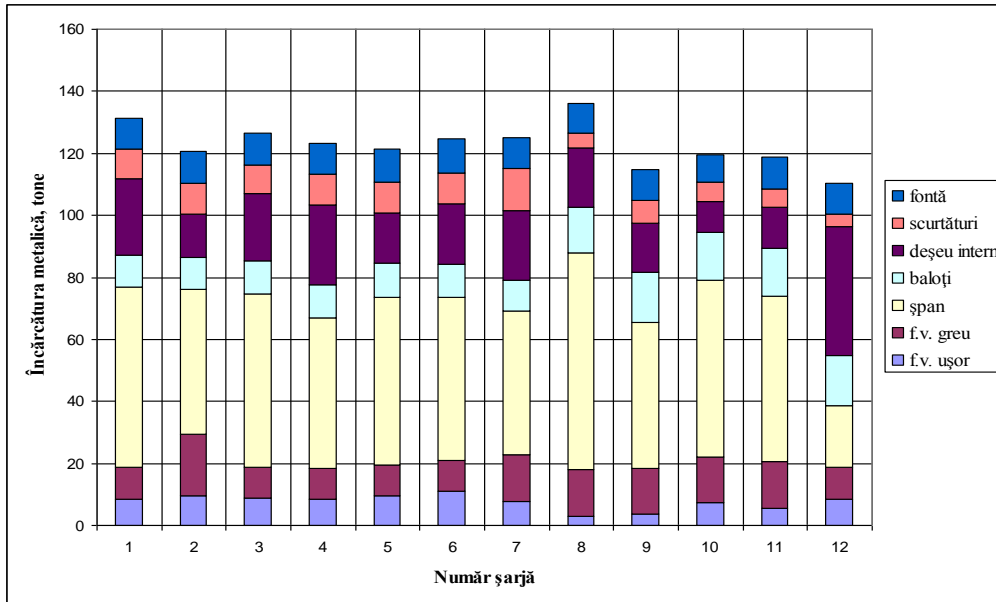


Fig.5.1. Componerea încărcăturii metalice

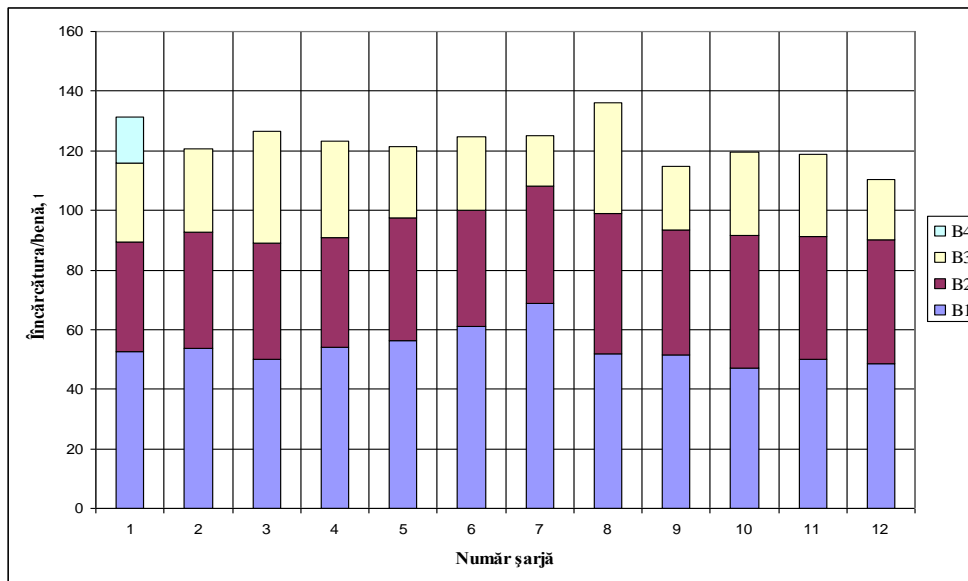
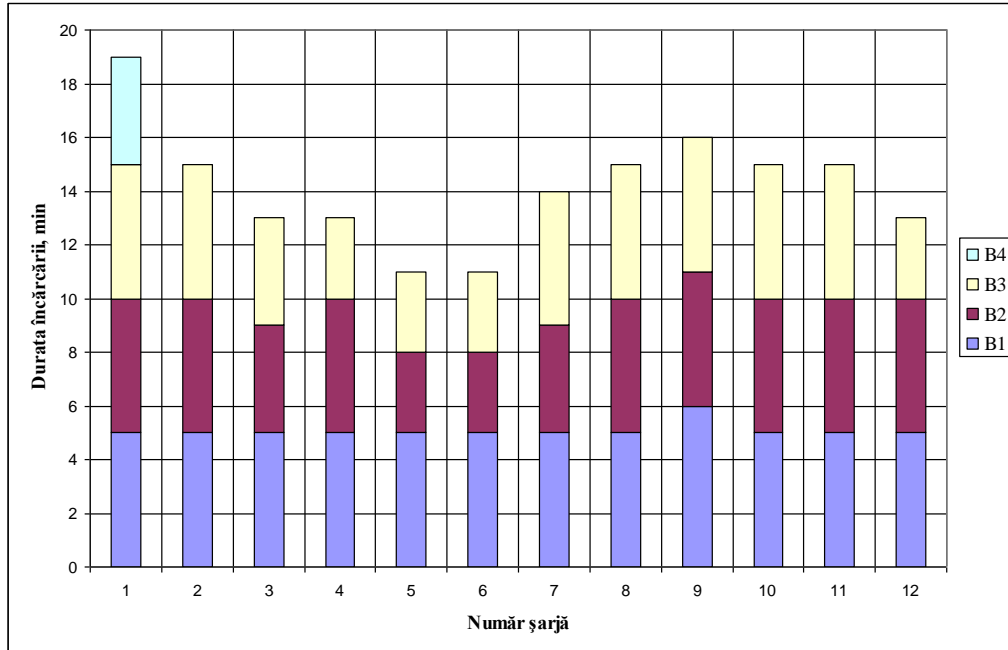
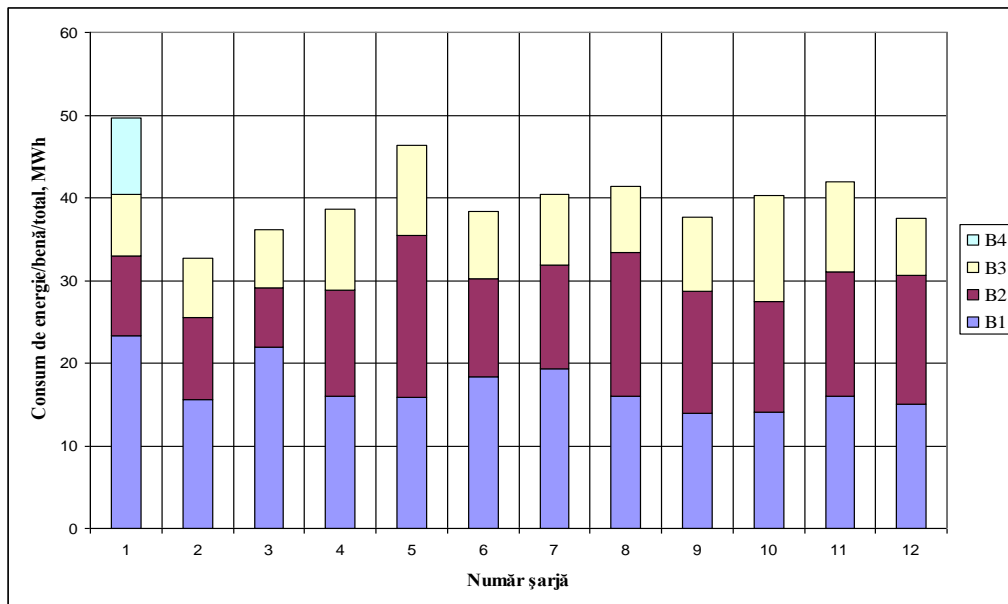


Fig.5.2. Repartizarea încărcăturii pe bene

Din punct de vedere a încărcăturii metalice, se constată o încărcătură variată, compusă din diferite sorturi de fier vechi, provenit atât din recuperări din exteriorul firmei cât și din interiorul acesteia. Ca urmare a proporțiilor mari de șpan și fier vechi balotat se poate considera că încărcătura a fost de calitate obișnuită. Pentru carburare s-a utilizat fontă solidă, în același timp fiind urmărită și diluarea încărcăturii în elemente ca: Zn, Cu, Sn Pb etc.



**Fig.5.3.** Durata încărcării benelor



**Fig.5.4.** Consumul energetic pentru topirea fiecărei bene de încărcătură

Spre sfârșitul topirii se prelevează o probă pentru determinarea compoziției chimice, de fapt, în cele mai multe cazuri, este singura probă pentru determinarea compoziției chimice care se prelevează din cuptor, corecția făcându-se, în general,

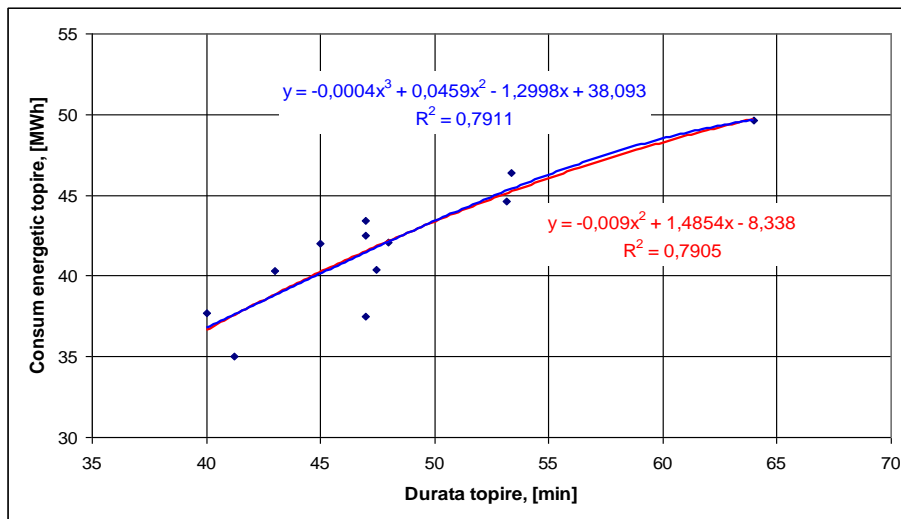


în timpul tratamentului secundar (în oala de turnare sau în LF) și se măsoară temperatura băii metalice.

Topirea, ca și perioadă de elaborare, se realizează cu cel mai mare consum energetic (fig.5.4), acesta fiind influențat de numărul de bene din care se realizează încărcarea cuptorului, structura încărcăturii și gradul de pregătire al acesteia.

**Tabelul 5.2.** Date privind topirea încărcăturii

Nr. crt.	Compoziția chimică la topire, [%]				Temperatura băii metal, [°C]	Durata topire [min]	Consum energetic/benă, [MWh]				
	C	Mn	S	P			B1	B2	B3	B4	Total
1.	0,09	0,08	0,048	0,012	1549	64	23,3	9,7	7,4	9,2	49,6
2.	0,42	0,21	0,058	0,019	1553	41	15,6	9,9	7,2	-	35
3.	0,27	0,22	0,04	0,017	1550	47	21,9	7,2	7,1	-	43,44
4.	0,16	0,15	0,042	0,013	1555	47	16	12,8	9,8	-	42,53
5.	0,08	0,13	0,052	0,013	1554	53	15,8	19,7	10,9	-	46,4
6.	0,25	0,22	0,054	0,015	1549	48	18,3	11,9	8,1	-	42,1
7.	0,21	0,18	0,058	0,016	1563	47	19,3	12,5	8,6	-	40,4
8.	0,12	0,14	0,038	0,006	1598	53	16	17,4	8	-	44,6
9.	0,06	0,09	0,036	0,005	1601	40	14	14,7	9	-	37,7
10.	0,12	0,12	0,046	0,008	1553	43	14,1	13,3	12,9	-	40,3
11.	0,08	0,09	0,045	0,008	1543	45	16	15,1	10,9	-	42
12.	0,11	0,09	0,05	0,007	1555	47	15,1	15,5	6,9	-	37,5



**Fig.5.5.** Variația consumului de energie în funcție de durata topirii (capacitate cuptor 100t)

O încărcătură mai puțin pregătită cu o structură mai voluminoasă, cu mai mult fier vechi ușor, mărește durata topirii, ceea ce duce la creșterea consumurilor energetice – figurile 5.4 (șarjele nr. 1; 3; 6; 7 și 8) și respectiv 5.5.

Deci, pentru reducerea duratei topirii și implicit a consumului energetic, încărcătura trebuie să fie avansat pregătită și eventual, acolo unde este posibil, preîncălzită în benă cu căldura gazelor arse, captate tot de la cuptorul electric cu arc, după epurarea acestora. Este de fapt o tendință evidențiată pe plan mondial și anume de reutilizare a produselor secundare, inclusiv a gazelor arse în scopul

eficientizării proceselor tehnologice.

O soluție aplicată frecvent de cei mai mulți producători de oțel este post-combustia combinată.

În tabelul 5.2. sunt evidențiate valorile pentru principalele elemente din compoziția chimică, respectiv C, Mn, S, P (Si se oxidează la urme în primele minute ale topirii).

Variația acestor elemente este prezentată și grafic, în figura 5.6.

Din analiza datelor prezentate, se observă ca există o variație semnificativă a compoziției chimice, ceea ce face ca aceasta să nu se încadreze în limite restrânse, ci este destul de aleatoare, în special pentru C: 0,06-0,44%. Acest lucru este datorat încărcăturii variate cu care se încarcă cuptorul (proporție de șpan și fier vechi balotat peste 60%). Un aspect important al topirii este acela al defosforării avansate a băii metalice, fapt evidențiat și prin limitele restrânse de variație ale acestui element: 0,005%P (șarja 9) și 0,019%P (șarja 2).

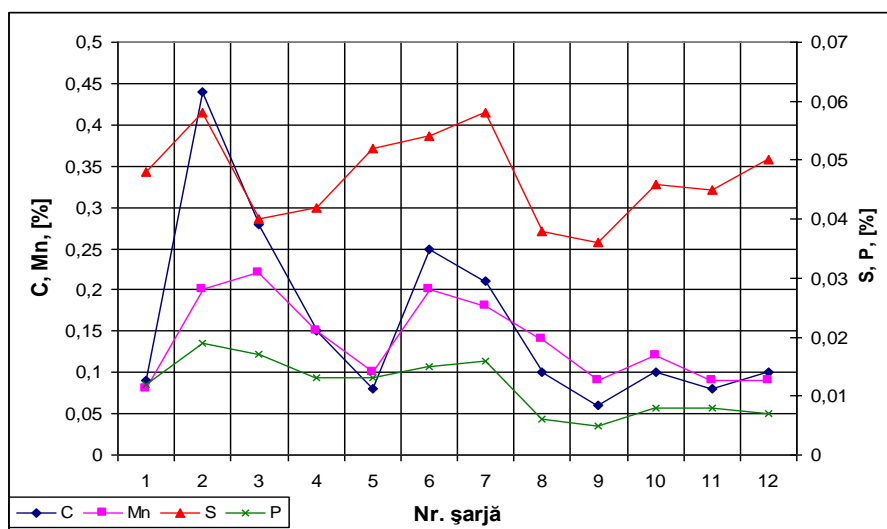


Fig.5.6. Variația compoziției chimice la topire

După terminarea topirii, s-a efectuat o scurtă afinare, pe parcursul căreia s-a insuflat prin lancea Velco, concomitent, oxigen gazos tehnic (cu puritate de 99,6%O<sub>2</sub>) și grafit – pulbere (cu fracția sub 5mm). Scopul este acela de a realiza totuși o afinare a băii metalice și de a decanta avansat în zgură, incluziunile rezultate (produșii de reacție). Pentru aceasta, zgura se spumează (și prin intermediul grafitului prăfos), mărindu-se astfel suprafața de schimb dintre zgură și baia metalică.

Un alt efect urmărit la afinare este creșterea temperaturii băii metalice la valori superioare, capabile să asigure o bună fluiditate a acesteia în timpul tratamentului preliminar, în oala de turnare, imediat ce oțelul a fost evacuat din cuptor. Acest lucru este necesar datorită imposibilității reîncălzii oțelului lichid la cuptor pe de o parte și adaosurilor care se realizează (adaosuri care răcesc suplimentar baia metalică) pe de altă parte.

În final, oțelul este evacuat din cuptor prin intermediul orificiului montat excentric în vatra cuptorului, direct în oala de turnare unde, imediat începe barbotarea cu gaze inerte.

## 5.2. Tratamentul secundar pe instalația de tip L.F.

### 5.2.1. Considerații tehnologice

Obiectivele principale care se urmăresc prin tratarea oțelului lichid în oală (cu aport de căldură fizică – arc electric) în vederea turnării continue sub forma de țagle pentru țevi sunt:

- obiective metalurgice cum sunt controlul compoziției chimice prin practicarea compozițiilor tehnologice optimizate, inclusiv cu diminuarea conținuturilor de elemente reziduale dăunătoare ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ , P, S), și controlul incluzionar (natura, forma, dimensiunile, numărul) sunt premisele pentru realizarea unei calități superioare a oțelului lichid destinat turnării continue a semifabricatelor pentru țevi (omogenitate chimică și termică în întreaga masă a oțelului lichid);
- performanțe procesuale prin stabilirea de obiective termice cum sunt degrevarea agregatului de elaborare de necesitatea supraîncălzirii excesive a oțelului, controlul temperaturii și stabilitatea termică superioară în cursul turnării;
- productivitate și costuri: trecerea întregului proces de rafinare în afara cuptorului, cu creșterea substanțială a productivității cuptorului de topire, realizarea în condiții optime a legăturii dintre agregatul de elaborare și mașina de turnare continuă preluându-se eventualele nesincronizări pentru secvențialitate ridicată, reduceri de consumuri specifice (dezoxidanți, elemente de aliere, energie electrică etc.) și costuri de fabricație a oțelurilor [3, 4].

### 5.2.2. Analiza procesului de tratare a oțelului lichid în instalația LF

Imediat după începerea evacuării oțelului în oala de turnare – figura 5.7. (după ce a pătruns prima porție de oțel lichid în oala preîncălzită), începe și procesul de barbotare cu gaze inerte. Totodată, se fac adaosuri pentru corecția compoziției chimice (FeSi, SiMn, FeMn, grafit), tabelul 5.3 și figura 5.8.



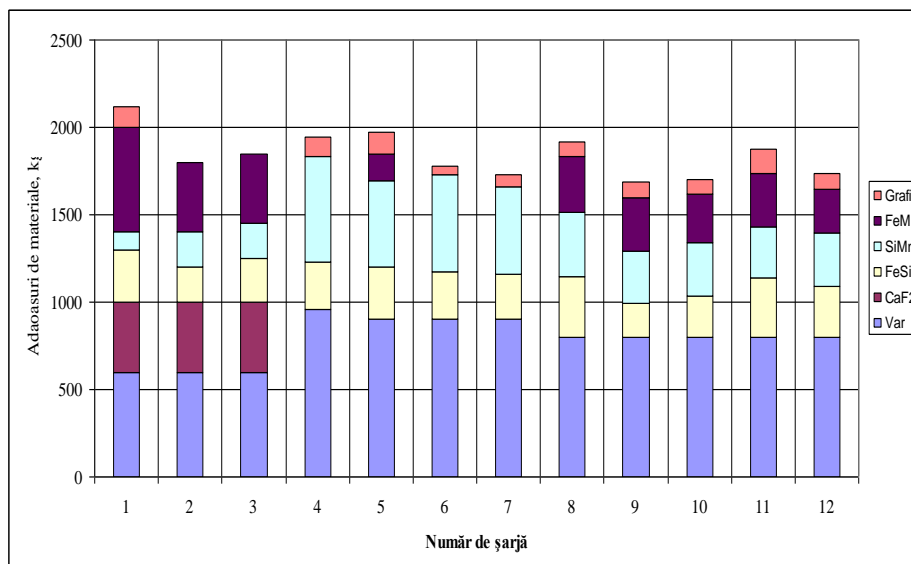
Fig.5.7. Oala de turnare cu oțel lichid, [4]

În tabelul 5.3. sunt prezentate datele de la tratamentul preliminar: adaosurile făcute, durata barbotării, temperatura oțelului la evacuarea acestuia din cuptor precum și compoziția chimică a oțelului după asimilarea elementelor introduse, proba fiind prelevată chiar la intrarea în instalația LF.

**Tabelul 5.3.** Date privind tratamentul oțelului în oala de turnare

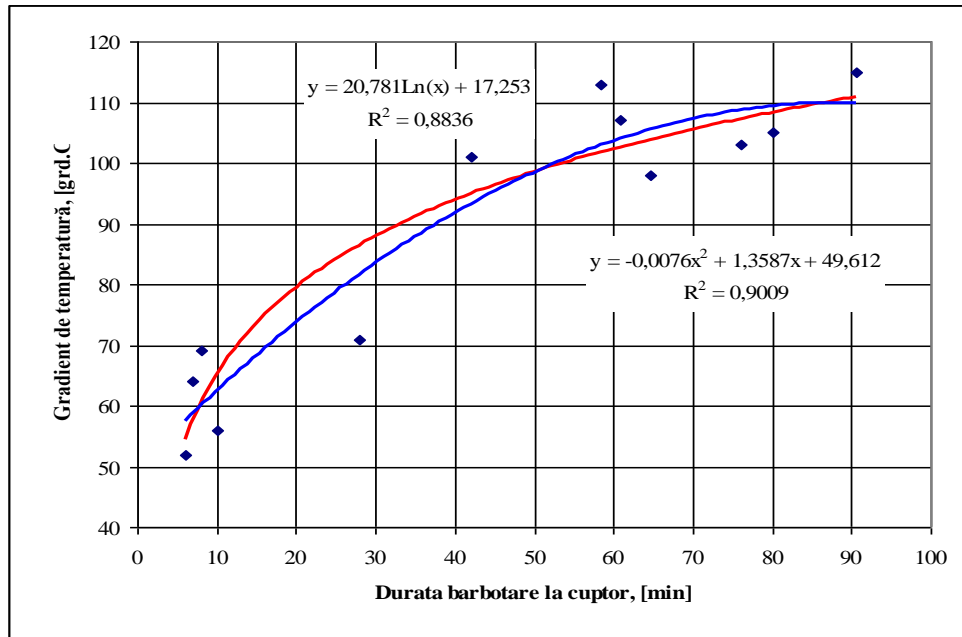
Nr. crt.	Compoziția chimică la intrare LF, [%]					Adaos de materiale și feroaliaje în oala, [Kg]						Barb. la cuptor, [min]	Temp. intrare LF, [°C]
	C	Mn	Si	S	P	Var	CaF <sub>2</sub>	FeSi	SiMn	FeMn	Grafit		
1.	0,14	0,56	0,12	0,052	0,014	600	400	300	100	600	120	85	1573
2.	0,14	0,53	0,15	0,045	0,013	600	400	200	200	400	-	10	1615
3.	0,1	0,6	0,18	0,029	0,015	600	400	250	200	400	-	90	1514
4.	0,12	0,48	0,18	0,038	0,012	960	-	270	600	-	115	72	1554
5.	0,13	0,5	0,23	0,047	0,012	900	-	304	490	150	127	42	1570
6.	0,11	0,54	0,22	0,036	0,014	900	-	276	550	-	50	28	1600
7.	0,11	0,54	0,19	0,038	0,014	900	-	259	498	-	70	8	1603
8.	0,12	0,64	0,42	0,036	0,012	800	-	345	370	321	79	78	1524
9.	0,09	0,39	0,08	0,036	0,01	800	-	194	300	304	92	7	1580
10.	0,12	0,44	0,15	0,03	0,01	800	-	238	304	279	77	6	1599
11.	0,14	0,38	0,16	0,03	0,007	800	-	340	289	307	140	41	1533
12.	0,12	0,4	0,15	0,008	0,005	800	-	290	303	250	95	33	1549

Din analiza datelor din tabelul 5.3. se constată o perioadă foarte mare de barbotare la cuptor: de la 5-10 minute recomandat în literatura de specialitate s-a barbotat și 90 minute (șarja 1, 3, 4, și 8). Pentru aceasta, încă din cuptor s-a intervenit, crescându-se temperatura băii metalice.



**Fig.5.8.** Adaosurile făcute în oala de turnare pentru șarjele studiate

În figura 5.9 este prezentată dependența dintre durata barbotării și gradientul de temperatură (calculat ca diferență dintre temperatura la evacuare și temperatura finală a tratamentului preliminar). Barbotarea oalei pt. o durată mai mare (decât cea recomandată de literatura de specialitate) la cuptor este determinată de sincronizarea intrării oalelor cu oțel lichid la mașina de turnare continuă.



**Fig.5.9.** Dependența dintre durata barbotării la cuptor a oțelului și gradientul de temperatură.

Cu cât durata barbotării este mai mare, cu atât oțelul din oala de turnare este mai rece și mai greu de procesat.

### 5.2.3. Procesul de rafinare în instalația LF

De la cuptor, oala de turnare cu oțelul lichid este transportată la instalația de tratament secundar (rafinare), de tip LF. La începutul tratamentului secundar a fost prelevată o probă pentru determinarea compoziției chimice și s-a măsurat temperatura.

Din analiza datelor prezentate figura 5.10. se constată că, în urma adaosurilor efectuate imediat după evacuare, compoziția chimică tinde deja spre limitele de încadrare a standardului pentru marca elaborată. Se remarcă doar valorile relativ mari pentru S la șarja 5 (max. 0,047%). Nu trebuie însă uitat faptul că în instalația de tratament secundar se realizează o desulfurare avansată, în urma căreia și S va ajunge la limitele de încadrare.

Procedeul LF cuptor-oala (Ladle Furnace) este procedeul de metalurgie secundară cu cea mai însemnată dezvoltare în ultimii 25 de ani.

Aproape toate oțelăriile moderne, în special cele care au în structura de fabricație oțeluri de calitate și practică turnarea continuă, au în funcțiune astfel de instalații. De măsura în care sunt folosite mijloacele tehnice depinde reușita

tratamentului LF și performanțele ansamblului cuptor de topire - instalație LF atât în privința calității oțelului destinat fabricației de țevi, cât și a nivelului costurilor de fabricație [3, 4].

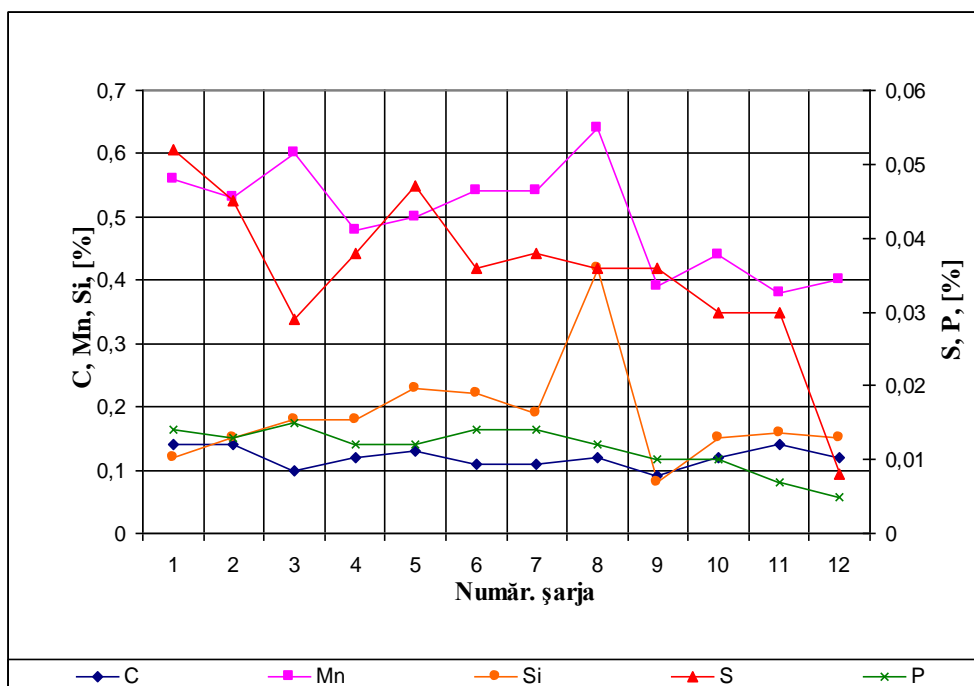


Fig.5.10. Variația compoziției chimice a oțelului la intrarea în LF

Majoritatea producătorilor de semifabricatelor din oțel pentru țevi lucrează pe un flux modernizat de fabricație și anume: topirea în cuptor electric tip EBT (Excentric Bottom Taping), rafinarea în cuptor-oala tip LF (Ladle Furnace) și turnarea continuă a oțelului în semifabricate rotunde pentru țevi [4]

Efectele metalurgice care se obțin în instalația LF sunt:

- degazarea oțelului datorită barbotării cu gaze inerte;
- posibilitatea reîncălzirii oțelului, datorită electrozilor din dotarea instalației;
- corecția compoziției chimice datorită adaosurilor care se pot face (iar în LF asimilarea elementelor utile este mai mare decât dacă adaosul s-ar realiza în cuptor);
- efecte metalurgice avansate: dezoxidare, desulfurare, decantare avansată a incluziunilor.

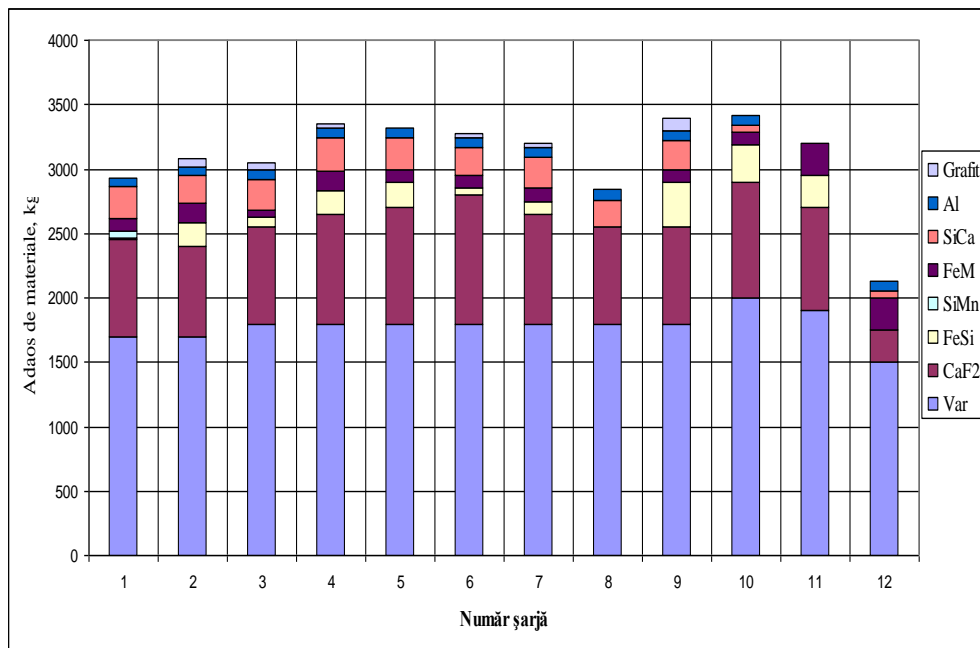
La injectarea gazelor inerte în oțelul lichid, procesele hidrodinamice au ca trăsătură esențială faptul că baia metalică este într-o permanentă mișcare turbulentă recirculatorie, asigurând în acest fel o intensificare a proceselor de rafinare, omogenizare termică și chimică [3, 5, 6].

Pentru studiul tratamentului secundar, în tabelul 5.4 se prezintă principalele date pentru șarjele urmărite.

**Tabelul 5.4.** Date privind tratamentul oțelului în instalația LF

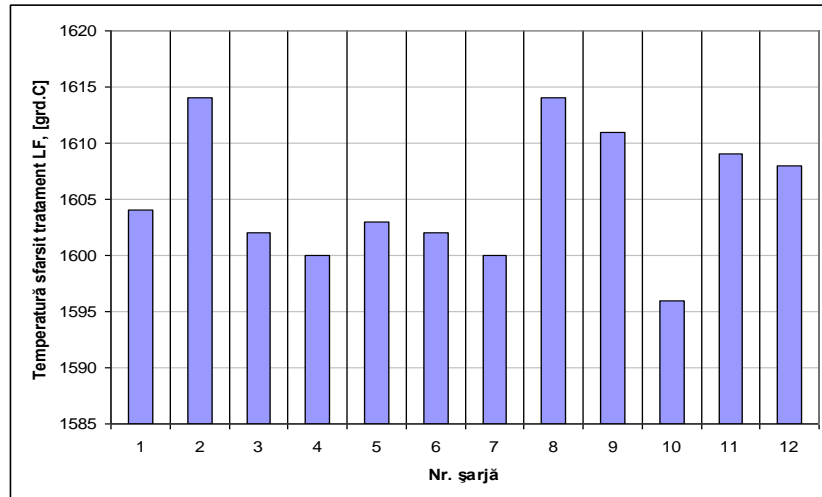
Nr. crt.	Adaos de materiale si feroaliaje in LF, [Kg]								Temperatura, [°C]
	Var	CaF <sub>2</sub>	FeSi	SiMn	FeMn	SiCa	Al	Grafit	
1.	1700	750	20	50	100	240	75	-	1604
2.	1700	700	180	-	150	220	70	60	1614
3.	1800	750	80	-	50	240	75	50	1602
4.	1800	850	180	-	150	260	77	30	1600
5.	1800	900	200	-	100	240	75	-	1603
6.	1800	1000	50	-	100	220	75	30	1602
7.	1800	850	100	-	100	240	77	30	1600
8.	1800	750	-	-	-	210	85	-	1614
9.	1800	750	350	-	100	220	80	100	1611
10.	2000	900	290	-	100	50	80	-	1596
11.	1900	800	250	-	250	-	-	-	1609
12.	1500	250	-	-	250	50	80	-	1608

În LF se definitivează tratamentul oțelului, prin adaosurile realizate făcându-se atât corecția compoziției chimice cât și dezoxidarea și desulfurarea avansată. Astfel, adaosurile au variat în limitele 2130 kg (șarja 12) și 3420 kg (șarja 10) – figura 5.11.

**Fig.5.11.** Adaosurile făcute în instalația LF

În plus, în concordanță cu procedeul de turnare ulterior tratamentul secundar (turnare continuă), se face și corecția temperaturii oțelului. Nu trebuie

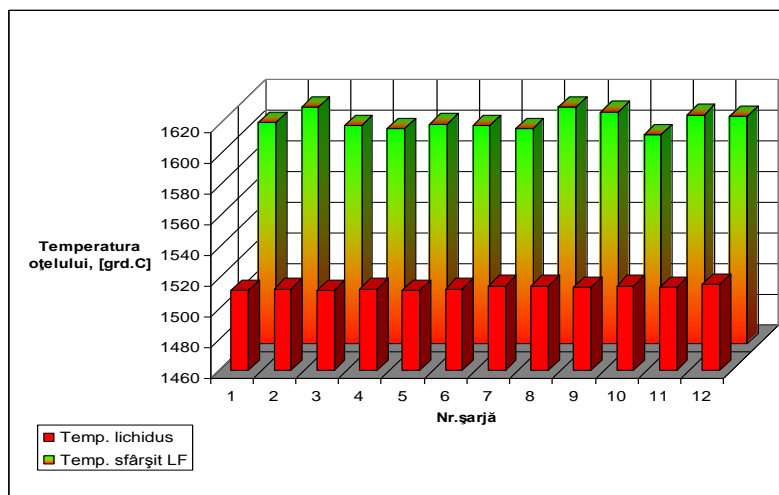
uitate limitele tehnologice pentru temperatura oțelului din oala de turnare (la instalația de turnare continuă); acestea trebuie să fie cu 45-60°C peste temperatura liquidus a mării care se toarnă. În figura 5.12 este prezentată distribuția temperaturii oțelului lichid la sfârșitul tratamentului iar în figura 5.13, comparativ, temperatura de sfârșit de tratament secundar și temperatura liquidus.



**Fig.5.12.** Distribuția temperaturii oțelului la sfârșitul tratamentului în LF

Pentru cazurile studiate s-a constatat o diferență mai mare (o supraîncălzire a oțelului în LF), încercându-se să se țină seama de pierderile de căldură pe parcursul transportului de la hala de tratament la hala de turnare continuă și în plus, pe parcursul manevrelor la hala de turnare continuă.

În tabelul 5.5. este prezentată compoziția chimică finală a oțelului care s-a încadrat pentru toate elementele studiate.



**Fig.5.13.** Variația temperaturii oțelului, relativ la temperatura liquidus a mării studiate.



**Tabelul 5.5.** Compoziția chimică finală a oțelului

Nr. crt.	Compoziția chimică finală, [%]				
	C	Mn	Si	S	P
EN	0,14-0,18	0,60-0,80	0,15-0,30	≤ 0,010%	≤ 0,02%
1.	0,17	0,69	0,35	0,003	0,017
2.	0,16	0,66	0,35	0,003	0,015
3.	0,17	0,7	0,32	0,007	0,008
4.	0,17	0,65	0,29	0,005	0,015
5.	0,16	0,67	0,33	0,007	0,014
6.	0,16	0,68	0,32	0,007	0,017
7.	0,15	0,64	0,34	0,006	0,016
8.	0,17	0,7	0,35	0,003	0,014
9.	0,17	0,72	0,31	0,004	0,013
10.	0,16	0,69	0,18	0,009	0,013
11.	0,16	0,65	0,26	0,008	0,009
12.	0,15	0,66	0,26	0,009	0,008
Limita de variație	015-0,17	0,64- 0,73	0,15-0,35	Sub 0,01	Sub 0,017

### 5.3. Turnarea continuă

Șarjele elaborate în cuptorul electric cu arc de tip EBT și tratate în instalația LF au fost turnate sub formă de țagle pentru țevi cu secțiunea  $\Phi 310\text{mm}$  (firul 1 și 2), respectiv  $\Phi 270\text{ mm}$  (firele 3, 4, 5). În cadrul experimentărilor s-a avut în vedere prima secțiune.

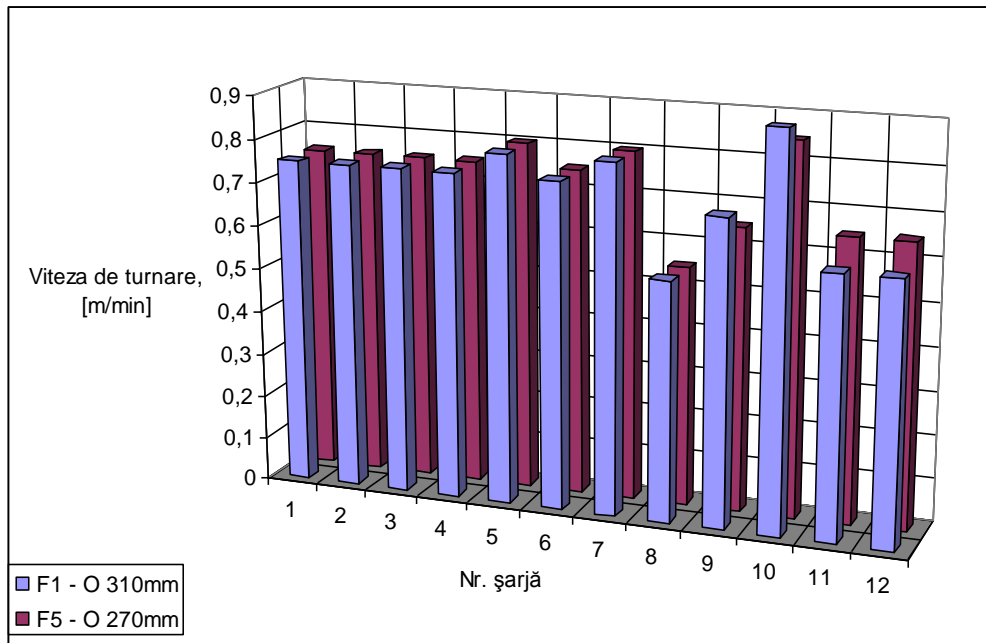
În tabelul 5.6 sunt prezentați principalii parametri tehnologici de la turnarea continuă.

**Tabelul 5.6.** Parametri tehnologici de la turnarea continuă

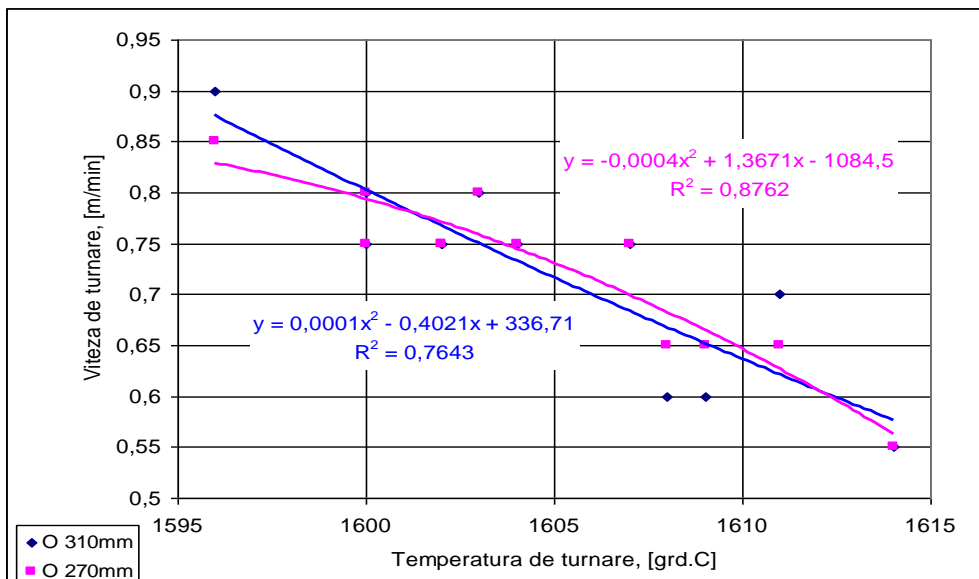
Nr. crt.	Oțel în distrib., [t]	Temp. sf. LF, [°C]	Temp. lichidus, [°C]	Viteza de turnare, [m/min]				
				F1	F2	F3	F4	F5
1.	112	1604	1512	0,75	0,70	0,75	0,75	0,75
2.	111,7	1614	1513	0,75	0,73	0,75	0,75	0,75
3.	107,6	1602	1512	0,75	0,750	0,75	0,75	0,75
4.	116,1	1600	1513	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
5.	104,3	1603	1512	0,8	0,80	0,8	0,8	0,8
6.	108,5	1602	1513	0,75	0,70	0,75	0,75	0,75
7.	101,9	1600	1515	0,8	0,75	0,8	0,8	0,8
8.	97,7	1614	1515	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
9.	103,5	1611	1514	0,7	0,7	0,65	0,65	0,65
10.	105,7	1596	1515	0,9	0,9	0,65	0,85	0,85
11.	111,8	1609	1514	0,6	0,6	0,70	0,65	0,65
12.	109,5	1608	1516	0,6	0,6	-0,65	0,65	0,65

Pentru o evaluare mai corectă a datelor, în figura 5.14. este prezentată, comparativ, variația vitezelor de turnare pentru cele 2 profile care se toarnă concomitent. Datorită secțiunilor similare, nu se constată diferențe majore (eventual ușor mărite pentru secțiunea mai mare) la viteza de turnare, avându-se

în vedere că temperatura este aceeași (nu sunt șarje diferite). Aceeași dependență se constată și în figura 5.15 variația vitezei cu temperatura de turnare. Se constată că odată cu creșterea temperaturii, viteza de turnare scade, pentru a se asigura regimul corespunzător de turnare și o structură adecvată de turnare.



**Fig.5.14.** Variația vitezei de turnare pentru cele două profile



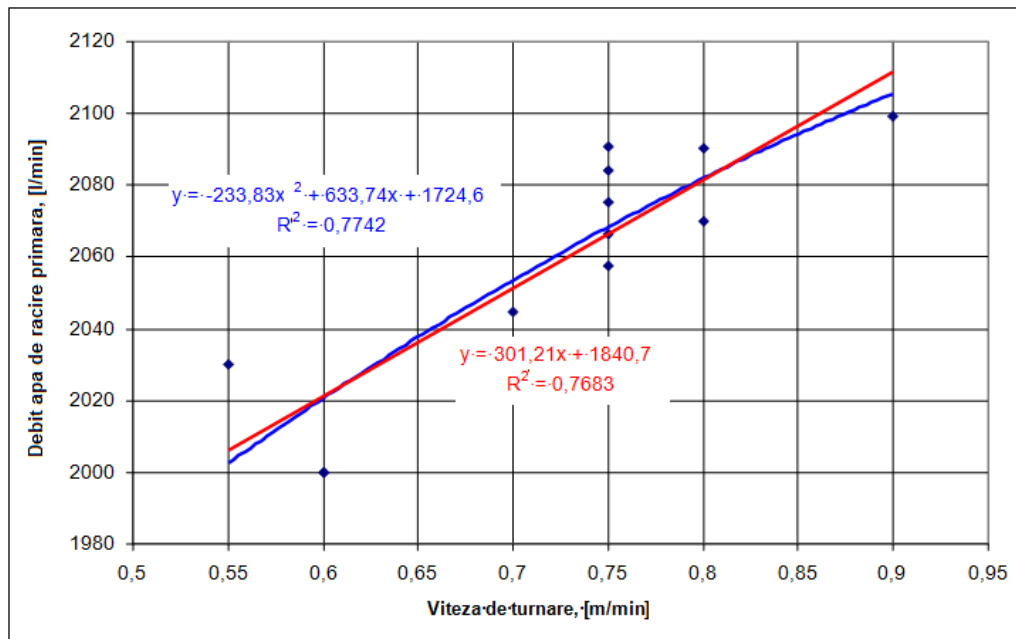
**Fig.5.15.** Dependența dintre temperatura și viteza de turnare

În continuare, în tabelul 6.7. sunt prezentate principalele date de la răcirea primară și secundară, pentru firele F1 (Ø310mm) și respectiv F5 (Ø270mm).

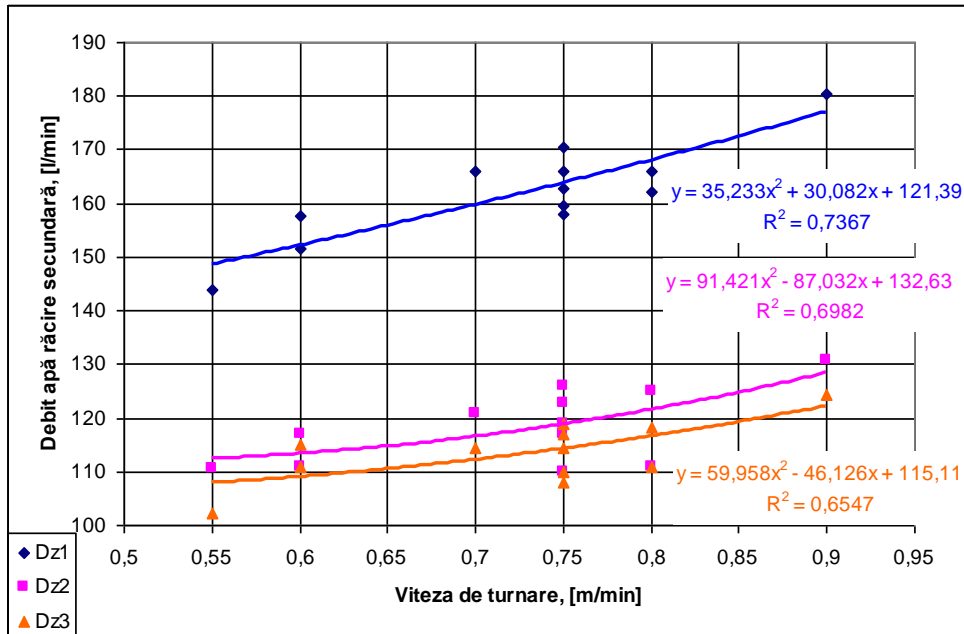
**Tabelul 5.7.** Date referitoare pa răcirea primară și secundară a semifabricatelor

Nr. crt.	Răcire primară cristalizor			Răcire secundară						
	Presiune apa, [bar]	Debit apa, l/min		Presiune apa, [bar]	Ø 310			Ø 270		
		F1	F5		Dz1	Dz2	Dz3	Dz1	Dz2	Dz3
1	8,8	2090	908/900	9,8	170	117	117	86	86	60
2	8,8	2075	908/900	9,9	162	119	119	86	86	60
3	8,8	2084	906/879	9,8	166	126	114	94	94	60
4	8,8	2057	906/879	9,8	158	122	108	60	80	60
5	6,8	2090	906/879	9,8	166	125	118	93	93	60
6	8,8	2066	906/878	9,8	159	110	110	82	82	60
7	8,8	2070	906/878	9,8	162	111	111	101	101	65
8	10,1	2030	1115/1118	9,5	144	110	102	86	86	62
9	10,1	2044	1110/1120	9,5	166	120	114	94	86	62
10	10,1	2100	1120/948	9,5	180	130	124	95	90	60
11	10,1	2000	1180/948	9,5	157	111	111	92	92	62
12	10,2	2000	1160/980	9,5	151	116	115	86	86	62

Se poate constata că odată cu creșterea vitezei de turnare se impune creșterea debitului apei de răcire din cristalizor (figura 5.16), respectiv a debitelor apei de răcire secundară (figura 5.17).

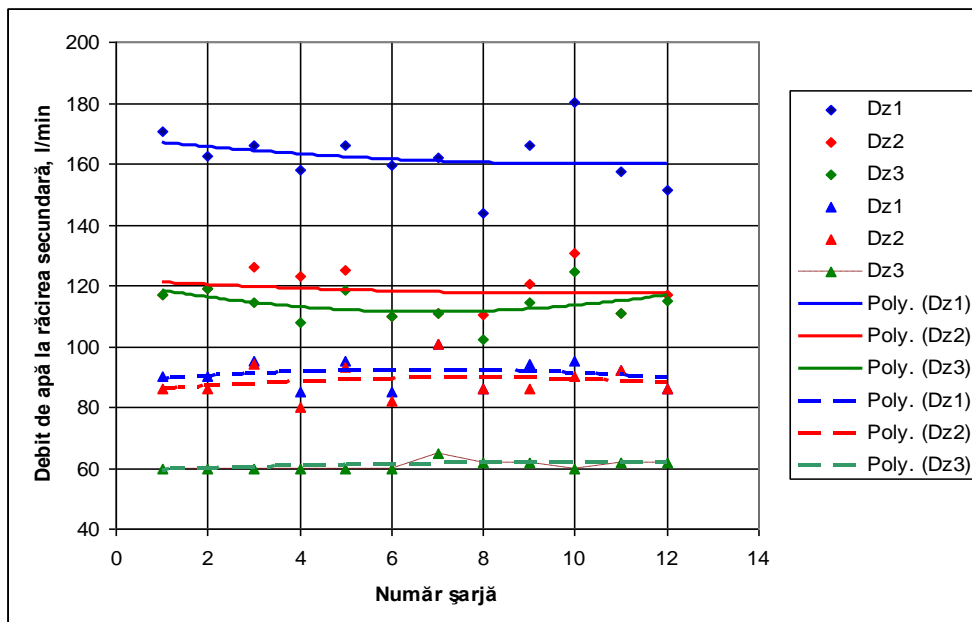


**Fig.5.16.** Variația debitul apei de răcire din cristalizor în funcție de vitezei de turnare



**Fig.5.17.** Variația vitezei de turnare, funcție de debitul apei de răcire secundară, pe cele trei tronsoane.

Pentru comparație, în figura 5.18 sa realizat variația debitelor apei de răcire secundară pentru cele două profile, pe cele trei zone.



**Fig.5.18.** Variația debitelor apei de răcire pentru secțiunile  $\Phi 310\text{mm}$  și  $\Phi 270\text{mm}$

Se constată debite diferite, corelate de asemenea cu secțiunea ce trebuie solidificată (lungimea conului fiind similară, este normal ca la secțiunea mai mare să se intensifice răcirea – solidificarea firului).

## **5.4. Modelarea matematică a regimului termic al oțelului lichid la nivelul distribuitorului instalației de turnare continuă**

### **5.4.1. Considerații privind softwer-ul utilizat și metodele de optimizare folosite**

În acest subcapitol sunt prezentate unele considerații asupra designului experimental și expunerea metodei suprafeței de răspuns cu aplicații într-o problema de optimizare a procesului de turnare continuă a oțelului. În cadrul cercetărilor efectuate prelucrarea datelor experimentale s-a efectuat folosind softul de analiza dispersionala Minitab.v17 iar optimizarea transferului de căldura din distribuitor în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire s-a realizat cu ajutorul unui program realizat în Mathcad14, rezultatele obținute fiind prezentate atât sub formă analitică cât și grafică.

Minitab este un software statistic foarte folosit în educație și cercetare în întreaga lume, deoarece este ușor de utilizat având o interfață foarte intuitivă. Meniurile și instrumentele sunt aranjate logic și pot fi exportate cu ușurință în PowerPoint și Word.

Mathcad este un instrument software profesional, produs al firmei MathSoft, dedicat efectuării de calcule matematice cu aplicabilitate extraordinar de ușoară și utilă în tehnică.

Ceea ce evidențiază Mathcad-ul din multitudinea programelor de același tip este deosebita sa flexibilitate în manipularea componentelor matematice (date și formule), flexibilitate dublată de o excepțională accesibilitate în utilizare. Aceste calități situează Mathcad-ul la granița dintre programele de calcul tabelar și limbajele de programare.

Spre deosebire de alte programe de calcul, care impun introducerea ecuațiilor prin utilizarea unor simboluri convenționale specifice, Mathcad-ul permite utilizarea sintaxei matematice. În Mathcad calculele se pot efectua atât simbolic cât și numeric, putând fi însoțite de texte sau de reprezentări grafice.

Prin oferirea unui mediu de lucru integrat, conținând pe aceeași foaie de lucru ecuații, text și elemente grafice, Mathcad-ul face posibilă atât efectuarea cu ușurință a calculelor complexe, cât și prezentarea rezultatelor într-o formă accesibilă și extrem de sugestivă.

Atunci când este accesat programul Mathcad, utilizatorului i se prezintă o fereastră în care se pot distinge elementele caracteristice aplicațiilor ce rulează sub Windows: bară de stare, bară de meniuri derulante, bare de unelte și zona de lucru - corespunzătoare unei foi de lucru.

Barele de unelte conțin butoane ce permit accesarea grafică a unor serii de comenzi ale programului, ele putând fi vizibile sau invizibile. Comenzile respective sunt organizate în mai multe categorii, fiecărei categorii corespunzându-i o bară de unelte unică.

Cele mai importante sunt:

- bara Standard, amplasată imediat sub bara de meniuri, conținând comenzile referitoare la gestionarea documentelor, utilizarea imprimantei, etc.;
- bara Formatting, situată sub bara Standard, conținând comenzile

referitoare la alegerea tipului și mărimii fonturilor, alinierea textului, liste etc.;

- bara Math, amplasată pe marginea din stânga a ferestrei, conținând o serie de butoane cu ajutorul cărora se pot activa/dezactiva restul barelor de unelte (Arithmetic - pentru operații matematice uzuale, Evaluation - pentru operații logice, Graph - pentru crearea graficelor, Matrix - calcul matricial, Calculus - calcul diferențial și integral, sume, produse și limite, Programming - pentru crearea programelor, Greek - alfabetul grecesc, Symbolic - pentru calcul simbolic cu ajutorul cuvintelor-cheie).

Toate barele de unelte pot fi activate cu ajutorul comenzilor corespunzătoare cuprinse în meniul View, submeniul Toolbars.

Barele Standard și Formatting pot fi personalizate de utilizator, prin adăugarea sau eliminarea butoanelor, folosind comanda Customize ce este accesibilă în meniul apărut la executarea unui clic pe bara respectivă (cu butonul din dreapta mouse-ului). În fereastra apărută la activarea comenzii utilizatorul poate organiza bara după dorință, folosind butoanele Add și Remove.

Mathcad este dotat cu un sistem de ajutor manifestat sub forma unor scurte explicații ce apar atunci când cursorul mouse-ului este ținut câteva secunde pe un buton din barele de unelte. În cazul comenzilor amplasate în meniurile derulante, indicațiile respective apar în bara de stare.

Barele de unelte pot fi amplasate oriunde în cadrul ferestrei programului, prin „apucarea” din zonele dintre butoane (dacă sunt aliniate pe marginile ferestrei) sau din zona barei de titlu (dacă sunt în spațiul de lucru).

Barele principale sunt auto-formabile, ele aliniindu-se automat la marginile ferestrei de lucru în timp ce restul barelor de unelte au formă fixă, ele putând fi amplasate numai în cadrul spațiului de lucru. Mathcad-ul reține amplasarea barelor la închiderea sesiunii de lucru, la următoarea sesiune ele având aceeași poziție.

Mathcad-ul permite deschiderea ferestrelor multiple, permițând astfel utilizarea mai multor foi de lucru simultan. Numărul acestora este limitat doar de resursele sistemului de calcul folosit. Comenzile pentru gestionarea ferestrelor sunt amplasate în meniul Window, acestea permițând așezarea ferestrelor unele sub altele (Cascade), vizibile toate aliniate orizontal sau vertical. În același meniu apar și numele documentelor deschise simultan, prin indexarea acestora ele fiind aduse în zona de lucru a ferestrei principale.

Designul experimental [84, 85] reprezintă la ora actuală cel mai modern instrument utilizat în problemele de optimizare. Acesta contribuie la realizarea unor importante clarificări asupra legăturii dintre variabile, estimarea parametrilor legăturilor, verificarea ipotezelor, testarea diferitelor căi de acțiune practică, stabilirea nivelului optim al variabilelor controlate și comportamentul modelului în raport cu variația factorilor.

Pentru conducerea optimă a proceselor este necesară cunoașterea modelelor matematice ale caracteristicilor proceselor respective. Din cauza complexității proceselor, stabilirea modelelor teoretice, ideale, ale acestora este foarte anevoioasă, uneori imposibilă. Din acest motiv, modelele teoretice ale proceselor sunt înlocuite cu modele empirice obținute pe cale experimentală. În metoda de cercetare experimentală clasică, folosită încă în mod curent, se variază succesiv câte un singur parametru. Astfel se consideră un parametru care este variat în limitele unui domeniu ales convenabil, ceilalți parametri fiind menținuți constanți. Se stabilește legătura dintre acesta și răspunsul considerat, identificându-se intervalul în care influența acestui parametru este optimă. Cu primul parametru menținut constant la o valoare din intervalul optim găsit se variază în același mod un al doilea

parametru, toți ceilalți parametri fiind menținuți constanți la valorile inițiale. Se stabilește și pentru acesta legătura căutată, identificându-se intervalul optim de influență. Procesul se repetă cu fiecare parametru în parte până la găsirea legăturilor și a intervalelor optime de influență pentru toți parametrii luați în studiu ai procesului considerat.

Este evident că în cazul unui număr mai mare de parametri luați în studiu, metoda este costisitoare, consumând mult timp, energie și materiale. Pe lângă aceasta, contrar scopului urmărit, este posibil să nu se obțină optimul global, din cauza interacțiunilor posibile dintre doi sau mai mulți parametri ai procesului care nu pot fi evidențiate în acest mod. De asemenea, metoda clasică, nebazându-se pe o tratare statistică riguroasă, nu permite obținerea legăturii căutate cu precizie maximă și nici verificarea preciziei acestei legături sau perfecționarea ei.

Scopul acestui studiu constă în înlăturarea neajunsurilor metodei clasice prin considerarea parametrilor și răspunsurilor procesului ca variabile supuse erorilor întâmplătoare și folosirea regresiei multiple și analizei dispersionale din statistica matematică pentru obținerea parametrilor optimali. Din combinarea regresiei multiple, analizei dispersionale și a programării statistice a experiențelor a rezultat metoda moderna de cercetare experimentală cunoscută sub denumirea de metoda suprafețelor de răspuns care este aplicată în acest subcapitol la optimizarea transferului de căldură din distribuitorul instalației de turnare continuă în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire.

Metoda suprafețelor de răspuns [86] consideră legătura dintre parametrii unui proces și răspunsurile caracteristice ale acestuia ca suprafețe în spațiul multidimensional al variabilelor. În experimentele conduse după aceasta metoda, variabilele independente sunt variate simultan, luând un număr limitat de valori în domeniul de experimentare considerat, numite nivele. Cu ajutorul acestei metode, deși mai multe variabile independente sunt variate simultan, efectele lor principale și de ordin superior, precum și interacțiunile dintre ele se pot determina separat. Modificarea variabilelor independente va duce automat la modificarea datelor de ieșire. Rezultatele astfel obținute pot fi folosite la îmbunătățirea performanțelor unui proces tehnologic.

În general, modelul matematic al unui proces sau funcția de răspuns a acestuia consideră legătura funcțională indicată de realitatea fizică între  $k$  parametri ai procesului ca variabile independente  $x_1, x_2, \dots, x_k$  și o caracteristică a acestuia ca variabilă dependentă sau răspuns  $h = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ .

Definim răspunsul  $y$  ca fiind  $y = h + e_{exp}$  cu  $E(y) = h$  și  $dispersia(y) = s^2$  unde  $e_{exp}$  reprezintă eroarea experimentală, de obicei considerată a fi o variabilă aleatoare cu media zero și dispersia  $s^2$ . Presupunând că există o relație deterministică  $f$  între  $h$  și  $x_1, x_2, \dots, x_k$  putem scrie:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + e_{exp} \quad (5.1)$$

Modelele de ordinul al doilea aproximează cel mai bine suprafețele de răspuns numite și suprafețe de regresie, astfel încât :

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^q \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^q \beta_{jj} x_j^2 + e \quad (5.2)$$

unde  $\beta_i$ ,  $\beta_{ij}$  și  $\beta_{jj}$  sunt coeficienții constanți care urmează a fi determinați, iar  $e$  reprezintă eroarea.

Considerând cazul unui proces cu doi parametri  $x_1$  și  $x_2$  care pot fi variați în limitele  $x_{1a} \leq x_1 \leq x_{1b}$  și respectiv  $x_{2a} \leq x_2 \leq x_{2b}$ , suprafața din planul variabilelor independente reprezintă regiunea experimentală, iar punctele  $M$  ale acestei

suprafețe, având coordonate diferite perechi de valori  $(x_{1i}, x_{2i})$  ale parametrilor, reprezintă puncte experimentale, deoarece perechea de valori fizice ale celor doi parametri asigură desfășurarea procesului al cărui răspuns are o anumită valoare  $h_M = f(x_{1m}, x_{2m})$ .

Suprafața pe care se află răspunsurile corespunzătoare fiecărui punct experimental, reprezintă suprafața de răspuns a caracteristicii considerate a procesului.

Pentru determinarea coeficienților  $\beta$  ai modelului polinomial cu ajutorul datelor experimentale, cea mai indicată este metoda celor mai mici pătrate [87], care asigură o dispersie minimă a coeficienților determinați. Metoda celor mai mici pătrate, propusă de Gauss încă de la începutul secolului al XIX-lea pentru ajustarea unei funcții de regresie datelor experimentale, are la baza principiul minimizării sumei pătratelor diferențelor dintre variabile  $h_i$  măsurate ale răspunsului în punctele experimentale și valorile corespunzătoare  $y$  calculate cu ajutorul polinomului de aproximare determinat.

$$E = \min \sum_{i=1}^q (y_i - h_i)^2 \quad (5.3)$$

#### 5.4.2. Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire utilizând metoda suprafeței de răspuns

##### 5.4.2.1. Formularea problemei de optimizare

Se consideră distribuitorul instalației de turnare continuă de formă trapezoidală, căptușit cu un strat de beton refractar cu grosimea de 100 mm și un strat torcretat (material magnezitic) cu grosimea de 50 mm, având dimensiunile bazei superioare de 6700 mm și respectiv 850 mm iar cele ale bazei inferioare de 6400mm și respectiv 770 mm. Înălțimea distribuitorului este de 1000mm iar înălțimea de lucru (înălțimea băii metalice) este de 900 mm.

Ne propunem în continuare optimizarea (minimizarea) variației de temperatură a băii metalice din distribuitor în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire.

Compoziția chimică a prafului de acoperire fiind prezentată în tabelul 5.8, [12].

**Tabelul 5.8.** Compoziția chimică a materialului de acoperire

Materialul	SiO <sub>2</sub> , %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	C, %
Accutherm T	37	20	7	19

##### 5.4.2.2. Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire utilizând metoda suprafeței de răspuns

**Tabelul 5.9.** Valorile parametrilor și valorile răspunsurilor experimentale folosite în optimizare

Nr. experiment	T <sub>0</sub> , [°C]	T <sub>1</sub> , [°C]	T <sub>0</sub> -T <sub>1</sub> , [°C]	H <sub>pr</sub> , [mm]
1.	1608	1562	46	9
2.	1627	1587	40	12
3.	1603	1565	38	8
4.	1609	1552	57	8
5.	1622	1581	41	13



Nr. experiment	$T_0$ [°C]	$T_{15}$ [°C]	$T_0 - T_{15}$ [°C]	$H_p$ [mm]
6.	1618	1568	50	7
7.	1606	1562	54	8
8.	1617	1570	47	7
9.	1609	1567	42	8
10.	1596	1554	42	9
11.	1609	1572	37	8
12.	1632	1584	48	8
13.	1615	1573	42	7

Prelucrarea datelor experimentale s-a efectuat folosind softul de analiza dispersionala Minitab.v17 și s-a obținut relația:

$$y = T_0 - T_1 = 87152 - 110,8T_s - 8H_p + 0,352T_s^2 + 0,94H_p^2 + 0,008T_sH_p \quad (5.4)$$

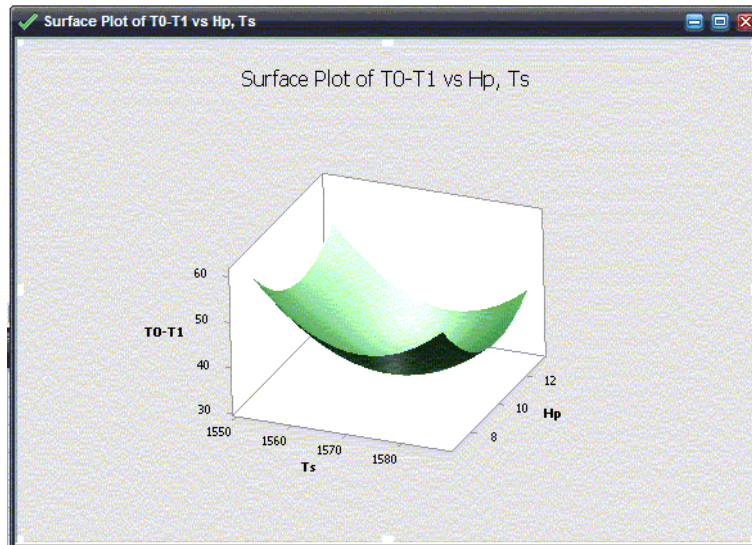
unde:  $T_0$  – temperatura oțelului din oala de turnare în momentul ajungerii acesteia la distribuitor;

$T_1$  – temperatura oțelului din distribuitor măsurată după 15 minute de la începerea turnării;

$H_p$  – grosimea stratului de praf de acoperire;

$T_s = T_1$ .

Suprafața de răspuns corespunzătoare rezultatelor experimentale este prezentată în figura 5.19.



**Fig.5.19.** Suprafața de răspuns corespunzătoare rezultatelor experimentale

Diferența optimă de temperatură  $T_0 - T_1$  care minimizează suprafața de răspuns este determinată cu ajutorul următorului program realizat în Mathcad14 (figura 5.20):

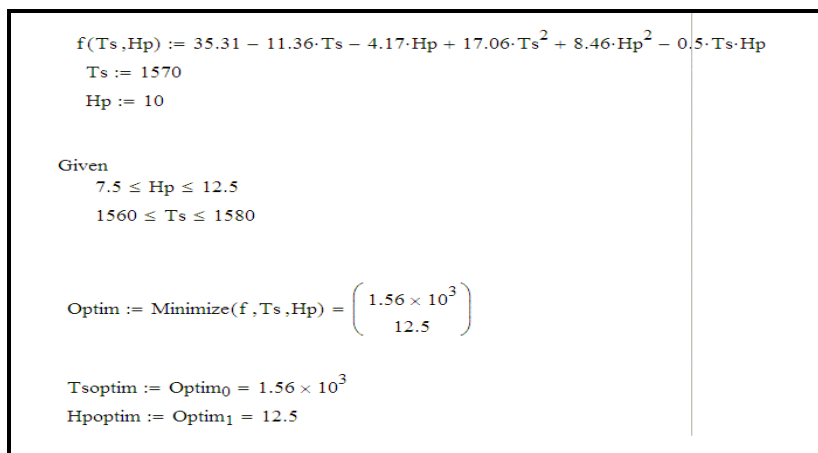


Fig.5.20. Program realizat în Mathcad14

Rezultă parametrii optimali  $T_{s\text{optim}}=1560^{\circ}\text{C}$  și  $H_{p\text{optim}}=12,5\text{mm}$  (figura 5.21) pentru care valoarea diferenței de temperatură este minima.

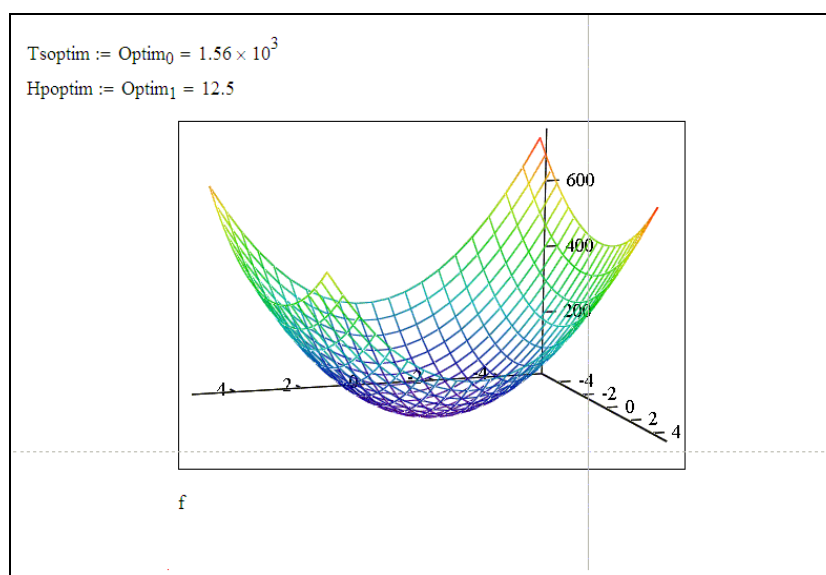


Fig.5.21. Variația parametrilor optimali

Pentru stabilirea cantității necesare de praf de acoperire în distribuitor pentru o grosime a stratului de praf de 12,5 mm (considerată optimă) sa determinat densitatea prafului aceasta fiind de  $0,6305\text{ g/cm}^3$ . Cunoșcând caracteristicile distribuitorului de formă trapezoidală, căptușit cu un strat de beton refractar cu grosimea de 100 mm și un strat torcretat (material magnezitic) cu grosimea de 50mm, având dimensiunile bazei superioare de 6700 mm și respectiv 850 mm iar cele ale bazei inferioare de 6400 mm și respectiv 770 mm, înălțimea distribuitorului de 1000 mm iar înălțimea de lucru de 900 mm, rezultă că este necesară o cantitate de 44,88 kg praf de acoperire.

### 5.4.3. Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire și de temperatura liquidus a oțelului

#### 5.4.3.1. Formularea problemei de optimizare

Se consideră ca și în subcapitolele anterioare distribuitorul instalației de turnare continuă de formă trapezoidală, căptușit cu un strat de beton refractar cu grosimea de 100mm și un strat torcretat (material magnezitic) cu grosimea de 50mm, având dimensiunile bazei superioare de 6700 mm și respectiv 850 mm iar cele ale bazei inferioare de 6400 mm și respectiv 770 mm. Înălțimea distribuitorului este de 1000 mm iar înălțimea de lucru (înălțimea băii metalice) este de 900 mm.

Ne propunem în continuare optimizarea (minimizarea) variației de temperatură a băii metalice din distribuitor în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire ținând seamă și de temperatura liquidus a oțelului.

Compoziția chimică a materialului de acoperire fiind prezentată în subcapitolul 5.4.2, tabelul 5.8, [12].

#### 5.4.3.2. Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire și de temperatura liquidus a oțelului

**Tabelul 5.10.** Valorile parametrilor și valorile răspunsurilor experimentale folosite în optimizare

Nr. experiment	$T_0$ , [°C]	$T_1$ , [°C]	dL, [°C]	$H_p$ , [mm]
1.	1608	1562	92	9
2.	1627	1587	112	12
3.	1603	1565	86	8
4.	1609	1552	93	8
5.	1622	1581	106	13
6.	1618	1568	102	7
7.	1606	1562	92	8
8.	1617	1570	102	7
9.	1609	1567	94	8
10.	1596	1554	80	9
11.	1609	1572	93	8
12.	1632	1584	117	8
13.	1615	1573	99	7

Prin prelucrarea datelor experimentale folosind softul de analiză dispersională Minitab.v17 și s-a obținut relația:

$$y = T_1 = 1901 - 4,54dL - 32,5H_p + 0,165dL^2 + 0,455H_p + 0,232dL \cdot H_p \quad (5.5)$$

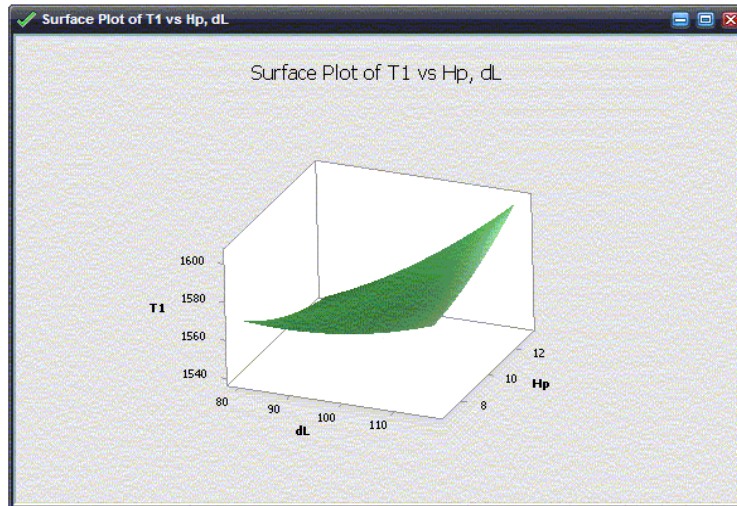
unde:  $T_0$  – temperatura oțelului din oala de turnare în momentul ajungerii acesteia la distribuitor;

$T_1$  – temperatura oțelului din distribuitor măsurată după 15 minute de la începerea turnării;

$H_p$  – grosimea stratului de praf de acoperire;

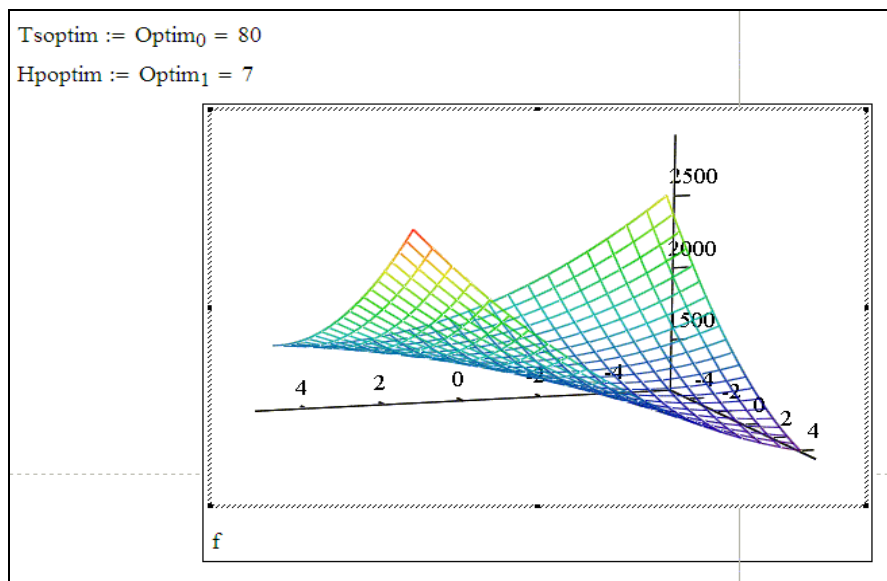
$dL = T_0 - T_L$  ( $T_L$  – temperatura liquidus a oțelului).

Suprafața de răspuns corespunzătoare rezultatelor experimentale este prezentată în figura 5.22.



**Fig.5.22.** Suprafața de răspuns corespunzătoare rezultatelor experimentale

Diferența optimă de temperatură  $T_0 - T_L$  și grosimea optimă a stratului de praf de acoperire care minimizează suprafața de răspuns este determinată cu ajutorul următorului program realizat în Mathcad14. Rezultă astfel parametrii optimi  $dL_{optim} = 80^\circ C$  și  $H_{poptim} = 7mm$  (figura 5.23) pentru care pierderea de căldură a băii metalice din distribuitor este minimă.



**Fig.5.23.** Variația parametrilor optimali

Pentru stabilirea cantității necesare de praf de acoperire în distribuitor pentru o grosime de 7mm (considerată optimă) și densitatea prafului de  $0,6305g/cm^3$ , pentru aceleași dimensiuni ale distribuitorului, rezultă că este necesară o cantitate de 25,13kg praf de acoperire.

### 5.5. Concluzii

Din analiza acestui capitol rezultă următoarele concluzii:

- referitor la structura încărcăturii, parametru, important pentru calitatea produsului finit și consumurile specifice de energie materii prime și auxiliare, materiale refractare, etc., s-a constatat că a predominat ca pondere șpanul și fierul vechi balotat, din acest punct de vedere nu s-a lucrat cu încărcătură de cea mai bună calitate;
- încărcarea cuptorului s-a făcut din 3 bene cu o singură excepție, șarja nr.1 (ceea ce se reflectă și în consumul de energie, șarja cu cel mai mare consum energetic), deci din acest punct de vedere se poate considera că încărcătura a fost corespunzător pregătită;
- structura încărcăturii nu variază în limite largi, ceea ce asigură variații mici de compoziție chimică, fapt favorabil pentru turnarea continuă secvențială;
- o prelungire a duratei topirii conduce la o creștere a consumului de energie electrică corespunzător unei corelații exprimate analitic și grafic;
- compoziția chimică a oțelului la terminarea topirii variază în limite acceptabile cu excepția conținutului de carbon, variație determinată de regimul suflării oxigenului la topire și afinare;
- la terminarea tratamentului în instalația LF variază în limite normale  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  de la șarjă la șarjă, variație determinată de valoarea temperaturii liquidus și de modul cum decurge turnarea secvențială;
- între viteza de turnare și temperatura de turnare a existat o bună corespondență, fapt dovedit prin corelația exprimată grafic și analitic între acești parametri;
- corelația dintre viteza de turnare și parametrii răcirii primare și secundare sunt reprezentative atât din punct de vedere a coeficienților de corelație cât și a sensului tehnologic;
- cu ajutorul metodei suprafeței de răspuns s-a realizat optimizarea transferului de căldură din distribuitor în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire determinându-se astfel cantitatea optimă de praf;
- pentru obținerea rezultatelor experimentale în observațiile designului central stabilit coeficienții suprafeței de răspuns au fost calculați cu ajutorul softului de analiza dispersionala Minitab v.17 iar parametrii care minimizează suprafața de răspuns au fost calculați cu ajutorul unui program realizat în Mathcad14;
- metoda suprafețelor de răspuns asigură obținerea elementului final dorit (modelul optim) fără erori și totodată într-un timp de calcul cât mai scurt, independent de resursele hardware pe care se face procesarea.

## **6. INFLUENȚA REGIMULUI TERMIC AL OȚELULUI DIN DISTRIBUTOR ȘI CRISTALIZOR ASUPRA DEFECTELOR DE SUPRAFAȚĂ ȘI INTERNE**

### **6.1. Generalități**

Defectele de material la turnarea continuă a oțelului apar în timpul solidificării semifabricatului turnat continuu și a răcirii acestuia, conducând adesea la importante pierderi metalice, [18]. Pentru prevenirea acestor pierderi, scopul tehnologiilor metalurgice și a soluțiilor constructive este de a depista cauzele care conduc la apariția defectelor, de a preveni și/sau elimina apariția acestora.

Conform literaturii de specialitate, defectul poate fi definit ca fiind orice abatere de la aspectul exterior, formă, dimensiune, macrostructură, caracteristici chimice, prescise în standarde sau alte documente tehnice normative în vigoare.

Evidențierea defectelor detectate pe fluxul de fabricație este necesară atât pentru evaluarea calității țagelilor turnate continuu, precum și pentru stabilirea măsurilor ce se impun pentru evitarea sau reducerea acestora.

Obiectivul controlului de calitate constă în determinarea principalelor neregularități ale semifabricatelor turnate continuu, cauzate de cristalizor (răcire primară, prafurile unguente, calitatea suprafeței cristalizorului etc.), răcire secundară, cajele de extracție și îndreptare, ce pot cauza producerea de semifabricate cu defecte, deranjamente în funcționarea mașinii sau nefinalizarea turnării.

Pentru garantarea unui control eficient se aplică următoarele metode:

- controlul vizual al suprafeței semifabricatului turnat continuu;
- detectarea defectelor interne, proba microscopică, prin utilizare atacului chimic și ulterior inspectarea suprafeței probei bine uscate;
- detectarea defectelor interne prin controlul cu ultrasunete.

Modul de control și de inspecție a suprafeței precum și evaluarea probei macro se realizează în conformitate cu documentele specifice din Sistemul de management al calității conform ISO 9001/2000.

Controlul calității semifabricatelor turnate continuu are ca scop generarea încrederii beneficiarilor în procesul de elaborare și turnare și se realizează pe baza unui plan cu numărul și tipul probelor prelevate pentru diferite oțeluri și modalități de inițiere a acțiunilor corective necesare pentru eliminarea diferitelor defecte, toate realizându-se într-o dinamică care să conducă la satisfacția beneficiarului.

Evaluarea/analiza unui defect și a consecințelor sale în procesul de prelucrare ulterioară la beneficiar, în vederea prevenirii lui în viitor, trebuie făcută având în vedere următoarele aspecte:

- factorii din procesul de elaborare care favorizează formarea unui defect;
- factorii specifici din procesul de turnarea continuă care favorizează formarea defectului;
- factorii specifici din perioada de răcire pe paturile de răcire care favorizează formarea defectului;
- factorii specifici din perioada de încălzire și deformare plastică, care favorizează ca manifestarea unei imperfecțiuni de structură să se transforme în rebutarea materialului.

Evaluarea/analiza trebuie făcute în mod obiectiv și clar și prezentate personalului implicat în proces. Pentru a obține produse de calitate, este necesar ca defectul existent pe semifabricatul turnat continuu să fie detectat înainte ca acesta să-și producă efectele negative la beneficiar.

Defectele semifabricatelor turnate continuu sunt specifice:

- **otelului lichid** (analiza chimica a oțelului lichid, supraîncălzirea oțelului lichid-gradientului de temperatură, calitatea dezoxidării %O<sub>2</sub>, %S, tratamentul secundar – raportul Al/Ca, conținutul de gaze – H<sub>2</sub>, N, conținutul de incluziuni nemetalice, timpul de staționare a oțelului lichid în oală, gradientul de temperatură de la tratamentul LF sau VD și până la distribuitor);
- **procesului de turnare** (pot apărea pe un fir sau pe toate firele, datorită problemelor de natură mecanică/reglajului mașinii, electrică, hidraulică și de automatizare – ele de regulă se localizează în zona tuburilor de Cu a cristalizorului, a răcirii secundare, a cajelor de tragere/îndreptare, a mașinii de taiere, reglate incorect sau nesincronizate, a calității prafurilor de turnare – praf de acoperire oală, acoperire distribuitor și praf unguent);
- **procesului de răcire** pe paturile de răcire, încărcare și recepție.

Temperatura oțelului lichid  $T_o$  înainte de începerea turnării este parametrul cel mai important, deoarece în funcție de el se determină următoarele:

- viteza de turnare;
- programul de stropire;
- stabilitatea mașinii în timpul turnării (posibilitatea de turnare completă a oțelului din oală fără a avea evenimente, cum ar fi: perforări sau obturări din cauza temperaturii);
- timpul / durata turnării unei oale de oțel în secvență.

Din motivele expuse mai sus, acuitatea măsurării temperaturii și cunoașterea ei în momentul măsurării în distribuitorul TC este de importanță vitală.

Defectele sunt constatate la recepția țagelilor prin controlul vizual al calității suprafeței acestora pe paturile de inspecție sau la controlul macrostructurii probelor în laboratoare.

Un defect nu este întotdeauna consecința unei singure cauze.

În mod frecvent defectul este rezultatul interacțiunii mai multor cauze, fiecare depinzând de un număr variabil de parametrii.

Defecte similare, ca aspect exterior, pot avea una sau mai multe cauze diferite, iar defecte aparent diferite pot avea, una sau mai multe cauze comune, motiv pentru care se constată de multe ori pe o aceeași țagă existența mai multor defecte.

Defectele apărute la turnarea continuă a oțelului pot fi clasificate astfel: defecte de suprafață, defecte interne, defecte de formă, defecte mecanice și abateri de la compoziția chimică a oțelului.

În continuare se prezintă câteva dintre defectele de material care au apărut la turnarea continuă a oțelului cauzate fie direct de neîncadrarea temperaturii de turnare în limitele prevăzute de tehnologie, fie indirect prin influențarea altor parametrii de turnare și neîncadrarea acestora la rândul lor în limitele impuse, [18].

De menționat că perfecționarea tehnologiilor de elaborare și în mod deosebit de turnare a condus la reducerea rebutului semifabricatelor turnate continuu.

## 6.2. Defecte de suprafață și interne cauzate de un transfer termic neadecvat

### 6.2.1. Defecte de suprafață

#### 6.2.1.1. Crăpături

**1. Crăpături longitudinale** (figura 6.1) - se formează în direcția de extragere a firului din cristalizor (paralele cu generatoarea pentru profilele rotunde, respectiv cu muchia la cele poligonale). Semifabricatele care prezintă acest defect sunt de regulă rebutate integral.

Cauzele care conduc la apariția crăpăturilor longitudinale sunt:

- temperatura de turnare ridicată (nerespectare  $\Delta T$  - supraîncălzirea);
- îndepărtarea neuniformă a căldurii în cristalizator și în consecință creșterea neuniformă a crustei firului, cauzându-se astfel tensiuni transversale care duc la fisurarea firului dacă crusta nu este suficient de puternică (răcire primară neuniformă);
- viteza mare de extracție a firului (nu se asigură timp suficient pentru cedarea căldurii);
- curgerea turbulentă a metalului și o variație a nivelului meniscului în cristalizator;
- răcirea secundară neuniformă sau prea intensă (determină apariția tensiunilor termice);
- uzura inegală și avansată a cristalizatorului având drept urmare un coeficient de conductibilitate termic diferit;
- comportarea necorespunzătoare a prafului de turnare [18].

În figura 6.1. sunt prezentate câteva semifabricate care prezintă fisuri longitudinale:



a)



b)



c)



d)

**Fig.6.1.** Fisuri longitudinale, [18]



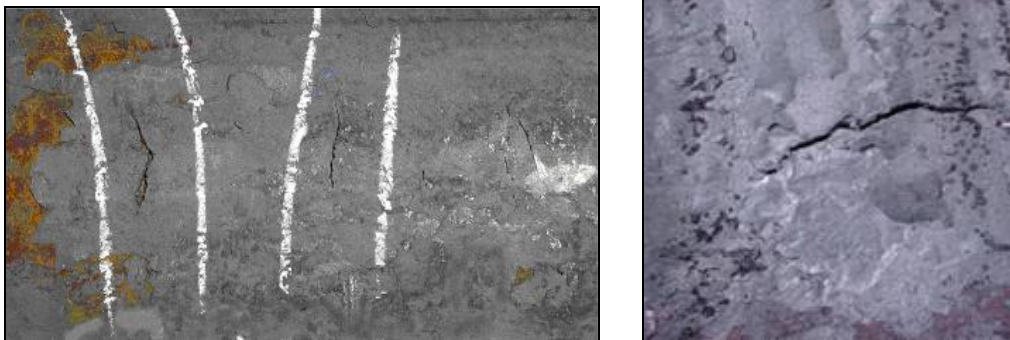
Eventualele măsuri de remediere a acestui tip de crăpături ar fi:

- controlul transferului de căldură în cristalizor;
- centrarea jetului de turnare în cristalizor;
- utilizarea unui praf de ungere adecvat mărcii de oțel turnat continuu și vitezei de turnare, pentru formarea unui film uniform între crusta firului și peretele cristalizatorului, astfel încât să se obțină un transfer de flux termic uniform;
- optimizarea poziției duzei de intrare și a suportului acesteia pentru reducerea la minimum a turbulenței și agitării suprafeței metalului;
- menținerea nivelului meniscului în cristalizor în limitele recomandate;
- corelarea debitului de răcire cu viteza de turnare;
- menținerea variației temperaturii în limitele stabilite;
- corelarea vitezei de turnare, a variației temperaturii și a debitului de apă de pulverizare (uniformitatea răcirii secundare);
- monitorizarea uzurii cristalizorului;
- utilizarea corectă a prafului de ungere, [18].

**2. Crăpăturile transversale** (figura 6.2) sunt mai rar întâlnite la profilele rotunde, acestea apărând din cauza tensiunilor pe direcția longitudinală a firului. Se polizează dacă nu sunt prea adânci.

Cauzele care conduc la apariția fisurilor transversale sunt:

- tensiuni termice datorate nesolidificării uniforme a crustei;
- tensiuni adiționale cauzate de curgerii turbulente sub menisc și variația nivelului meniscului;
- adâncimea mărcii de oscilații, prezența pe fundul mărcii de oscilație a segregățiilor, acestea răcindu-se mai lent slăbesc limitele grăuntelui austenitic;
- frecarea firului în cristalizor sau în segmentele cilindrilor [18].



**Fig.6.2.** Fisuri transversale, [18]

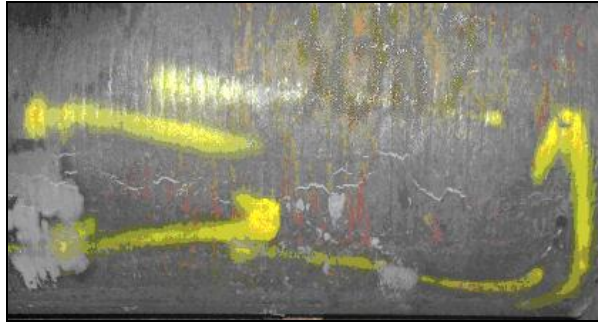
Măsurile de remediere ale acestor fisuri pot fi următoarele:

- asigurarea unei răciri primare și secundare uniforme;
- controlul debitului de oțel sub menisc, stabilizarea nivelului meniscului din cristalizor;
- utilizarea unui praf de ungere cu vâscozitate și punct de topire corelate cu viteza de turnare și diferența de temperatură cu care se lucrează, distribuirea uniformă a prafului în cristalizor;
- întreținerea corectă a mașinii de turnare, [18].

**3. Crăpături stelare** (figura 6.3) și cele determinate de fragilitatea la cald - sunt foarte fine și vizibile doar pe suprafața fără țunder. Se polizează local pentru îndepărtarea defectului (dacă acesta nu este prea adânc).

Cauzele care conduc la apariția crăpăturilor stelare sunt:

- răcirea locală intensă care induce tensiuni locale;
- prezența cuprului la limita grăuntelui austenitic.



**Fig.6.3.** Crăpături stelare, [18]

Măsurile de remediere a crăpăturilor stelare sunt:

- asigurarea unui strat subțire și uniform de praf de turnare topit între fir și cristalizor;
- reglarea corectă a orificiilor duzelor de pulverizare și corelarea debitului de pulverizare cu viteza de turnare;
- răcirea cu o intensitate moderată la ieșirea firului din cristalizator [18].

#### **6.2.1.2. Depresiuni**

**Depresiunile longitudinale** (figura 6.4.) sunt cauzate de:

- transferul termic neuniform în cristalizor care conduce la dezvoltarea inegală a crustei marginale;
- uzura inegală și avansată a cristalizorului care are ca urmare un coeficient de conductibilitate termică diferit;
- fluctuația nivelului oțelului în cristalizor precum și o cantitate prea mare de flux topit cuprinsă în spațiul dintre peretele cristalizorului și fir;
- curgerea turbulentă a oțelului la nivelul sub-meniscului, [18].



**Fig.6.4.** Depresiuni longitudinale, [18]

Măsurile de remediere a depresiunilor longitudinale sunt:

- răcirea ușoară, uniformă și neîntreruptă a firului în cristalizor;
- centrarea jetului de turnare în cristalizor;
- controlul fluctuației nivelului oțelului în cristalizor;
- eventual utilizarea unui cristalizor cu conicitate parabolică;
- utilizarea unui praf de ungere cu viteza de topire și vâscozitate adecvată;
- reducerea turbulenței și agitării suprafeței prin optimizarea poziției duzei de intrare și a suportului acesteia;
- verificarea gradului de uzură al cristalizoarelor și a uniformității uzurii [18].

### 6.2.1.3. Întrerupere de turnare

Întreruperea de turnare (figura 6.5.) reprezintă un defect determinat de o scurtă întrerupere a procesului de turnare, iar defectul se elimină prin scurtarea barei care conține defectul.

Acest defect apare datorită variației bruște a vitezei de turnare datorate fie variațiilor de temperatură a oțelului în distribuitor, fie variației nivelului în cristalizor sau modului de turnare (în mod manual) [18].

Măsura de remediere principală constă în menținerea constantă a vitezei de turnare prin asigurarea unui interval restrâns de variație a temperaturii în distribuitor, prin menținerea nivelului oțelului în cristalizor în limitele recomandate precum și prin turnarea pe mod automat.

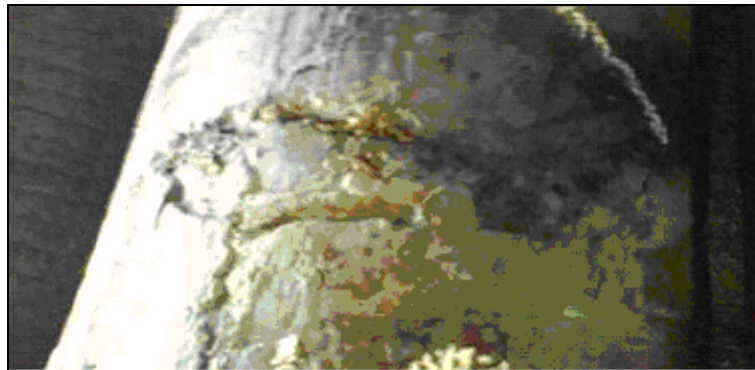


Fig.6.5. Întrerupere turnare

### 6.2.1.4. Retasura de capăt

Retasura de capăt (figura 6.6) reprezintă un gol de material, vizibil în secțiune transversală pe capătul unei bare și se elimină prin debitarea capătului barei, iar porțiunea cu defect se rebutează.

Cauzele care produc acest defect sunt:

- temperatura de turnare ridicată;
- viteza de extracție ridicată;
- răcire secundară prea intensă, [18].

Măsurile de remediere folosite pentru acest defect sunt următoarele:

- menținerea  $\Delta T$  în limitele stabilite;
- corelarea vitezei de turnare, a  $\Delta T$  și a regimului de răcire;
- reducerea vitezei de turnare;
- menținerea debitului de apă la limita minimă stabilită în scopul reducerii intensității răcirii, [18].



Fig.6.6. Retasură de capăt,[18]

## 6.2.2. Defecte interne

### 6.2.2.1. Fisuri

Sunt deschideri în interiorul țaglei, puse în evidență prin analiza macroscopică. Acestea pot fi:

**1. Fisuri interne marginale** (figura 6.7) – acestea sunt fisuri scurte foarte aproape de suprafață, sub depresiune și pot fi cauzate de:

- temperatura de turnare ridicată;
- răcire secundară intensă și în jet ;
- viteza mare de turnare;
- distribuția neuniformă a prafului de ungere între cristalizor și stand, [18].

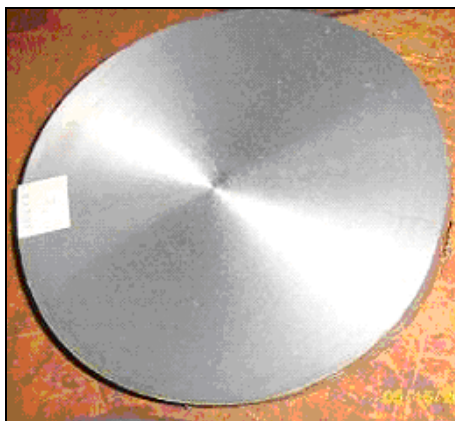


Fig.6.7. Fisuri interne marginale,[18]

Remedierea acestor defecte poate fi făcută prin:

- corelarea vitezei de turnare cu  $\Delta T$  și debitul apei de răcire;
- respectarea valorilor maxime impuse pentru  $\Delta T$ ;
- reglarea corectă a orificiilor de pulverizare a apei de răcire pentru răcirea secundară;
- infiltrarea uniformă a prafului de ungere între cristalizor și stand, [18].

**2. Fisuri la centru** (figura 6.8) – acestea sunt fisuri interne care se extind în miez și care apar din următoarele cauze:

- temperatura de turnare ridicată;
- presiune mare a cilindrilor de tragere pe firul incomplet solidificat, [18].



**Fig.6.8.** Fisuri interne la centru, [18]

Remedierea acestor defecte poate fi făcută prin:

- menținerea  $\Delta T$  în limitele stabilite;
- reducerea vitezei de turnare;
- corelarea viteză de turnare,  $\Delta T$  și regim de răcire, [18].

#### **6.2.2.2. Microretasura**

Microretasura (figura 6.9) - reprezintă un gol de material în partea centrală a unei secțiuni transversale, prelevate dintr-o bară de oțel. Apare ca urmare a contracției metalului la trecerea acestuia din stare lichidă în stare solidă.

Cauzele care conduc la apariția microretasurilor sunt:

- temperatura de turnare ridicată;
- viteza de extracție ridicată;
- răcire secundară intensă;
- menținerea  $\Delta T$  în limitele stabilite;
- corelarea viteză de turnare, variație de temperatură și regim de răcire;
- reducerea vitezei de turnare;
- reducerea intensității răcirii prin menținerea debitului de apă la limita minima admisă [18].



**Fig.6.9.** Microretasura, [18]

### 6.2.2.3. Porozitate centrala

Porozitate centrala (figura 6.10) – reprezintă o neomogenitate interioară a firului turnat continuu, aceasta poate fi însoțită uneori de retasură, având aceleași cauze de apariție. La încălzirea ulterioară se sudează și deci nu constituie motiv de rebutare al materialului turnat continuu.

Cauzele de apariție ale porozității centrale sunt :

- temperatura de turnare ridicată;
- viteza de extracție ridicată;
- răcire secundară intensă [18].



**Fig.6.10.** Porozitate centrală, [18]

Remedierea acestor defecte poate fi făcută prin:

- menținerea  $\Delta T$  în limitele stabilite;
- reducerea vitezei de turnare;
- corelarea viteză de turnare,  $\Delta T$  și regim de răcire ;
- menținerea debitului de apă la limita minima stabilită în scopul reducerii intensității răcirii [18].

## 6.3. Concluzii

Analizând factorii care determină apariția defectelor semifabricatelor rotunde turnate continuu, se constată că ponderea maximă o dețin, atât parametrii turnării precum și compoziția chimică și gradul de puritate al oțelului. Pentru realizarea acestora trebuie sincronizați un număr mare de factori tehnologici pe întreg parcursul turnării continue, cei mai importanți fiind:

- temperatura de turnare;
- compoziția chimică și gradul de puritate ale oțelului;
- viteza de tragere.

O importanță deosebită în asigurarea unei calități corespunzătoare a semifabricatelor turnate continuu o reprezintă temperatura de turnare, care în mod normal ar trebui să fie cât mai scăzută posibil, cunoscut fiind că, temperaturile înalte de turnare duc la formarea de cristale columnare, contribuind astfel la tendința de formare a fisurilor, în timp ce temperaturile scăzute conduc la o structură cristalină mai favorabilă din punct de vedere metalurgic datorită zonei globulare mai extinse.

Totuși, o temperatură de turnare prea scăzută poate determina trecerea oțelului într-o stare păstoasă și poate conduce la blocarea tuburilor, în special la

pornirea turnării. Nivelurile de temperatură necesare trebuie determinate individual pentru diferite grupe de mărci de oțel și acolo unde este posibil să se determine chiar temperatura de turnare a unei șarje.

Temperatura de turnare trebuie să fie cu cel mult 40...60 °C mai mare decât temperatura liquidus, deoarece o supraîncălzire mai ridicată favorizează apariția crăpăturilor longitudinale. Se va avea în vedere de asemenea temperatura și starea căptușelii refractare ale oalei și ale distribuitorului.

În concluzie, sunt necesare controlul și reglarea temperaturii oțelului în cristalizor, principala metodă pentru reducerea supraîncălzirii constând în introducerea micro-răcitorilor consumabili.

Deoarece reprezintă unul din factorii principali, compoziția chimică a oțelului care urmează a fi turnat continuu, trebuie să fie conform euro-normelor actualizate pentru fiecare marcă de oțel, elementele chimice componente urmând să se încadreze în limite precise, prescrise standardele în vigoare.

De asemenea pentru prevenirea defectelor valoarea vitezei de tragere trebuie să fie egală cu valoarea vitezei de umplere.

O intensitate prea mare de răcire poate conduce la apariția fisurilor interne.

În urma experimentărilor industriale s-a observat că defectele cele mai frecvente sunt fisurile urmate apoi, ca și pondere din totalul defectelor înregistrate, de găurile de turnare.

Construcția mașinii de turnare continuă trebuie să răspundă anumitor cerințe tehnologice, iar pentru a stabili tehnologia optimă de turnare trebuie corelați toți factorii care influențează procesele fizico – chimico – metalurgice, ce au loc la interfețele cristalizor – zgură – oțel lichid care, bineînțeles, au o deosebită influență asupra calității oțelului turnat continuu.

## 7. CERCETĂRI PRIVIND MODELAREA MATEMATICĂ ȘI SIMULAREA TRANSFERULUI DE CĂLDURĂ LA TURNAREA CONTINUĂ A SEMIFABRICATELOR ROTUNDE CU DIAMETRU DE 350 mm

### 7.1. Exprimarea sistemului Navier-Stokes în coordonate carteziene și cilindrice

#### 7.1.1. Coordonate Carteziene

Scrierea explicită a sistemului Navier-Stokes, cu notațiile uzuale  $u$ ,  $v$  și  $w$ , pentru componentele vitezei pe cele trei direcții, este următoarea:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (7.1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (7.2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (7.3)$$

Unde  $g_x$ ,  $g_y$ , și  $g_z$  sunt proiecțiile gravitației pe cele trei direcții ale sistemului de coordonate ales.

Ecuția de continuitate se scrie:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7.4)$$

Când mișcarea este staționară, ecuația de continuitate se scrie:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (7.5)$$

Pentru fluide incompresibile densitatea fiind constantă, ecuația de continuitate devine:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (7.6)$$

Această formă a sistemului celor patru ecuații este cea mai comună pentru studiul mișcării fluidelor, [100].

#### 7.1.2. Coordonate cilindrice

În coordonate cilindrice, adică în variabilele  $r$ ,  $\phi$  și  $z$ , sistemul Navier-Stokes se scrie sub forma:



$$r: \rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\phi \partial u_r}{r \partial \phi} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\phi^2}{r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \quad (7.7)$$

$$+ \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} \right] + \rho g_r$$

$$\phi: \rho \left( \frac{\partial u_\phi}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_\phi}{\partial r} + \frac{u_\phi \partial u_\phi}{r \partial \phi} + u_z \frac{\partial u_\phi}{\partial z} + \frac{u_r u_\phi}{r} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \quad (7.8)$$

$$+ \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_\phi}{\partial z^2} + \frac{2 \partial u_r}{r^2 \partial \phi} - \frac{u_\phi}{r^2} \right] + \rho g_\phi$$

$$z: \rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{u_\phi \partial u_z}{r \partial \phi} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (7.9)$$

Ecuția de continuitate devine:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\phi}{\partial \phi} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (7.10)$$

Reprezentarea în coordonate cilindrice se face în unele cazuri datorită avantajului simetriei, deoarece unele componente ale vitezei dispar. Un caz foarte comun este cel al scurgerii axial simetrice, caz în care se presupune că viteza tangențială e zero, mărimile rămase fiind independente de  $\phi$ , rezultând sistemul [100]:

$$\rho \left( \frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} - \frac{u_r}{r^2} \right] + \rho g_r \quad (7.11)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho g_z \quad (7.12)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (7.13)$$

## 7.2. Obținerea microrăcitorilor

Microrăcitori sunt utilizați în practica turnării oțelului sunt sub formă de pulbere de fier (mai rar) și sub formă de granule obținută din sârmă laminată sau trasă, aceștia având rolul pe de o parte, de reglare a temperaturii în cristalizorul instalației de turnare continuă a oțelului (respectiv o reducere), iar pe de altă parte de dirijarea procesului de solidificare.

În cazul de față în procesul de simulare s-a considerat că se utilizează microrăcitori obținuți din sârmă laminată, cu compoziția chimică apropiată de a oțelului turnat continuu, de diametru de 1mm, 2mm și respectiv 3mm și debitată la lungimi de 2-3 mm. În prealabil sârma este supusă curățirii de oxizi, aceasta trebuie să fie foarte curată.

Este cunoscut în literatura de specialitate că introducerea de inoculatori, modificatori și de centrii de cristalizare contribuie la creșterea rapidă a cristalelor echiaxe în fața frontului de cristalizare și întrerupe creșterea dentritelor columnare chiar la viteze mari de cristalizare a oțelului. Formarea structurii echiaxiale este favorizată de prezența particulelor care reprezintă suprafețe de germinare pe care

pot lua naștere cristale în mod eterogen. Trecerea de la structura dentritică columnară la cea echiaxială este influențată de prezența în oțelul lichid a particulelor suplimentare de cristalizare și de intensitatea evacuării căldurii din această zonă, [18].

Depunerea particulelor înaintea frontului de cristalizare are loc din cauza diferenței între viteza de difuzie și viteza de avansare a frontului de cristalizare.

Procesul de solidificare a oțelului este însoțit de fenomene complexe nu numai de formare și creștere a cristalelor, dar și de deplasare convectivă și gravitațională a acestora, de apariția unor fenomene complexe de transfer termic și de masă în stratul marginal.

Prin introducerea de microracitori se urmărește crearea unui număr foarte mare de centrii de cristalizare, având drept suport afirmația academicianului rus Eftimov [92], că unul din procedeele de mărunțire a structurii din zona axială este amestecarea ei intensă sub acțiunea unor factori externi sau prin introducerea de germeni artificiali de cristalizare.

Efectele subrăcirii zonei centrale a semifabricatului de oțel în timpul turnării utilizând microracitori sunt următoarele:

- formarea unor suprafețe noi de germinare, fapt care conduce la o îmbunătățire a structurii macro și microscopice a semifabricatului turnat;
- finisarea grăunților cristalini a semifabricatelor turnate continuu influențează în sens pozitiv și caracteristicile mecanice.

Stimularea germinației eterogene produce o creștere semnificativă a caracteristicilor mecanice concomitent cu scăderea valorii diametrului grăunțului real, finisarea grăunțului cristalin în timpul solidificării, creează premisele îmbunătățirii caracteristicilor mecanice, în special cele de plasticitate, prin îmbunătățirea la scară macro a structurii semifabricatului, respectiv o reducere a dispersiei valorilor caracteristicilor mecanice, [18].

### **7.3. Modelul matematic al procesului din distribuitor la adaosul de microracitori**

Modelul matematic s-a realizat pe baza metodei diferențelor finite, rezultând o rețea de discretizare tridimensională. S-a folosit o rețea neomogenă, mai densă în dreptul firelor de turnare, pentru a obține timpi de calcul rezonabili fără a afecta precizia calculelor. Au fost utilizate o serie de ipoteze simplificatoare care au dus în final la obținerea unui model matematic viabil.

Modelul matematic simulează două fenomene distincte, dar interdependente: transfer masic (curgere) și transfer de căldură, ambele având loc în interiorul și pe suprafețele masei de oțel topit din distribuitor. Sistemul de coordonate ales pentru simulări are originea în centrul gurii de turnare pe suprafața oțelului topit, axa Oz verticală în jos, iar axele Ox și Oy sunt pe direcție longitudinale respectiv transversale. Planele xOz și yOz sunt plane de simetrie, ceea ce permite micșorarea semnificativă a spațiului în care trebuie simulate fenomenele [19, 21, 103, 104].

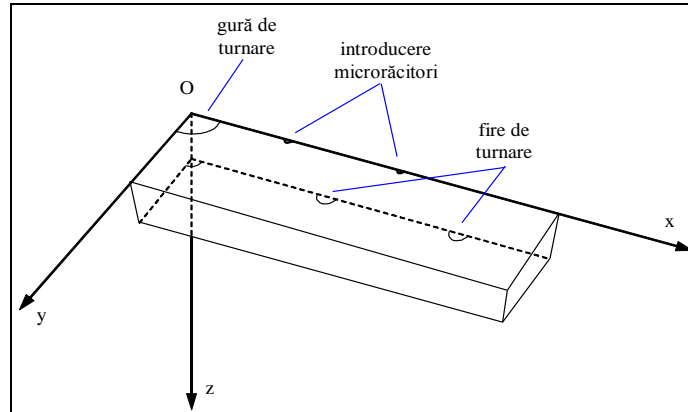


Fig.7.1. Sistemul de coordonate în distribuitor [19, 21, 103, 104]

Astfel, pentru orice mărime fizică în acest sistem de coordonate se poate scrie:

$$f(x, y, z) = f(-x, y, z) = f(x, -y, z) = f(-x, -y, z) \quad (7.14)$$

Pentru transferul masic se consideră ecuația Navier-Stokes pentru fluide incompresibile, cu formula generală:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f} \quad (7.15)$$

unde:  $\rho$  - densitatea;  $\vec{v}$  - viteza;  $\tau$  - timpul;  $p$  - presiunea;  $\mu$  - vâscozitatea dinamică;  $\vec{f}$  - un câmp de forțe exterioare.

Pentru problema studiată, este suficientă o aproximare a vitezelor, pentru care putem lua în considerare următoarele: curgerea este considerată staționară; gradientul de presiune este determinat exclusiv de gravitație, adică

$\nabla p = \vec{f}$ ; cum viteza de curgere este mică, efectul vâscozității este slab și nu se formează turbulențe.

Rezultă că  $\vec{v}$  este un câmp de potențial și în plus are divergența zero:

$$\nabla \vec{v} = \nabla^2 P = 0 \quad (7.16)$$

unde  $P$  este o mărime introdusă în scopul efectuării calculelor. Utilizarea acestei mărimi scalare în locul vitezei conduce la reducerea numărului de ecuații necesare la o treime.

Pentru simularea procesului de transfer termic se pornește de la ecuația căldurii:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t = a \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (7.17)$$

unde:  $t$  este temperatura;  $\tau$  - timpul;  $a$  - difuzivitatea termică  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ ;

$x, y, z$  - coordonate spațiale.

Având în vedere dependența conductibilității termice  $\lambda$  de temperatură se introduce o temperatură redusă care să includă această variație:

$$\Phi = \int_{t_0}^t \frac{\lambda}{\lambda_0} dt \quad (7.18)$$

unde  $\lambda$  și  $\lambda_0$  sunt conductibilitățile termice la temperatura  $t$  și la o temperatură arbitrară  $t_0$ .

Astfel:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = a(\Phi) \cdot \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) \quad (7.19)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot \frac{\rho \cdot c}{\lambda} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \quad (7.20)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \cdot \frac{\rho}{\lambda} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \quad (7.21)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\lambda_0}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) \quad (7.22)$$

S-au folosit relațiile pentru difuzivitatea termică  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$  și căldura

specifică  $c = \frac{\partial H}{\partial \tau}$ .

Date fiind punctele  $x_1, x_2 \dots x_n$  și valorile determinate ale funcției  $u(x)$  în aceste puncte  $u_1, u_2 \dots u_n$ , funcția de interpolare liniară se poate scrie astfel:

$$u(x) = u_i \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} + u_{i+1} \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i}, \text{ cu } x_i \leq x < x_{i+1} \quad (7.23)$$

Aceasta se poate extinde la două dimensiuni - considerăm funcția  $u(x, y)$  și punctele  $x_i$  și  $y_j$ :

$$u(x, y) = \left( u_{i,j} \frac{y_{j+1} - y}{y_{j+1} - y_j} + u_{i,j+1} \frac{y - y_j}{y_{j+1} - y_j} \right) \frac{x_{i+1} - x}{x_{i+1} - x_i} + \left( u_{i+1,j} \frac{y_{j+1} - y}{y_{j+1} - y_j} + u_{i+1,j+1} \frac{y - y_j}{y_{j+1} - y_j} \right) \frac{x - x_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (7.24)$$

Varianta tridimensională se obține folosind de patru ori (7.23) pentru a determina valorile care corespund proiecțiilor punctului  $(x, y, z)$  dat pe muchii paralele cu axa  $Oz$ , obținând  $u(x_i, y_j, z)$ ,  $u(x_{i+1}, y_j, z)$ ,  $u(x_{i+1}, y_{j+1}, z)$  și  $u(x_i, y_{j+1}, z)$ , după care se continuă cu o relație similară cu (7.24).

În continuare, indicii  $i, j$  și  $k$  au semnificația uzuală. Pentru a simplifica formulele vom nota:

$$\begin{aligned} X_2 &= X_{i+1,j,k} - X_{i,j,k}, & X_1 &= X_{i,j,k} - X_{i-1,j,k}; \\ Y_2 &= Y_{i+1,j,k} - Y_{i,j,k}, & Y_1 &= Y_{i,j,k} - Y_{i-1,j,k}; \\ Z_2 &= Z_{i+1,j,k} - Z_{i,j,k}, & Z_1 &= Z_{i,j,k} - Z_{i-1,j,k}. \end{aligned} \quad (7.25)$$

Dacă se dezvoltă funcția  $\Phi = f(x, y, z)$  în serie Taylor față de  $x$  și se

neglijază termenii superiori, începând cu ordinul trei, se obține:

$$\Phi_{i-1,j,k} = \Phi_{i,j,k} - \frac{x_1}{1!} \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} + \frac{x_1^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (7.26)$$

$$\Phi_{i+1,j,k} = \Phi_{i,j,k} + \frac{x_2}{1!} \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} + \frac{x_2^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (7.27)$$

de unde rezultă:

$$x_2 \Phi_{i-1,j,k} + x_1 \Phi_{i+1,j,k} = (x_1 + x_2) \Phi_{i,j,k} + \frac{x_2 x_1^2 + x_1 x_2^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (7.28)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} = \frac{2}{x_1 x_2 (x_1 + x_2)} \cdot [x_2 \Phi_{i-1,j,k} + x_1 \Phi_{i+1,j,k} - (x_1 + x_2) \Phi_{i,j,k}] \quad (7.29)$$

Variația de entalpie se exprimă sub formă de diferență finită:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} \cong \frac{H_{i,j,k}^{\tau+\Delta\tau} - H_{i,j,k}^{\tau}}{\Delta\tau} \quad (7.30)$$

Densitatea fluxului termic la suprafață se poate scrie:

$$W = -\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} \quad (7.31)$$

unde  $\Phi_{i,j,k}$  este temperatura redusă la suprafață. Fluxul de căldură sub formă de diferențe finite este:

$$W = \frac{\lambda_0}{2x} \cdot (\Phi_{i-1,j,k} - \Phi_{i+1,j,k}) \quad (7.32)$$

de unde:

$$\Phi_{i+1,j,k} = \Phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} \cdot W \quad (7.33)$$

Pentru calculul vitezelor s-a folosit relația (7.18), care – scrisă explicit în coordonate carteziene arată astfel:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0 \quad (7.34)$$

Conductibilitatea termică a oțelului și fontei este dată în literatură sub formă de tabele sau grafice. Reprezentând grafic o astfel de dependență, se observă ca ea poate fi aproximată foarte bine printr-o funcție pe două intervale: un arc de parabolă până la o temperatură ( $t_{cr} = 768$  °C, este temperatura punctului Curie), și o valoare constantă peste această temperatură. Funcția are forma:

$$\lambda(t) = \begin{cases} a \cdot t^2 + b \cdot t + c, & t \leq t_{cr} \\ \lambda_{cr}, & t > t_{cr} \end{cases} \quad (7.35)$$

unde, pentru a asigura continuitatea funcției în punctul  $t = t_{cr}$  se calculează  $\lambda_{cr}$  cu:

$$\lambda_{cr} = a \cdot t_{cr}^2 + b \cdot t_{cr} + c \quad (7.36)$$

Parabola este un polinom de regresie de ordinul 2, ai cărui coeficienți sunt calculați prin metoda celor mai mici pătrate. Valorile obținute sunt:

$a = -3,325347756276 \cdot 10^{-5}$ ;  $b = -8,628845527225 \cdot 10^{-3}$ ;  $c = 5,0928618576856$

În tabelul 7.1. se prezintă valorile experimentale și cele approximate prin această metodă.

**Tabelul 7.1.** Valorile conductibilității termice

$T, [^{\circ}\text{C}]$	$\lambda, [\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}]$ experimental	$\lambda, [\text{W}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}]$ aproximat
20	50,66	50,743
200	48,13	47,873
400	41,85	42,157
600	33,95	33,780
800	24,65	24,688
1000	24,65	24,688

Formula (7.36) permite calculul ușor al integralei din (7.18). Pentru simplificare (amintim că  $t_0$  este ales arbitrar, iar  $\lambda_0 = \lambda(t_0)$ ), alegem  $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$ . Astfel, deoarece  $\lambda_0 = \lambda(0) = c$ , relația (7.18) devine:

$$\Phi(t) = \frac{1}{c} \cdot \int_{t_0}^t \lambda(t) dt = \begin{cases} \frac{a}{3c} t^3 + \frac{b}{2c} t^2 + t, & t \leq t_{cr} \\ \frac{a}{3c} t_{cr}^3 + \frac{b}{2c} t_{cr}^2 + t_{cr} + (t - t_{cr}) \frac{\lambda_{cr}}{c}, & t > t_{cr} \end{cases} \quad (7.37)$$

Pentru calculul  $t(\varphi)$  se rezolvă ecuația de gradul I dacă  $t > t_{cr}$ , iar în cazul  $t \leq t_{cr}$  se folosește metoda aproximațiilor succesive (metoda lui Newton).

În urma simulărilor, diferențele de temperatură constatate au variat cu circa  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  față de datele calculate. Erorile pot să apară din cauza ipotezelor simplificatoare.

Simularea a fost rulată în condițiile întâlnite frecvent în practica industrială, respectiv o diferență de temperatură de maxim  $20^{\circ}\text{C}$ , pentru care adaosul de microrăcitori a variat între 0 și 1,5%. În tabelul 7.2. sunt prezentate rezultate ale simulării pentru diverse cantități de microrăcitori introduse.

**Tabelul 7.2.** Valori ale temperaturii oțelului după adaosul de microrăcitori, [19, 21, 103, 104]

Conținut de microrăcitori, [%]	$t_1, [^{\circ}\text{C}]$	$t_2, [^{\circ}\text{C}]$	$t_3, [^{\circ}\text{C}]$
0	1581,57	1580,66	1578,27
0,25	1576,26	1575,35	1572,96
0,5	1570,96	1570,04	1567,65
0,75	1565,65	1564,74	1562,35
1	1560,34	1559,43	1557,04
1,25	1555,03	1554,12	1551,73
1,5	1549,73	1548,81	1546,42

Analiza rezultatelor permite stabilirea cantității optime de microrăcitori necesară în distribuitor, pentru reglarea temperaturii oțelului lichid în limitele dorite de tehnologi.

## 7.4. Modelarea matematică a procesului din cristalizor

Modelarea matematică al procesului de răcire și solidificare a semifabricatelor rotunde turnate continuu, prezentată în continuare, are la bază descrierea matematică a acestui fenomen. Soluția acestei probleme reprezintă de fapt soluția ecuației transmierii căldurii în regim nestaționar.

Pentru a putea defini transmiterea de căldură între semifabricat și cristalizor trebuie cunoscute condițiile inițiale și legile de variație a fluxului de căldură semifabricat-cristalizor respectiv cristalizor-apă de răcire. Unele condiții pot fi schematizate ușor, altele conduc însă la sisteme de ecuații care nu pot fi soluționate pe cale analitică.

### 7.4.1. Modelarea prin metoda diferențelor finite

Metodă are la bază transformarea ecuației diferențiale a transmierii căldurii în ecuații cu diferențe finite. Ecuația diferențială a transmierii căldurii după cele trei axe are forma:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t \quad (7.38)$$

unde: -  $t$  - temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ] (sau [K]);  
-  $\tau$  - timpul [s];  
-  $a$  - difuzivitatea termică [ $\text{m}^2/\text{s}$ ].

Laplacianul scalar în coordonate cilindrice este:

$$\nabla^2 t = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (7.39a)$$

sau:

$$\nabla^2 t = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \quad (7.39b)$$

Pentru neglijarea transmierii de căldură pe direcția longitudinală se obține:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} \right) \quad (7.40)$$

Ținând seamă de dependența conductibilității termice  $\lambda$  de temperatură se poate introduce o temperatură redusă care include această variație:

$$\Phi = \int_{t_0}^t \frac{\lambda}{\lambda_0} dt \quad (7.41)$$

unde  $\lambda$  și  $\lambda_0$  sunt conductibilitățile termice la temperatura  $t$  și respectiv  $t_0$  arbitrară. Rezultă:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = a(\Phi) \cdot \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} \right) \quad (7.42)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot \frac{\rho \cdot c}{\lambda} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} \quad (7.43)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial H}{\partial t} \cdot \frac{\rho}{\lambda} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} \quad (7.44)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\lambda_0}{\rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \varphi^2} \right) \quad (7.45)$$

Ultima relație este foarte utilă pentru că permite calculul direct al cantității de căldură, care include în faza lichidă și căldura latentă. Au fost folosite relațiile pentru difuzivitatea termică  $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$  și pentru căldura specifică  $c = \frac{\partial H}{\partial t}$ .

Se exprimă temperatura unui punct  $(i,j)$  al rețelei de discretizare în funcție de temperatura punctelor vecine lui. Valorile  $i-1, i, i+1$  se referă la coordonata  $r$ ;  $j-1, j, j+1$  la coordonata  $\varphi$ , iar  $k$  și  $k+1$  se referă la timp. Dacă funcția  $\Phi = f(r, \varphi)$  se dezvoltă în serie Taylor față de  $r$  și se neglijează termenii superiori, începând cu ordinul trei, rezultă:

$$\Phi_{i-1,j,k} = \Phi_{i,j,k} - \frac{r_1}{1!} \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial r} + \frac{r_1^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial r^2} \quad (7.46)$$

$$\Phi_{i+1,j,k} = \Phi_{i,j,k} + \frac{r_2}{1!} \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial r} + \frac{r_2^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial r^2} \quad (7.47)$$

deci prima derivată este:

$$r_2^2 \Phi_{i-1,j,k} - r_1^2 \Phi_{i+1,j,k} = (r_2^2 + r_1^2) \Phi_{i,j,k} - r_1 r_2 (r_1 + r_2) \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial r} \quad (7.48)$$

$$\frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial r} = \frac{1}{r_1 r_2 (r_1 + r_2)} \cdot [r_1^2 \Phi_{i+1,j,k} - r_2^2 \Phi_{i-1,j,k} + (r_2^2 - r_1^2) \Phi_{i,j,k}] \quad (7.49)$$

și a doua derivată este:

$$r_2 \Phi_{i-1,j,k} + r_1 \Phi_{i+1,j,k} = (r_1 + r_2) \Phi_{i,j,k} + \frac{r_2 r_1^2 + r_1 r_2^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial r^2} \quad (7.50)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial r^2} = \frac{2}{r_1 r_2 (r_1 + r_2)} \cdot [r_2 \Phi_{i-1,j,k} + r_1 \Phi_{i+1,j,k} - (r_1 + r_2) \Phi_{i,j,k}] \quad (7.51)$$

Pentru o distribuție omogenă a punctelor de discretizare ( $r_1 = r_2 = r$ ), cele două derivate se obțin astfel:

$$\frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial r} = \frac{\Phi_{i+1,j,k} - \Phi_{i-1,j,k}}{2 \cdot r} \quad (7.52)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial r^2} = \frac{\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2 \cdot \Phi_{i,j,k}}{r^2} \quad (7.53)$$

Pentru coordonata  $\varphi$  se procedează identic și se obține derivata a doua:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial \varphi^2} = \frac{2}{\varphi_1 \varphi_2 (\varphi_1 + \varphi_2)} \cdot [\varphi_2 \Phi_{i,j-1,k} + \varphi_1 \Phi_{i,j+1,k} - (\varphi_1 + \varphi_2) \Phi_{i,j,k}] \quad (7.54)$$



respectiv pentru distribuție omogenă ( $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ ):

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial \varphi^2} = \frac{\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2 \cdot \Phi_{i,j,k}}{\varphi^2} \quad (7.55)$$

Variația entalpiei se exprimă sub formă de diferență finită astfel:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} \cong \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} \quad (7.56)$$

Dacă se introduc relațiile (7.49), (7.51) și (7.54) în (7.45) rezultă:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{2 \cdot \lambda_0}{\rho \cdot r_1 r_2 (r_1 + r_2)} \cdot [r_2 \Phi_{i-1,j,k} + r_1 \Phi_{i+1,j,k} - (r_1 + r_2) \Phi_{i,j,k}] + \\ &+ \frac{\lambda_0}{\rho \cdot r \cdot r_1 r_2 (r_1 + r_2)} \cdot [r_1^2 \Phi_{i+1,j,k} - r_2^2 \Phi_{i-1,j,k} + (r_2^2 - r_1^2) \Phi_{i,j,k}] + \\ &+ \frac{2 \cdot \lambda_0}{\rho \cdot r^2 \cdot \varphi_1 \varphi_2 (\varphi_1 + \varphi_2)} \cdot [\varphi_2 \Phi_{i,j-1,k} + \varphi_1 \Phi_{i,j+1,k} - (\varphi_1 + \varphi_2) \Phi_{i,j,k}] \end{aligned} \quad (7.57)$$

În cazul în care distribuția punctelor rețelei de discretizare este omogenă (caz foarte des întâlnit) și notând  $r_1 = r_2 = r_0$  și  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_0$  se obține:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{\lambda_0}{\rho \cdot r_0^2} \cdot [\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{2\rho \cdot r \cdot r_0} \cdot \\ &\cdot [\Phi_{i+1,j,k} - \Phi_{i-1,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot \varphi_0^2 \cdot r^2} \cdot [\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2 \cdot \Phi_{i,j,k}] \end{aligned} \quad (7.58)$$

Printr-o metodă iterativă se poate determina evoluția distribuției de temperaturi în cursul răcirii și solidificării oțelului turnat continuu.

Ecuatia (7.58) este valabilă pentru un punct situat în interiorul firului. Pentru un punct situat pe o suprafață limită, ecuația (7.58) se modifică. Pentru punctele de pe suprafața de separație se scrie ecuația fluxului de căldură la suprafață:

$$W = -\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial r} \quad (7.59)$$

unde  $\Phi_{i,j,k}$  este temperatura la suprafață. Expresia  $\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial r}$  se poate scrie sub formă de diferență finită în funcție de o temperatură  $\Phi_{i+1,j,k}$  a unui punct imaginar al rețelei de discretizare situat la distanța  $r = r_1$  de suprafață. Fluxul de căldură prin suprafață trebuie să fie:

$$W = \frac{\lambda_0}{2r} \cdot (\Phi_{i-1,j,k} - \Phi_{i+1,j,k}) \quad (7.60)$$

de unde:

$$\Phi_{i+1,j,k} = \Phi_{i-1,j,k} - \frac{2r}{\lambda_0} \cdot W \quad (7.61)$$

Relațiile (7.52) și (7.53) devin:

$$\frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial r} = -\frac{W}{\lambda_0} \quad (7.62)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial r^2} = \frac{2}{r^2} \cdot \left[ \Phi_{i-1,j,k} - \frac{r}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] \quad (7.63)$$

iar (7.58) devine:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{2 \cdot \lambda_0}{\rho \cdot r_0^2} \cdot \left[ \Phi_{i-1,j,k} - \frac{r}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] - \\ &- \frac{W}{\rho \cdot r_0} + \frac{2 \cdot \lambda_0}{\rho \cdot \varphi_0^2 \cdot r^2} \cdot \left[ \Phi_{i-1,j,k} - \frac{r}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] \end{aligned} \quad (7.64)$$

#### 7.4.2. Criteriul de stabilitate a ecuațiilor cu diferențe finite

O problemă critică a aplicării prin iterație a ecuației cu diferențe finite este asigurarea acurateții și stabilității soluției în cursul integrării. Pentru a asigura stabilitatea soluției, deci pentru a împiedica oscilația soluției în cursul integrării, intervalul de timp între iterații și dimensiunile rețelei de discretizare trebuie alese în concordanță cu criteriile de stabilitate deduse. Este de asemenea de dorit acuratețea soluției, adică concordanța sa cât mai bună cu soluția analitică. Aceasta depinde de forma ecuației cu diferențe finite și de numărul de noduri al rețelei de discretizare.

Deci, densitatea nodurilor rețelei de discretizare se stabilește pornind de la nevoia găsirii unei rezolvări a contradicției următoare: folosirea unei rețele mai dese mărește precizia modelului dar tot odată o rețea deasă mărește și durata de efectuare a calculelor atât din cauza creșterii numărului de noduri, cât și a reducerii intervalelor de timp între iterații dictate de condițiile de stabilitate a soluției [18].

Din analiza stabilității ecuației cu diferențe finite rezultă următoarele criterii:

$$\text{în interior} \quad \Delta \tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[ \frac{1}{r_1 r_2} + \frac{1}{r^2 \varphi_1 \varphi_2} \right]} \quad (7.65)$$

$$\text{respectiv pe margine} \quad \Delta \tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[ \frac{1}{r_1 r_2} + \frac{1}{r^2 \varphi^2} + \frac{W}{\lambda \cdot r} \right]} \quad (7.66)$$

Intervalul de timp ales reprezintă timpul în care procesul nestaționar al transmiterii căldurii este aproximat cu un proces staționar. Deci, cu cât caracteristicile procesului real se abat mai mult de la caracteristicile unui proces staționar, cu atât trebuie să fie mai mică durata iterației.

Notăm:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = G_{i,j,k} \quad (7.67)$$

Mărimea  $G_{i,j,k}$  reprezintă viteza de variație a entalpiei punctului  $(i,j)$  în cadrul procesului considerat staționar care începe la momentul  $\tau_k$ . Cu cât valoarea absolută a acestei mărime este mai mare, cu atât procesul este mai nestaționar,

deci intervalul de timp trebuie ales mai mic.

Folosirea unui interval de timp variabil și limitarea variației entalpiei la o valoare fixată  $\Delta H_{max}$  reprezintă soluția optimă. Astfel rezultă:

$$\Delta \tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k = \frac{\Delta H_{max}}{\max_{(i,j) \in D} |G_{i,j,k}|} \quad (7.68)$$

unde  $D$  este domeniul valorilor  $(i,j)$ .

Deci se obține un interval de timp mic atunci când variația entalpiei este mare respectiv un interval mare de timp atunci când aproximarea cu un proces staționar este mai bună [18].

### 7.4.3. Modelul bidimensional al solidificării și răcirii semifabricatului

Pentru realizarea modelării matematice bidimensionale a unui semifabricat rotund cu diametrul de 350mm turnat continuu se consideră o secțiune a ansamblului cristalizor-semifabricat care se împarte cu ajutorul unei rețele de discretizare.

Temperatura fiecărui nod al rețelei de discretizare reprezintă temperatura medie a suprafeței adiacente lui. Pentru aceste noduri se scriu ecuațiile cu diferențe finite prezentate în subcapitolul anterior.

Modelul pornește de la următoarele ipoteze simplificatoare:

- secțiunea cristalizorului se consideră a fi o secțiune echivalentă circulară;
- se consideră că pierderea de căldură este uniformă pe toate suprafețele cristalizorului;
- conductibilitatea termică a materialului cristalizorului este considerată constantă;
- se neglijează transmiterea căldurii pe axa longitudinală, considerând că ea are loc doar în secțiunea orizontală a firului;
- se neglijează variația densității;
- se consideră că în momentul zero temperatura oțelului lichid este uniformă, iar temperatura microrăcitorilor este egală cu temperatura mediului ambiant;
- conductibilitatea termică a stratului de zgură de pe suprafața firului este considerată constantă;
- degajarea căldurii latente de topire are loc în intervalul lichidus–solidus direct proporțional cu temperatura.

Ca urmare a ipotezelor simplificatoare considerate, ansamblul cristalizor-semifabricat este simetric față de axa longitudinală a semifabricatului. Sistemul de axe are originea în centrul semifabricatului, iar calculele se efectuează numai pentru valori pozitive.

Fluxul de căldură transmis apei de răcire în zona răcirii primare și secundare se calculează cu relațiile:

$$W = K \cdot (T_M - T_A)^{1,25} \quad (7.69)$$

$$W = K \cdot (T_S - T_A)^{1,25} \quad (7.70)$$

- unde:
- $T_S$  - temperatura absolută a suprafeței semifabricatului, [K];
  - $T_M$  - temperatura absolută a feței interioare a cristalizorului, [K];
  - $T_A$  - temperatura apei de răcire [K].
  - $K$  - constanta de convecție.

## 7.5. Simularea solidificării țagtelor rotunde turnate continuu cu diametru de 350 mm

### 7.5.1. Descrierea și funcționarea programului de solidificare a semifabricatelor rotunde turnate continuu

Programul de calcul este realizat în limbajul C++ și funcționează sub platforme Windows XP sau mai noi, pe 32 sau 64 biți, cu procesor Intel sau echivalent. Alegerea limbajului este motivată de faptul că este bine cunoscut de autor, iar programele compilate în C/C++ sunt printre cele mai rapide.

Pentru interfața grafică, programul folosește MFC (*Microsoft Foundation Classes*), o bibliotecă de clase care încapsulează funcționalitatea interfeței standard de programare Windows (API – *Application Program Interface*). Atât MFC cât și funcțiile C standard care nu sunt parte din Windows API necesită o bibliotecă specială: VCREDIST (de la *Microsoft Visual C++ 2008 Redistributable*). Graficele tridimensionale sunt realizate cu implementarea Windows a specificației OpenGL (*Open Graphics Library*). Aceste biblioteci dinamice (OPENGL32.DLL și GLU32.DLL) sunt instalate implicit cu orice sistem de operare din cele menționate.

Sursa programului are o construcție modulară și orientată pe obiecte. Un modul C++ constă în general dintr-o pereche de fișiere: unul cu extensia .H (de la *header* – antet) care conține declarații de funcții și/sau clase, fiind folosit la interfațarea cu celelalte module, și unul cu extensia .CPP (de la C++) care conține definiții (implementări ale funcțiilor și claselor declarate în header).

Cele mai importante clase C++ implicate în procesul de simulare sunt:

- **Material** – conține descrierea unui material (oțel, cupru etc.). Această clasă implementează dependențele funcționale  $\lambda(t)$ ,  $\Phi(t)$ ,  $t(\Phi)$  prin metode analitice și  $H(t)$  și  $t(H)$  prin interpolare liniară. Clasa dispune de metode pentru serializare.

- **HeatFlow** – această clasă realizează calculele corespunzătoare unei singure iterații în timp. Constructorul acestei clase are ca argumente două referințe: una către clasa MetalData (descrisă mai jos) care a creat-o și una către o altă instanță a HeatFlow care reprezintă momentul de timp precedent. Dacă această referință este invalidă (NULL), atunci este vorba de prima iterație, iar acțiunea va fi de a aplica valorile inițiale pentru  $t$ ,  $\Phi$  și  $H$ . Pentru a reduce la minim necesitatea conversiilor între  $t$ ,  $\Phi$  și  $H$ , clasa conține trei matrici distincte corespunzătoare acestor mărimi în nodurile rețelei.

Toate calculele sunt realizate în virgulă mobilă dublă precizie, pentru a reduce erorile propagate. Acestea se datorează faptului că, deși precizia este destul de mare atât pentru simplă precizie (**float** – 32 biți, 8 zecimale) cât și în dublă precizie (**double** – 64 biți, 17 zecimale), simularea conduce la un șir foarte lung de valori care sunt calculate unele din altele.

După terminarea calculelor, numai temperaturile vor fi salvate în fișierul gestionat de MetalData în simplă precizie – suficientă pentru construirea de grafice.

- **SequenceInterpolator** – deoarece clasele care implementează grafice au nevoie de funcții continue, iar temperatura unui nod este considerată media temperaturii suprafeței adiacente, este necesară interpolarea valorilor obținute prin calcul pentru a obține o funcție continuă. Această sarcină îi revine clasei SequenceInterpolator. Interpolarea este biliniară și se realizează mai întâi după axa  $r$  și apoi după  $\phi$ .

Clasa MetalData, atunci când este în starea de furnizor de date, păstrează în memorie două instanțe ale SequenceInterpolator. Acestea sunt folosite pentru încă o interpolare liniară, de data aceasta în timp.

– **ProgressDialog** – este o derivată a clasei MFC **CDialog** și implementează un dialog modal (care nu permite accesul la fereastra principală). Acesta se deschide atunci când se pornește procesul de calcul – pe care îl controlează indirect – și se închide la terminarea calculelor fie prin comandă manuală, fie la atingerea condiției de oprire.

La inițializarea dialogului se pornește un fir de execuție (*thread*) separat de cel principal, cu care va rula în paralel. Acest *thread* efectuează de fapt calculele apelând metode ale clasei **MetalData**. La rândul ei, aceasta apelează funcția **callback()** a clasei **ProgressDialog** la fiecare iterație, ceea ce permite actualizarea datelor afișate. Deoarece este vorba de calcule intensive și îndelungate *thread*-ul are nivel de prioritate scăzut (-2), ceea ce înseamnă că va ceda timp altor programe dacă este cazul.

În fereastra de dialog pentru progresul calculelor temperaturile sunt indicate prin intermediul unui gradient de culoare, cu valorile: roșu pentru temperatura maximă, albastru pentru minimă și verde pentru media lor. Orice temperatură intermediară este o combinație a acestora.

– **MetalData** – această clasă gestionează un fișier temporar, în care sunt scrise datele în procesul de calcul și din care sunt citite pentru construcția de grafice. S-a folosit un fișier și nu memoria pentru că dimensiunea datelor rezultate în urma calculelor poate fi foarte mare și este în plus și imprevizibilă. Fișierul este șters de către destructorul acestei clase (atunci când se termină programul), dar poate fi copiat în alt loc și utilizat mai târziu prin comenzi din meniu.

Salvarea datelor în fișier nu are loc neapărat la fiecare iterație – nu ar avea rost, ținând cont că intervalul dintre iterații este de ordinul milisecundelor – ci numai dacă intervalul de la ultima salvare este de cel puțin 1 secundă în timp simulat (timpul virtual). Astfel se asigură o dimensiune rezonabilă a fișierului fără să se piardă rezoluția simulării.

Această clasă conține bucla principală de calcul și instanțe sau referințe către instanțe ale claselor precedente. Există o singură instanță globală a **MetalData**.

Având în vedere influența mare a procesului de transfer de căldură a oțelului din cristalizor s-a considerat că este indicat să fie efectuată o simulare pentru această etapa a procesului tehnologic.

### 7.5.2. Realizarea simulării solidificării țagtelor rotunde turnate continuu cu diametru de 350mm cu 3% adaos de microracitori în cristalizor

Pentru realizarea simulării solidificării semifabricatelor turnate continuu cu programul întocmit se utilizează caracteristicile mărcii de oțel S 235, conform EN 10297 și anume:

- masa specifică (densitatea)  $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$  ;
- temperatura solidus  $T_{sol} = 1468 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- temperatura lichidus  $T_{lich} = 1520 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- căldura latentă de topire  $q_t = 64 \text{ kcal/kg} = 267,87 \text{ kJ/kg}$ ;
- căldura specifică a fazei lichide  $c_l = 1,118 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ;
- consum de microracitori 1%, 2% și 3%;
- dependențele funcționale  $\lambda(T)$ ,  $\Phi(T)$  și  $H(T)$ .

Datele ambientale folosite sunt:

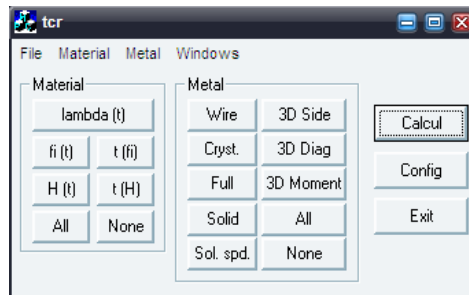
- temperatura mediului ambiant  $20^\circ\text{C}$ ;
- temperatura de turnare  $1560^\circ\text{C}$ ;

- temperatura inițială a microrăcitorilor este egală cu temperatura mediului ambiant;

Numărul punctelor de discretizare a semifabricatului turnat continuu este de  $60 \times 60$ , după cum se observă și din figura 7.3.

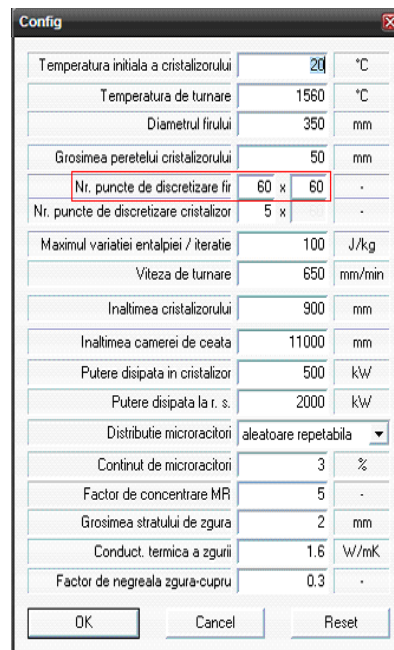
Simularea s-a realizat pentru semifabricate rotunde cu diametrul de 350mm turnate continuu. Programul permite o distribuție uniformă a microrăcitorilor, o distribuție aleatoare respectiv o distribuție aleatoare repetabilă, în cadrul acestei simulări s-a folosit distribuția aleatoare repetabilă a microrăcitorilor.

Pentru realizarea simulării mai întâi se deschide interfața principală a programului, prezentată în figura 7.2.



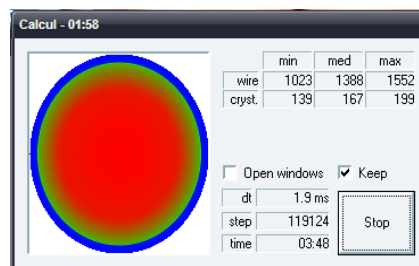
**Fig.7.2.** Interfața principală a programului

Datele stabilite pot fi introduse în program prin intermediul unei ferestre de dialog (care se deschide prin apăsarea butonului Config din interfața principală a programului) care permite configurarea datelor, prezentată în figura 7.3.



**Fig.7.3.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului

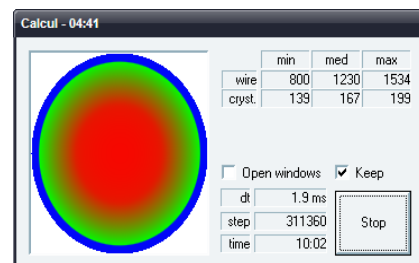
Simularea solidificării semifabricatelor turnate continuu cu adaos aleatoriu repetabil de microrăcitori în cristalizor s-a efectuat în trei variante: adaos de 1%, 2% și respectiv 3% microrăcitori. Pentru adaos de 1% și 2% microrăcitori datele obținute sunt prezentate în anexe. Simularea este realizată doar pentru răcirea primară și secundară, nu pentru întreg traseul parcurs de fir în instalația de turnare continuă. Astfel se explică valorile mari ale temperaturii oțelului din interiorul firului, care scad sub valoarea temperaturii solidus până la momentul debitării semifabricatului.



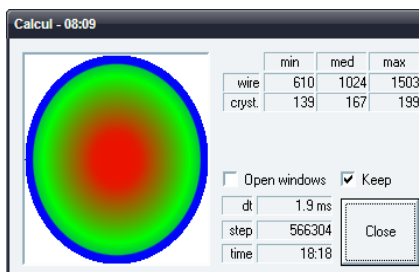
**Fig.7.4.** Fereastra care indică progresul calculor, la 1:58min timp real, respectiv 3:48min timp simulat

Timpul real nu coincide cu timpul simulat, cu cât numărul de noduri al rețelei de discretizare este mai mare și maximum variației entalpiei într-o iterație mai mic, cu atât timpul real de simulare este mai mare.

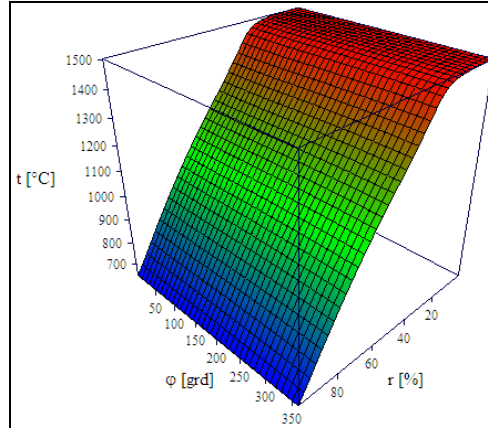
Pentru o bună ilustrare a funcționării programului, s-a efectuat capturi ale ecranului la diferite momente de timp (începutul, mijlocul și sfârșitul simulării), din care se pot obține informații privind valorile temperaturilor din fir și cristalizor, conform figurilor 7.4.,7.5. și respectiv 7.6.



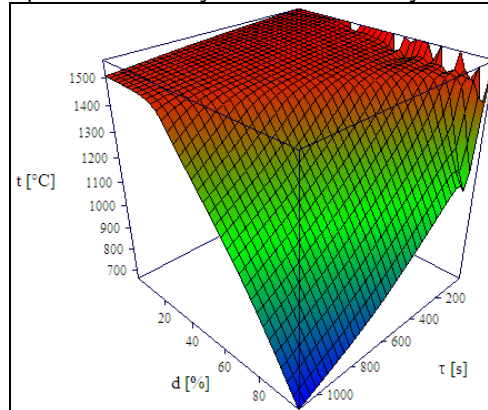
**Fig.7.5.** Fereastra care indică progresul calculor, la 4:41min timp real, respectiv 10:02min timp simulat



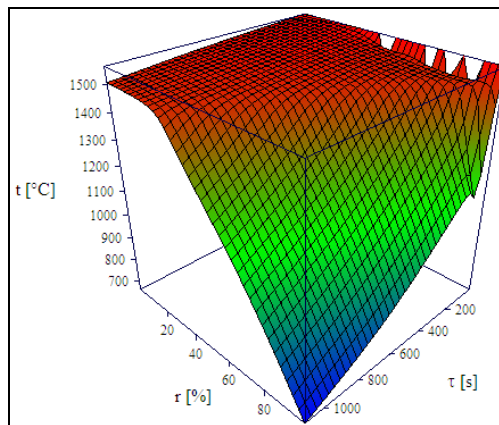
**Fig.7.6.** Fereastra care indică progresul calculor, la 8:09min timp real, respectiv 18:18min timp simulat



**Fig.7.7.** Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară

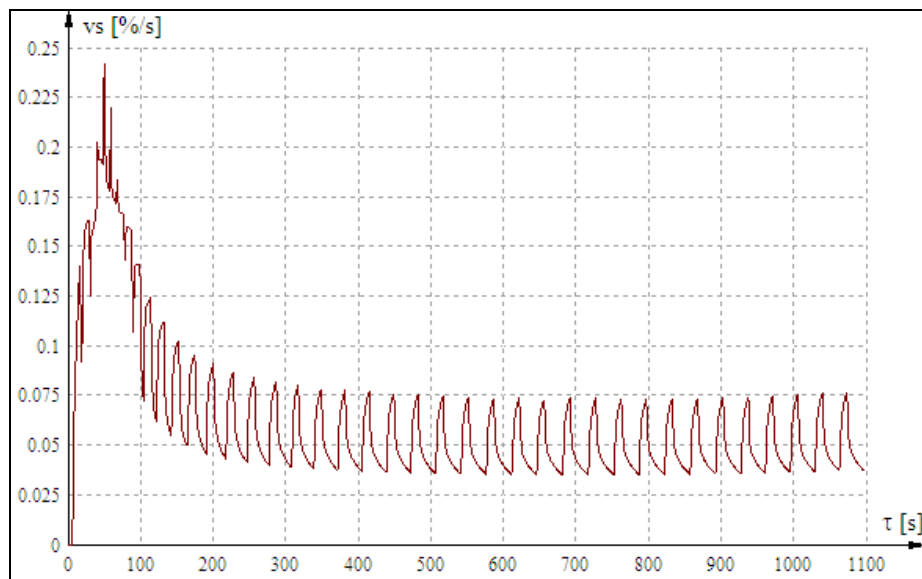


**Fig.7.8.** Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata  $d$ . Punctele sunt luate în spirală așa încât  $d$ , raza relativă și  $\varphi/2\pi$  să aibă aceeași valoare.



**Fig.7.9.** Temperatura în funcție de raza relativă și timp



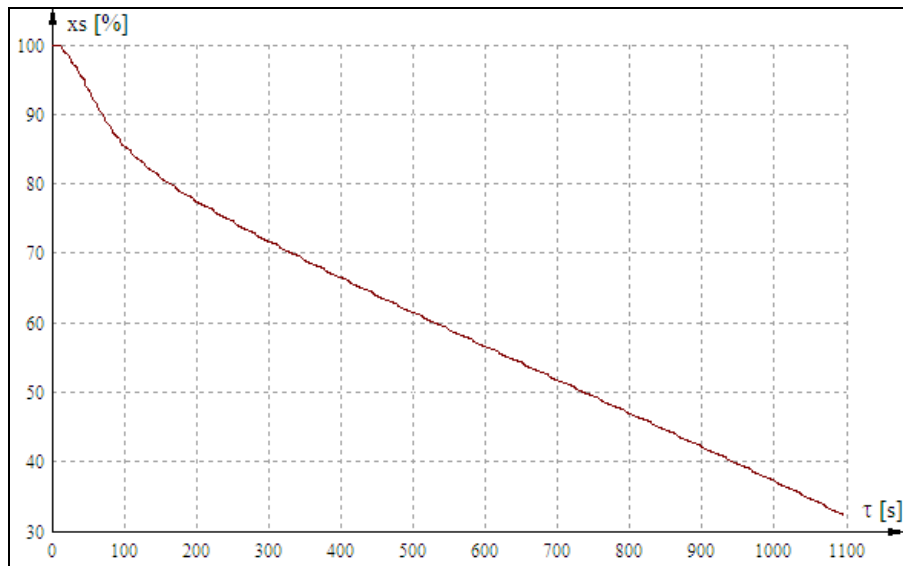


**Fig.7.10.** Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare

Din figura 7.10. se observă ca la aproximativ 4 minute de la contactul oțelului lichid cu cristalizorul viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare se stabilizează, solidificarea respectiv cedarea de căldură decurgând normal.

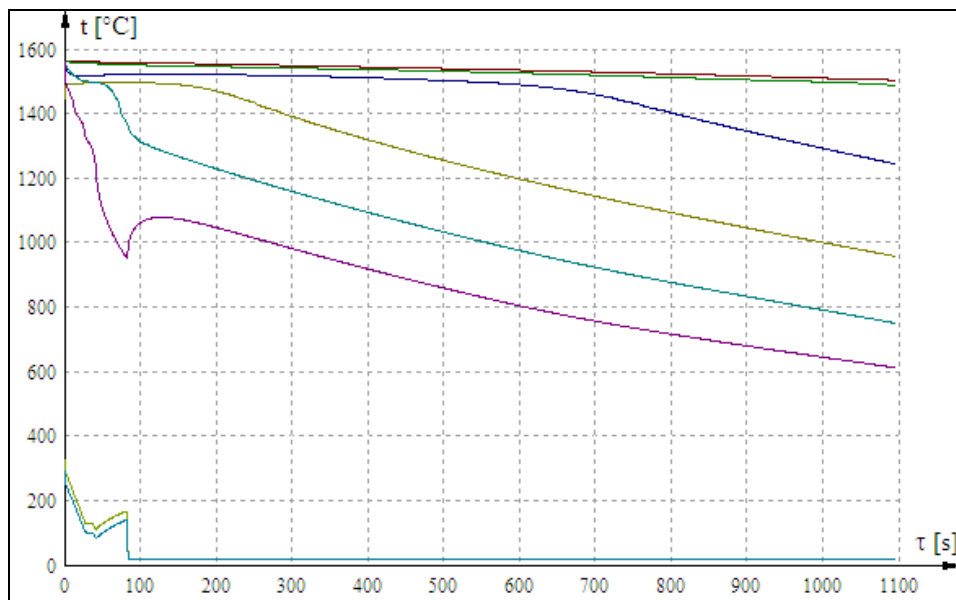
Tot referitor la viteza de variație a razei frontului de solidificare în timp pentru cele câteva cazuri studiate se constată următoarele:

- la adaos de 3% microrăcitori în cristalizor în primele 100 secunde de la turnare se constată o creștere puternică a acesteia, un maxim (0,24%/s) fiind atins după 50 secunde, urmată de o scădere intensă până la 100 secunde, după aproximativ 300 secunde variația menținându-se în limite constante (0,075-0,035)%/s;
- la 1% adaos de microrăcitori viteza de variație a razei frontului de solidificare în timp din punct de vedere grafic arată similar (prezentată în Anexe), cu observația că după 120 secunde limitele de variație se mențin constante, maximum fiind de 0,25%/s, atins după 50 secunde;
- în cazul neadaosului de microrăcitori, maximum vitezei de variație a razei frontului de solidificare este de 0,20%/s, atins după 50 secunde, iar limitele de variație ale acesteia se mențin constante după aproximativ 100 secunde.;
- situația este asemănătoare și în varianta fără adaos de microrăcitori, cu intensificarea puterii disipate la răcirea secundară, cu observația că limita inferioară respectiv superioară au valori sensibil mai mari.



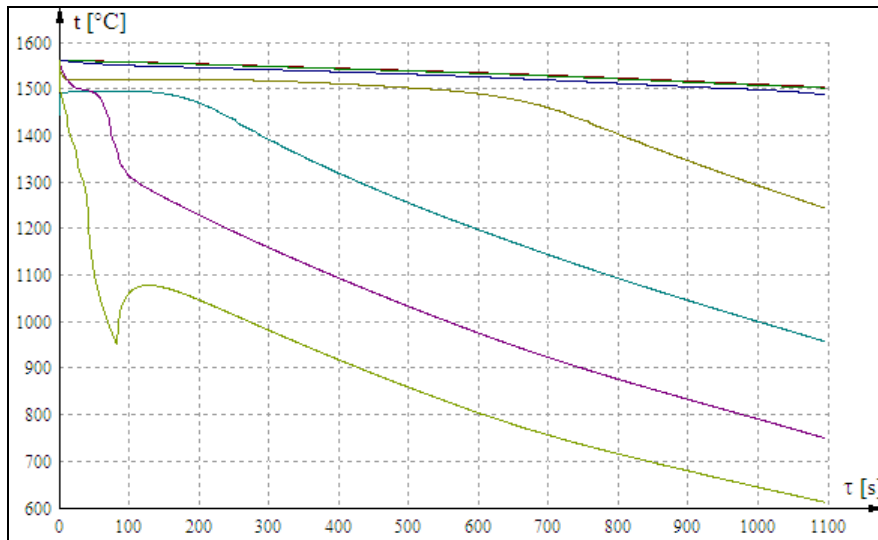
**Fig.7.11.** Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului).

Se observă din figura 7.11. că până la aproximativ 200s are loc o scădere pronunțată a razei relative a frontului de solidificare, situație normală având în vedere contactul direct între crustă și fața cristalizorului, cedarea de căldură are loc în mare parte prin conducție, după care în urma desprinderii crustei de fața cristalizorului, cedarea de căldură are loc prin radiație și se observă o scădere linară a razei relative a frontului de solidificare.



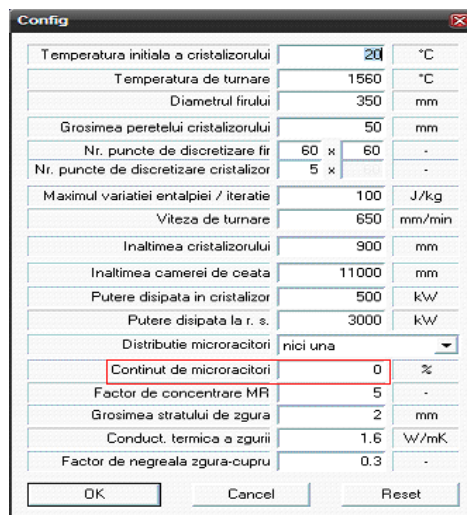
**Fig.7.12.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 50%, 75%, 90% și respectiv 100% din raza firului de turnare, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia(cea mai rece)

Din figura 7.12 și figura 7.13 se constată că în primele 70-80 secunde are loc o scădere pronunțată a temperaturii, perioadă în care se formează crusta, deci se justifică cedarea intensă de căldură. După formarea crustei, ca urmare a contracției, acesta se desprinde de cristalizor, ca urmare are loc o scurtă creștere a temperaturii (pentru aproximativ 40-50 secunde) după care urmează o scădere liniară a acesteia.

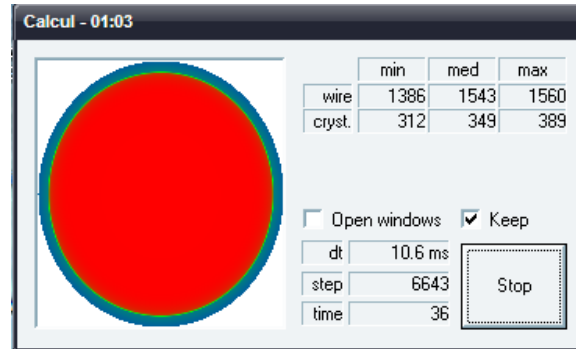


**Fig.7.13.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 10%, 25%, 50% și respectiv 100% din raza firului de turnare.

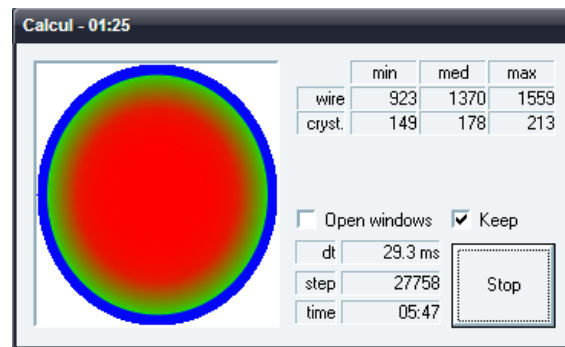
### 7.5.3. Realizarea simulării solidificării țagelilor rotunde turnate continuu fără adaos de microracitori în cristalizor



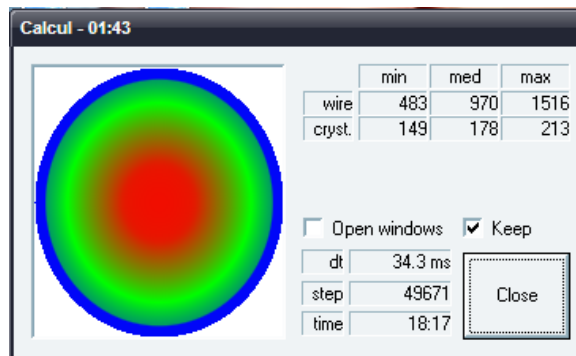
**Fig.7.14.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului



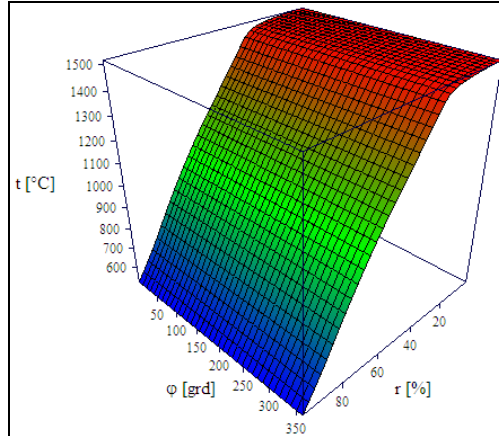
**Fig.7.15.** Fereastra care indică progresul calculilor, la 1:03min timp real, respectiv 36s timp simulat



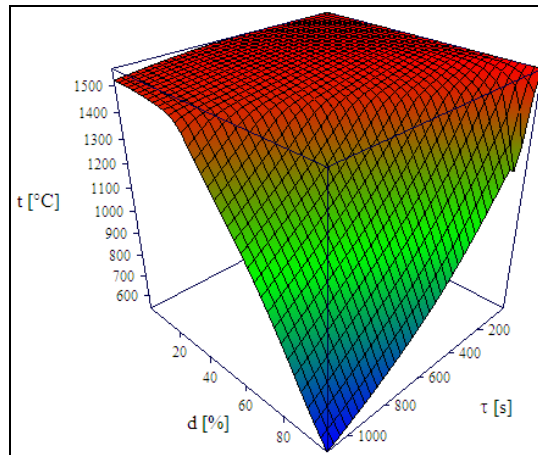
**Fig.7.16.** Fereastra care indică progresul calculilor, la 1:25min timp real, respectiv 5:47min timp simulat



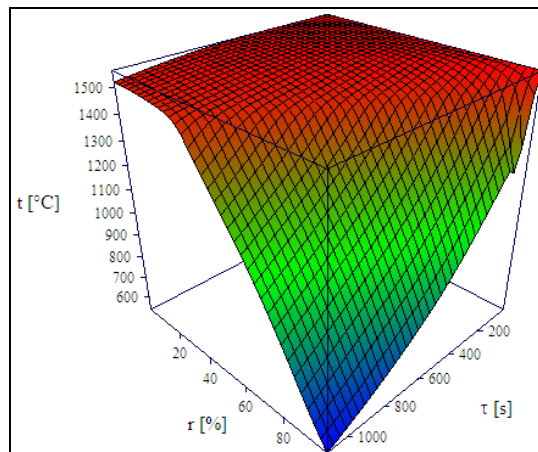
**Fig.7.17.** Fereastra care indică progresul calculilor, la 1:43min timp real, respectiv 18:17min timp simulat



**Fig.7.18.** Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară



**Fig.7.19.** Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata  $d$ . Punctele sunt luate în spirală așa încât  $d$ , raza relativă și  $\varphi/2\pi$  să aibă aceeași valoare



**Fig.7.20.** Temperatura în funcție de raza relativă și timp

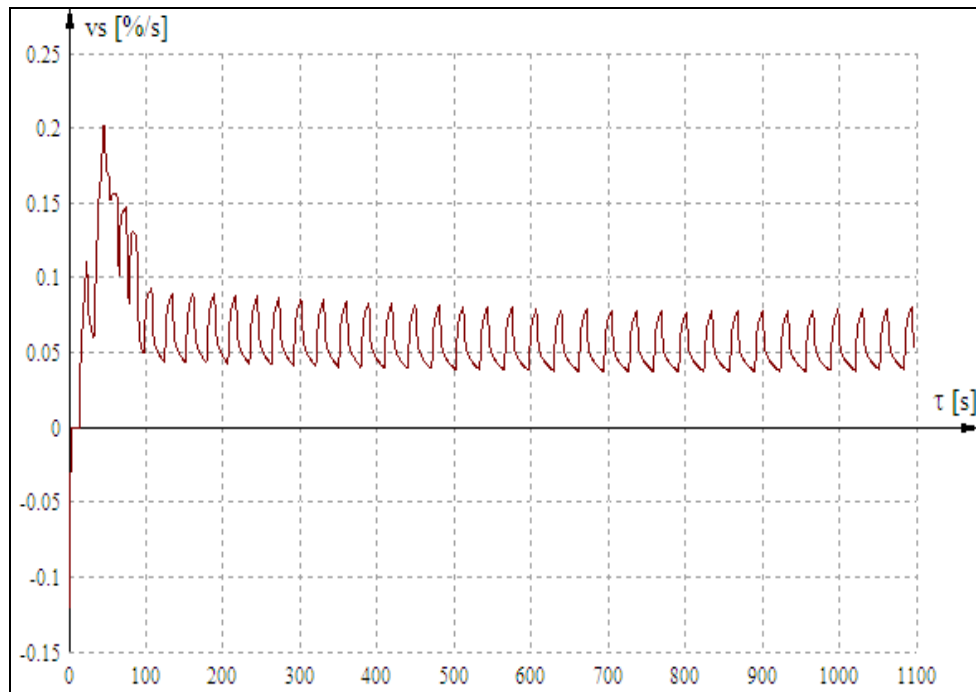


Fig.7.21. Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare

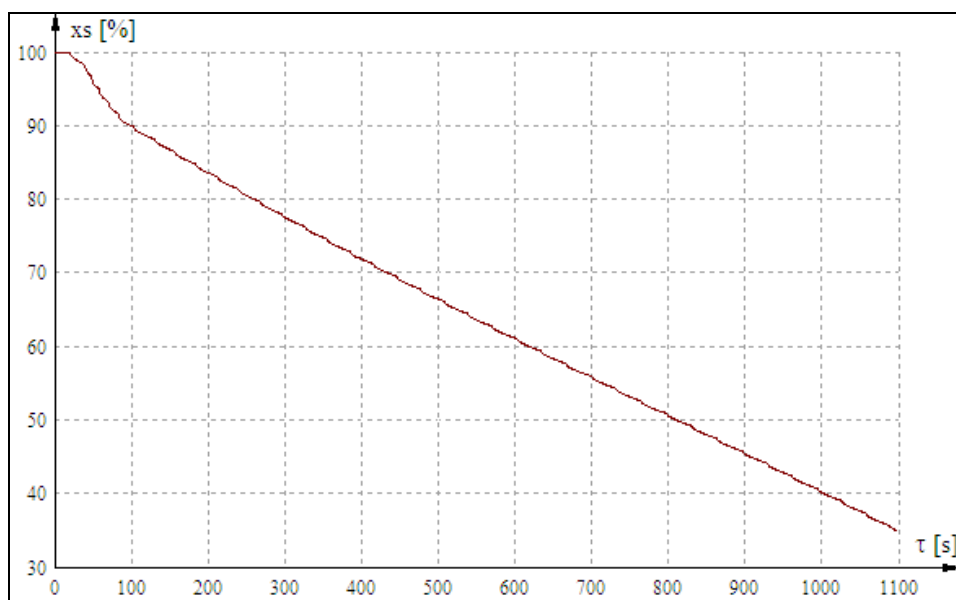
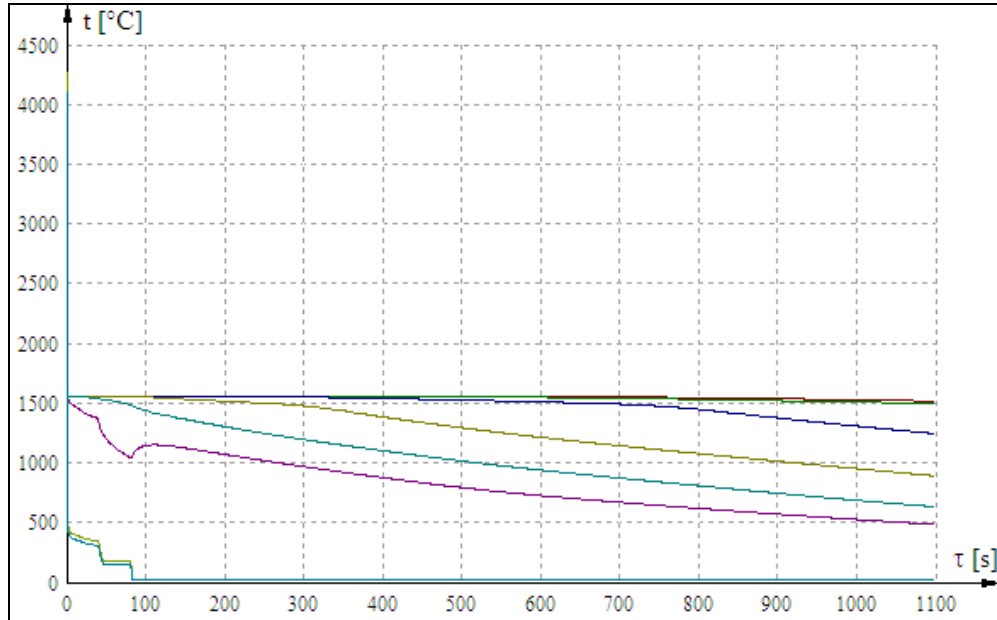
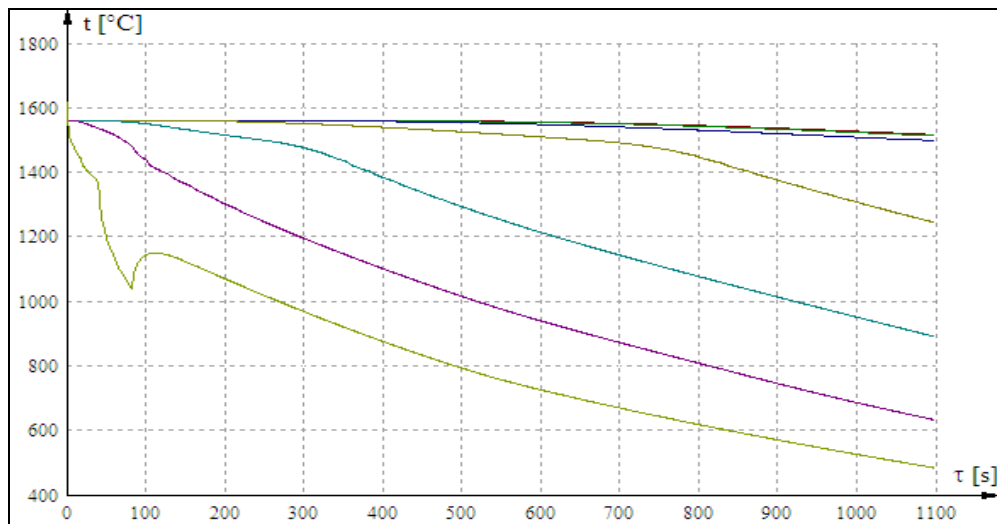


Fig.7.22. Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului)



**Fig.7.23.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 50%, 75%, 90% și respectiv 100% din raza firului de turnare, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia (cea mai rece)



**Fig.7.24.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 10%, 25%, 50% și respectiv 100% din raza firului de turnare

Din analiza comparativă privind variația razei relative a frontului de solidificare se constată următoarele:

- odată cu scăderea adaosului de microrăcitori se reduce și creșterea razei relative a frontului de solidificare, deci se reduce și grosimea crustei

solidificate;

- reducerea razei relative a frontului de solidificare este de circa 1% corelată cu variația adaosului de microrăcitori;
- o intensificare a puterii disipate la răcirea secundară cu aproximativ 33% determină o ușoară creștere a razei relative a frontului de solidificare.

**Tabelul 7.3.** Variația razei relative a frontului de solidificare în funcție de adaosul de microrăcitori

Nr. crt.	Adaos de microrăcitori[%]	Timp [s]	Raza relativă[%]
1.	3	100	15
2.	2	100	13
3.	1	100	12
4.	0	100	11
5.	0	100	12

### 7.5.3. Influența grosimii stratului de praf de lubrifiere asupra variației temperaturii

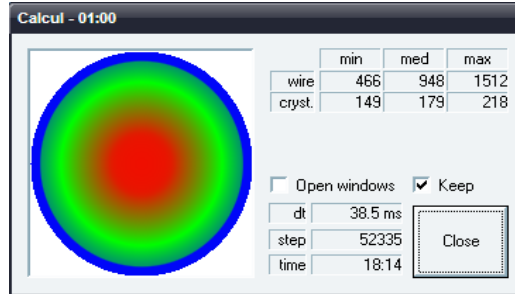
În vederea studiului influenței grosimii stratului de praf de lubrifiere asupra variației temperaturii din diferite zone ale firului turnat continuu, se realizează simulări cu modificarea grosimii acestuia și menținerea neschimbată a celorlalți parametri configurabili ai turnării. Rezultatele obținute sunt prezentate în figurile care urmează:

The image shows a 'Config' dialog box with various simulation parameters. The 'Grosimea stratului de zgura' parameter is highlighted with a red box. The parameters are as follows:

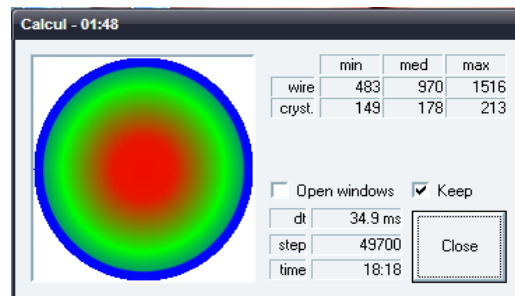
Parametru	Valoare	Unitate
Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1560	°C
Diametrul firului	350	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	60 x 60	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	5 x	-
Maximul variației entalpiei / iteratie	100	J/kg
Viteza de turnare	650	mm/min
Înălțimea cristalizorului	900	mm
Înălțimea camerei de ceata	11000	mm
Putere disipata in cristalizor	500	kW
Putere disipata la r. s.	3000	kW
Distributie microracitori	nici una	-
Continut de microracitori	0	%
Factor de concentrare MR	5	-
Grosimea stratului de zgura	1	mm
Conduct. termica a zgurii	1.6	W/mK
Factor de negreala zgura-cupru	0.3	-

**Fig.7.25.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor

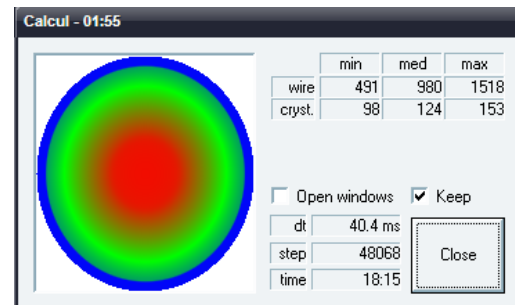




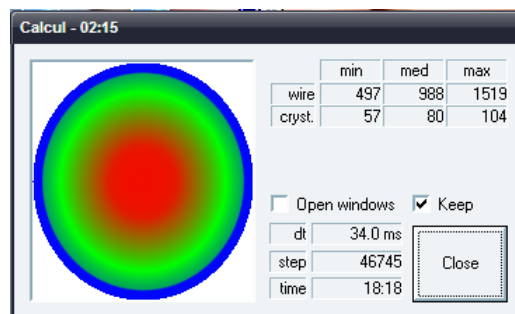
**Fig.7.26.** Fereastra care indică progresul calculului pt. grosimea stratului de zgură de 1mm



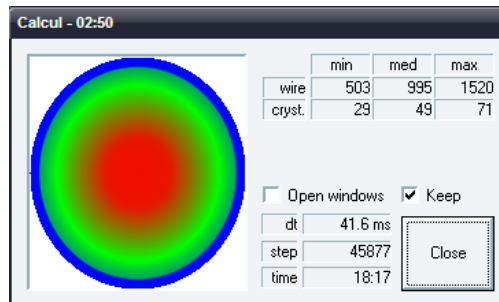
**Fig.7.27.** Fereastra care indică progresul calculului pt. grosimea stratului de zgură de 2mm



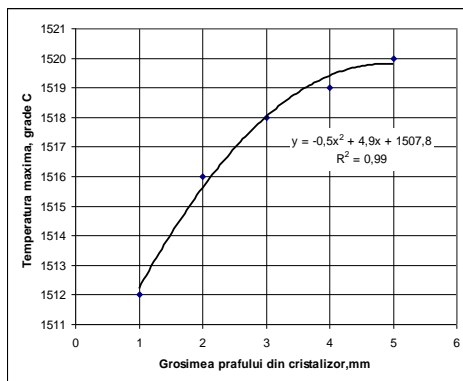
**Fig.7.28.** Fereastra care indică progresul calculului pt. grosimea stratului de zgură de 3mm



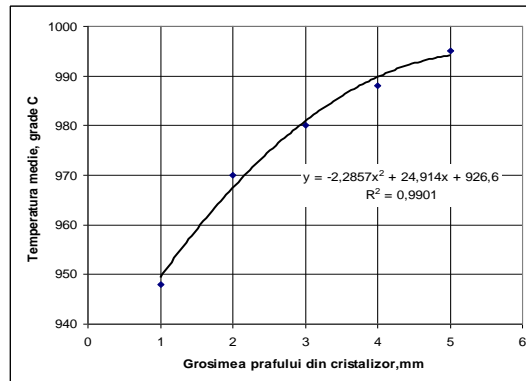
**Fig.7.29.** Fereastra care indică progresul calculului pt. grosimea stratului de zgură de 4mm



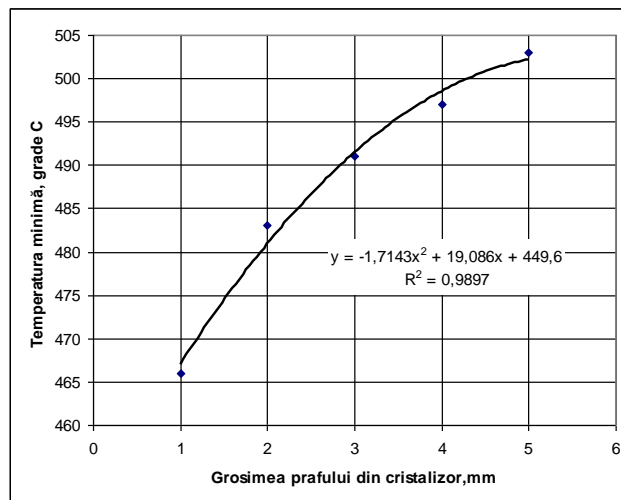
**Fig.7.30.** Fereastra care indică progresul calculului pt. grosimea stratului de zgură de 5mm



a)



b)



c)

**Fig.7.31.** Variația temperaturii firului în funcție de grosimea stratului de praful de lubrifiere  
 a) maximă-centrul firului; b) medie; c) minimă la suprafața firului.

Din simularea efectuată referitor la influența grosimii stratului de praf de lubrifiere asupra variației temperaturii din diferite zone ale firului, se constată că odată cu reducerea grosimii acestuia, temperatura scade, scăderea fiind neliniară, așa cum arată figura 7.31. În practică cunoașterea acestor corelații poate fi aplicată atunci când temperatura oțelului care intră în cristalizor este spre limita superioară admisă, cu condiția de a se asigura lubrifierea corespunzătoare a cristalizorului.

În anexe se prezintă rezultatele simulării cu adaos de microrăcitori cu diametru mediu de 2mm și 1mm pt. adaosuri de 1%, 2% și respectiv 3%. Rezultatele obținute sunt asemănătoare cu cele pt. diametre de 3mm ale microrăcitorilor cu observația că sunt diferențe foarte mici între temperaturile din aceleași zone ale firului. Din punct de vedere a temperaturii maxime în fir se recomandă utilizarea microrăcitorilor cu diametrul mediu cuprins între 2-3mm.

## 7.6. Concluzii

Din datele prezentate în cadrul acestui capitol se pot trage următoarele concluzii:

- prin transformarea ecuațiilor Navier-Stokes exprimate în coordonate carteziene, în coordonate cilindrice se asigură o modelare corectă a procesului de răcire și solidificare a semifabricatelor rotunde turnate continuu;
- pentru modelare și simulare s-au luat în calcul microrăcitori cu diametrul mediu de 1mm, 2mm, 3mm în cantități de 1%, 2% și respectiv 3%;
- modelarea și simularea proceselor referitoare la variația temperaturii oțelului din distribuitor conduc la stabilirea cantității optime de microrăcitori în distribuitor, pentru reglarea temperaturii oțelului lichid în limitele dorite de tehnologi;
- modelarea și simularea proceselor privind variația temperaturii oțelului din cristalizor permit scoaterea în evidență a efectului adaosului de microrăcitori asupra temperaturii oțelului în curs de solidificare;
- în urma interpretării rezultatelor simulării procesului termic din cristalizor pt. un oțel destinat fabricației de țevi se constată că are loc un transfer termic corespunzător (care asigură formarea unei cruste cu grosime suficientă evitării defectelor de suprafață) pt. un adaos de 3% microrăcitori cu diametre de 2-3mm;
- simularea procesului termic din cristalizor permite:
  - cunoașterea variației razei relative a frontului de solidificare (deci și creșterea grosimii crustei marginale);
  - viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare;
  - determinarea variația temperaturii în funcție de timp în puncte situate progresiv de la centrul spre suprafața firului de turnare;
- programul de simulare poate fi utilizat pentru orice marcă de oțel pentru semifabricate rotunde de secțiuni diferite cu condiția reconfigurării parametrilor corespunzători mărcii de oțel și dimensiunii semifabricatului;
- simularea poate contribui la elaborarea unor tehnologii de turnare corespunzătoare prin care să se reducă consumurile specifice de energie și metal pe de o parte iar pe de altă parte ori de câte ori apar anumite neconcordanțe între parametrii tehnologici și calitatea produsului turnat există posibilitatea studierii acestuia prin simulare

- pentru clarificarea acestor cauze;
- prin simulare se pot studia efectele unor factori tehnologici asupra generării defectelor produselor turnate.

În etapa actuală se consideră nu numai util ci și necesar ca fiecare unitate producătoare de semifabricate turnate continuu să dispună și să utilizeze astfel de programe de simulare.



## **PARTEA a III-a**

### **CONCLUZII FINALE RECAPITULATIVE. CONTRIBUȚII ORIGINALE, DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR**

#### **8. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR**

##### **8.1. Concluzii finale recapitulative**

Din studiul literaturii de specialitate și în urma rezultatelor obținute în cadrul cercetărilor experimentale și cele privind modelarea matematică și simularea transferului de căldură la turnarea continuă a semifabricatelor de oțel, se pot formula următoarele concluzii finale:

- 1)** În prezent oțelăriile electrice din România sunt echipate cu cuptoare cu arc electric de tip E.B.T. de capacitate 70 - 100 tone (pe plan mondial capacitatea acestora ajunge până la 340t, consum de energie 358 - 500kWh/t) instalații de procesare secundară în oala de turnare, în majoritatea cazurilor instalații cu aport de căldură - mașini de turnare continuă;
- 2)** Cuptoarele electrice moderne au devenit agregate de topire a fierului vechi și o scurtă perioadă de oxidare a carbonului, restul operațiilor de elaborare fiind transferate în afara cuptorului (respectiv în oala de turnare);
- 3)** Efectele economice care se obțin în urma desfășurării procesului de elaborare - rafinare a oțelului pe ansamblul duplexului metalurgic CAE - LF se reflectă în: reducerea temperaturii de evacuare din agregatul primar de elaborare cu 40-80°C; scurtarea duratelor de elaborare în agregatul primar (cuprinse între 45 - 75 minute, deci în medie 60 minute, respectiv între 42 - 80 minute în instalația LF, fiind influențată de structura secvenței de turnare); micșorarea uzurii și a consumului de materiale refractare cu 10-20%, datorită funcționării cu temperatură mai scăzută; scăderea consumului energetic cu 20-50kWh/t și a celui de electrozi cu 0,1-0,2kg/t;
- 4)** Cantitatea de căldură degajată în acest proces de turnare continuă este dependentă de: parametrii tehnologiei de turnare continuă; proprietățile fizice și chimice ale oțelului; proprietățile fizice și chimice ale prafului de lubrifiere (un praf cu proprietăți de fuzibilitate necorespunzătoare generează frecvent un strat suplimentar de zgură care mărește rezistența de transfer a căldurii dinspre crustă spre peretele cristalizorului);
- 5)** Cunoașterea modului în care are loc transferul de căldură de la oțelul lichid spre cristalizor concomitent cu fenomenul de formare a crustei, este de primă importanță, deoarece acest fenomen are influență majoră asupra

calității semifabricatului și asupra bunei funcționări a mașinii de turnare continuă;

- 6) Pe baza modelelor studiate până în prezent de către mai mulți cercetători, se poate afirma că transferul de căldură din cristalizor este descris destul de bine din punct de vedere tehnologic, dacă într-o secțiune verticală se acceptă o stare de echilibru, cu o variație a temperaturii în planul XZ, având în partea superioară o conductivitate constantă,
- 7) Procesul de solidificare a oțelului în cristalizor, s-a studiat și se studiază în continuare prin elaborarea de modele matematice și în mod deosebit prin aplicarea programelor de simulare, o atenție deosebită acordându-se semifabricatelor cu secțiune rotundă;
- 8) Pentru elaborarea unui model matematic care să descrie procesul de solidificare în timpul turnării continue la MTC, au fost utilizate următoarele ipoteze de lucru: procesul de turnare continuă este în stare de echilibru; semifabricatul este simetric; energia evacuată în procesul de frecare internă în lichid este neglijabilă; suprafața liberă a lichidului (zona de sus a cristalizorului) este acoperită cu un strat de protecție (zgură), prin care se presupune că pierderea de căldură este zero.
- 9) Rezolvarea ecuației modelului de transfer de căldură folosind condițiile la limită a fost abordat folosindu-se mai multe metode: integrala de profil; diferențele finite explicite; diferențele finite implicite etc.
- 10) Repartizarea fluxului de căldură transferat din cristalizor, este dependent de viteza de turnare și de poziția în cristalizor a zonei analizate aflate în curs de solidificare, cea mai mare cantitate de căldură fiind evacuată în intervalul 90 – 150 mm din lungimea cristalizorului, începând cu nivelul de turnare (acesta fiind considerat la un grad de umplere a cristalizorului de 80 – 85%);
- 11) În zona de răcire secundară (sub cristalizor) fluxul de căldură de la suprafața semifabricatului turnat continuu este evacuat în apa de stropire pulverizată între rolele de sprijin prin duzele de pulverizare;
- 12) O prelungire a duratei topirii conduce la o creștere a consumului de energie electrică corespunzător unei corelații exprimate analitic și grafic;
- 13) Compoziția chimică a oțelului la terminarea topirii variază în limite acceptabile cu excepția conținutului de carbon, variație determinată de regimul suflării oxigenului la topire și afinare;
- 14) La terminarea tratamentului în instalația L. F. temperatura variază în limite normale  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  de la șarjă la șarjă, variație determinată de valoarea temperaturii liquidus și de modul cum decurge turnarea secvențială;
- 15) Între viteza de turnare și temperatura de turnare a existat o bună corespondență, fapt dovedit prin corelația exprimată grafic și analitic între acești parametri;
- 16) Corelația dintre viteza de turnare și parametrii răcirii primare și secundare sunt reprezentative atât din punct de vedere a coeficienților de corelație cât și a sensului tehnologic;
- 17) Metoda suprafețelor de răspuns asigură obținerea elementului final dorit (modelul optim) fără erori și totodată într-un timp de calcul cât mai mic, independent de resursele hardware pe care se face procesarea;
- 18) Pentru obținerea rezultatelor experimentale în observațiile designului central stabilit coeficienții suprafeței de răspuns au fost calculați cu ajutorul softului de analiza dispersională Minitab v.17 iar parametrii care minimizează suprafața de răspuns au fost calculați cu ajutorul unui

program realizat în Mathcad14.

- 19) Din analiza factorilor care determină apariția defectelor țagtelor pentru țevi turnate continuu, rezultă că ponderea maximă o dețin, atât parametrii de turnare precum și compoziția chimică și gradul de puritate al oțelului, astfel încât pentru evitarea procesului de generare a defectelor, pe parcursul întregii durate a turnării continue, trebuie sincronizați un număr mare de factori tehnologici;
- 20) Prin transformarea ecuațiilor Navier-Stokes exprimate în coordonate carteziane, în coordonate cilindrice se asigură o modelare corectă a procesului de răcire și solidificare a semifabricatelor rotunde turnate continuu;
- 21) Pentru procesele de modelare și simulare s-au luat în calcul adaosul în oțelul lichid din cristalizor a microrăcitorilor cu diametrul mediu de 1mm, 2mm, 3mm în cantități de 1%, 2% respectiv 3%;
- 22) Programul de simulare TCR-HD14 (elaborat pentru semifabricate cu secțiuni rotundă cu diametru de 350mm, destinate fabricării țevilor), poate fi utilizat pentru orice marcă de oțel pentru semifabricate rotunde de secțiuni diferite, cu condiția reconfigurării parametrilor corespunzători mărcii de oțel și dimensiunii semifabricatului;
- 23) Simularea poate contribui la elaborarea unor tehnologii de turnare corespunzătoare prin care să se reducă consumurile specifice de energie și metal pe de o parte, iar pe de altă parte, ori de câte ori apar anumite neconcordanțe între parametrii tehnologici și calitatea produsului turnat, există posibilitatea studierii acestuia prin simulare pentru clarificarea acestor cauze.

## 8.2. Contribuții originale

Pe baza studiului literaturii de specialitate, experimentărilor industriale și a tehnicii de calcul moderne consider că mi-am adus la această lucrare următoarele contribuții originale:

- 1) Stabilirea planului de cercetare pe baza literaturii de specialitate și a posibilităților de efectuare a experimentărilor industriale;
- 2) Elaborarea pe baza studiului de specialitate a unei sinteze privind procesul de elaborare și turnare continuă sub formă de semifabricate în oțelării moderne, respectiv echipate cu cuptoare cu arc electric (tip EBT), instalații de procesare secundară în oala de turnare (LF) și mașini de turnare continuă (MTC);
- 3) Prezentarea unei sinteze privind stadiul actual al cercetărilor privind regimul termic la turnarea continuă a oțelului sub formă de semifabricate cu secțiuni rotundă și poligonală;
- 4) Analiza la nivel industrial a regimului termic la procesul de elaborare și turnare a oțelului la o oțelărie electrică, într-un cuptor cu arc electric de capacitate 100 tone, procesat prin metalurgia secundară într-o instalație LF, turnat continuu pe o MTC cu 5 fire sub formă de semifabricate cu secțiune circulară;
- 5) Stabilirea unor corelații între principalii parametri ai turnării continue și anume: temperatura de turnare, viteza de turnare și parametrii răcirii primare și secundare;
- 6) Optimizarea transferului de caldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire utilizând metoda suprafeței de



raspuns;

- 7) Optimizarea transferului de căldură din distribuitor, în funcție de grosimea stratului de praf de acoperire și de temperatura liquidus a oțelului;
- 8) Analiza defectelor cauzate de regimul termic pe fluxul distribuitor-cristalizor - răcire secundară la semifabricatele cu secțiune circulară;
- 9) Modelul matematic al procesului de răcire și solidificare a semifabricatelor cu secțiune circulară turnate continuu;
- 10) Programul de simulare TCR-HD14 a răcirii și solidificării la nivel de cristalizor, pentru turnarea continuă a semifabricatelor de oțel cu secțiune rotundă, turnat cu adaos de microrăcitori;
- 11) Analiza rezultatelor obținute la aplicarea programului de simulare (TCR-HD14) la turnarea continuă a semifabricatului cu secțiune rotundă (diametru 350mm) cu adaos de microrăcitori (1%, 2% și 3% și diametru microrăcitori 1mm, 2mm și 3mm).

### 8.3. Direcții de continuare a cercetărilor

Pe baza cercetărilor și experimentărilor industriale efectuate consider că cercetările pot fi continuate în următoarele direcții:

- 1) Creșterea calității încărcăturii metalice pentru oțelurile destinate producerii țevilor;
- 2) Reducerea pierderilor de căldură a oțelului lichid pe fluxul LF – distribuitor – cristalizor prin optimizarea secvențelor de turnare;
- 3) Stabilirea unor corelații între parametrii de elaborare și turnare continuă (cu adaos de microrăcitori) a semifabricatelor cu secțiune circulară, destinate fabricației țevilor, cu parametrii calitativi ai acestora (caracteristici fizico-mecanice și de structură), respectiv între acești parametrii calitativi și cei ai produsului finit (inclusiv analiza defectelor de fabricație).

**DISEMINAREA REZULTATELOR**

1. L. Pascu, A. Putan, V. Putan, A. Lăscuțoni, Analysis on the similarity between steel ladles and hot-water models regarding natural convection phenomena, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Kos, Greece, 19-25 September, 2012, AIP Conference Proceedings , Volume 1479, p.767-770, ISI Proceedings.
2. Lăscuțoni, A., Ardelean, E., Pascu, L., Heput, T., Mathematical model regarding at addition of microcoolers in tundish of continuous casting machines, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Rhodos, Greece, Sep.21-27, 2013, AIP Conference Proceedings , Volume 1558, pp.1333-1336.
3. Lăscuțoni, A., Ardelean, E., Socalici, A., Ardelean, M., Mathematical modeling of micro-coolers added in the continuous casting tundish, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Rhodos, Greece, Sep.21-27, 2013, AIP Conference Proceedings, Volume 1558, pp.1603-1606.
4. Lăscuțoni, A., Ardelean, E., Heput, T., Optimization of heat transfer on distributor, depending on the thickness of powder coating using surface answer method, Annals of Faculty Engineering Hunedoara, Tom XII, Fascicule 3, August 2014, pp.303-306, accredited and ranked in the B+ category by CNCISIS.
5. Lăscuțoni, A., Ardelean, E., Heput, T., Thermal Optimization Of Steel At Continuous Casting, 12th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Mathematical Methods in Economics and Engineering, Rhodes, Greece, 22-28 September 2014, (in curs de indexare ISI Proc.; conferintele anterioare indexate: ICNAAM 2013 -600 lucr., 2012 -578 lucr., 2011 -491 lucr.).
6. Popa, E., Pascu, L., Socalici, A., Lăscuțoni, A., Industrial research on the quality of brake shoes meant for rolling stock, International Conference on Applied Sciences ICAS 2014, Hunedoara, 2-4 october 2014, (in curs de indexare ISI Proc.; conferintele anterioare indexate: ICAS 2013 - 43 lucr.).
7. Ardelean, E., Ardelean, M., Heput, T., Lăscuțoni, A., Technological aspects at continuous casting of semi-finished products with  $\Phi 270\text{mm}$ , International Conference on Applied Sciences ICAS 2014, Hunedoara, 2-4 october 2014, (in curs de indexare ISI Proc.; conferintele anterioare indexate: ICAS 2013 - 43 lucr.).
8. Lăscuțoni, A., Steel thermal stratification during stationary period in ladle, Acta Tehnica Corviniensis – Buletin of Engineering Hunedoara, Tom VII, Fascicule 4, October-December 2014, pp.153-158, accredited and ranked in the B+ category by CNCISIS.
9. Lăscuțoni, A., Ardelean, E., A study of steel thermal regime in the continuous casting tundish, Annals of Faculty Engineering Hunedoara, Tom XII, Fascicule 4, November 2014, pp.173-177, accredited and ranked in the B+ category by CNCISIS.



# **ANEXE**

**Fișierul MetalData.h**

```

////////////////////////////////////
// MetalData.h - header file

#ifndef __METAL_DATA_H
#define __METAL_DATA_H

#include "HeatFlow.h"
#include "SequenceInterpolator.h"

typedef BOOL (*ProgressCallback)(LPVOID, HeatFlow*);

////////////////////////////////////
//class MetalData
class MetalData {
    friend class HeatFlow;
    friend class SequenceInterpolator;
    friend class CProgressDialog;
    friend class CMetalDialog;

public: //antetul fisierului
    LPCTSTR fileSignature; //semnatura fisierului
    int headerSize, seqSize; //dimensiunea headerului si a secventei
    int nwir; //nr. puncte fir
    int ncry; //nr. puncte cristalizor
    int mwir; //nr. puncte radiale
    double tini; //temp. de turnare
    double tcryini; //temp. initiala a cristalizorului
    double wirX; //raza firului
    double cryThick; //grosimea peretelui cristalizorului
    double flowSpeed; //viteza firului
    double cryLength; //lungime cristalizor
    double fogLength; //lungime camera ceata
    double cryPt, fogPt; //puteri in crist. si RS
    BOOL fogImmediate; //ignora cristalizorul (numai pt. depanare)
    double max_dh; //maximul variatiei entalpiei (fir)
    double fillfactor; //factor de umplere cu microracitori
    int filltype; //tip distributie microracitori
    double fillconc; //factor de concentrare microracitori
    double dmic; //diametru microracitori

    Material matSteel, matCopper; //caracteristicile otelului si cuprului
    double max_time; //durata totala
    int steps; //nr. de pasi
    int fogSequence; //prima iteratie dupa stripare

    double dzg; //grosime strat zgura
    double lambdaZg; //conduct. termica zgura
    double epsilon; //grad negreala echivalent zgura-cupru

private: //date de uz intern

```

```

DataFile data;           //fisiarul de date
LPVOID progress_callback_param;
ProgressCallback progressCallback;
int iterations;
BOOL calcFogged;
FloatBuffer timeBuffer;
float currentTime;
int currentTimeStep;
SequenceInterpolator *seqInt1, *seqInt2;
BOOL candraw, fileIsTemp;
double cry_pos; // 0...1 in cristalizor

private: //functii de uz intern
BOOL shouldFog(HeatFlow *hfc);
BOOL shouldAir(HeatFlow *hfc);
BOOL inWire(int i, int j);
BOOL inCrystallizer(int i, int j);
void seekSequence(int nseq);
void seekTime(float time);
void clearInterpolators();
int calculateSeqSize();

public: //constructor & destructor
MetalData();
~MetalData();

public: //functii publice
void close();
void assign(LPCTSTR filename);
void open();
BOOL isOpen() {return data.isOpen();}
CString getFileName() {return data.getName();}
static void defaults(MetalData *target);
BOOL writeHeader(DataFile *df = NULL);
BOOL readHeader(DataFile *df = NULL);
BOOL isTemp() {return fileIsTemp;}
BOOL copy(LPCTSTR name);
void setProgressCallback(
    ProgressCallback pc = NULL, LPVOID param = NULL);
void calculate();
BOOL canDraw() {return candraw;}
double cryHeatFlow();
double wirHeatFlow();
float getFogTime();
float getValue(float x, float y, float time);
float getValueWire(float x, float y, float time);
float findTemperatureX(float th, float time);
float findSolidusX(float time);
int getProgressPercent();
};

```

```
MetalData *getMD();
```

```
#endif//__METAL_DATA_H
```

### **Fişierul MetalData.cpp**

```
////////////////////////////////////  
// MetalData.cpp - implementation file
```

```
#include "stdafx.h"  
#include "Headers.h"
```

```
MetalData metalData;  
MetalData *getMD() {return &metalData;}
```

```
MetalData::MetalData() {  
    fileSignature= "MetalData";  
    defaults(this);  
    calcFogged = FALSE;  
    progressCallback = NULL;  
    seqInt1 = seqInt2 = NULL;  
    candraw = fileIsTemp = FALSE;  
    fogSequence = -1;  
}  
MetalData::~MetalData() {  
    close();  
    if (fileIsTemp) data.remove();  
}  
#define XF 0.17  
#define KF 0.1  
void MetalData::defaults(MetalData *target) {  
    target->nwir = 30; target->mwir = 120;  
    target->ncry = 5;  
    target->tini = 1600;  
    target->tcryini = 20;  
    target->wirX = 0.175;  
    target->cryThick = 0.05;  
    target->flowSpeed = 0.8 / 60; //[m/s]  
    target->cryLength = 0.9;    //[m]  
    target->fogLength = 2;    //[m]  
    target->cryPt = 2090000 * XF; //[W]  
    target->fogPt = 2856000 * XF; //[W]  
    target->fillfactor = 0.03;  
    target->filltype = FILLTYPE_URANDOM;  
    target->fillconc = 0.2;  
    target->dmic = 0.003; //m  
  
    target->dzg = 2 / 1000.0; //m  
    target->lambdazg = 1.6; //W/mK  
    target->epsilon = 0.3; //-  
  
    target->matSteel.defaults(MATERIAL_OLC45);
```

```

target->matCopper.defaults(MATERIAL_COPPER);
target->fogImmediate = FALSE;

target->max_dh = 100;
target->max_time = target->steps = target->cry_pos = 0;
}
void MetalData::close() {
    if (data.canWrite()) writeHeader();
    candraw = FALSE;
    clearInterpolators();
    data.close();
}
void MetalData::assign(LPCTSTR filename) {
    fileIsTemp = !filename;
    data.assign(filename);
}
BOOL MetalData::writeHeader(DataFile *df) {
    bool full = (df == NULL);
    if (full) df = &(MetalData::data);
    if (!df->isOpen()) df->openCreate();
    if (!df->isOpen()) return FALSE;
    df->seek(0);
    df->writeString(fileSignature);
    long sizepos = df->tell();
    df->writeInt(0); //aici va fi dimensiunea headerului
    seqSize = calculateSeqSize();
    df->writeInt(seqSize);
    df->writeInt(nwir); df->writeInt(mwir);
    df->writeInt(ncry);
    df->writeDouble(tini);
    df->writeDouble(tcryini);
    df->writeDouble(wirX);
    df->writeDouble(cryThick);
    df->writeDouble(flowSpeed);
    df->writeDouble(cryLength);
    df->writeDouble(fogLength);
    df->writeDouble(cryPt);
    df->writeDouble(fogPt);
    df->writeDouble(fillfactor);
    df->writeInt(filltype);
    df->writeDouble(fillconc);
    df->writeDouble(dmic);

    df->writeDouble(dzg);
    df->writeDouble(lambdazg);
    df->writeDouble(epsilon);

    df->writeDouble(max_dh);
    df->writeDouble(full ? max_time : 0);
    df->writeInt(full ? steps : 0);
    df->writeInt(full ? fogSequence : -1);
}

```



```

    matSteel.writeToFile(df);
    matCopper.writeToFile(df);
    headerSize = df->tell();
    df->seek(sizepos);
    df->writeInt(headerSize);
    df->seek(headerSize);
    df->flush(); return TRUE;
}
BOOL MetalData::readHeader(DataFile *df) {
    if (!df) df = &(MetalData::data);
    if (!df->isOpen()) df->openRead();
    if (!df->isOpen()) return FALSE;
    df->seek(0);
    CString signature = df->readString();
    if (signature != fileSignature) return FALSE;
    headerSize = df->readInt(); seqSize = df->readInt();
    nwir = df->readInt(); mwir = df->readInt();
    ncry = df->readInt();
    tini = df->readDouble();
    tcryini = df->readDouble();
    wirX = df->readDouble();
    cryThick = df->readDouble();
    flowSpeed = df->readDouble();
    cryLength = df->readDouble();
    fogLength = df->readDouble();
    cryPt = df->readDouble();
    fogPt = df->readDouble();
    fillfactor = df->readDouble();
    filltype = df->readInt();
    fillconc = df->readDouble();
    dmic = df->readDouble();

    dzg = df->readDouble();
    lambdazg = df->readDouble();
    epsilon = df->readDouble();

    max_dh = df->readDouble();
    max_time = df->readDouble();
    steps = df->readInt();
    fogSequence = df->readInt();
    matSteel.readFromFile(df);
    matCopper.readFromFile(df);
    if ((headerSize != df->tell()) ||
        (seqSize != calculateSeqSize()) ||
        (df->size() != headerSize + seqSize*steps)) {
        candraw = FALSE;
        df->close(); return FALSE;
    }
    candraw = (steps > 5);
    return TRUE;
}

```

```

void MetalData::setProgressCallback(
    ProgressCallback pc, LPVOID param) {
    progressCallback = pc;
    progress_callback_param = param;
}
void MetalData::open() {
    close();
    data.openRead(); if (!data.isOpen()) return;
    if (!readHeader()) {data.close(); return;}
    timeBuffer.empty(); timeBuffer.setSize(steps);
    int k;
    for (k = 0; k < steps; k++) {
        data.seek(headerSize + k*seqSize);
        timeBuffer[k] = data.readDouble();
    }
}
void MetalData::clearInterpolators() {
    currentTime = -1; currentTimeStep = -1;
    DEL(seqInt1); DEL(seqInt2);
}
void MetalData::seekTime(float time) {
    if (time == currentTime) return;
    int ts = timeBuffer.binarySearch(time);
    if (ts == currentTimeStep) return;
    clearInterpolators();
    seqInt1 = new SequenceInterpolator(this, ts);
    seqInt2 = new SequenceInterpolator(this, ts+1);
    currentTimeStep = ts;
}
BOOL MetalData::shouldFog(HeatFlow *hfc) {
    if (!hfc) return FALSE;
    return fogImmediate || (hfc->time * flowSpeed > cryLength);
}
BOOL MetalData::shouldAir(HeatFlow *hfc) {
    if (!hfc) return FALSE;
    return (hfc->time * flowSpeed <= cryLength / 2);
}
BOOL MetalData::inWire(int i, int j) {
    return i < nwir;
}
BOOL MetalData::inCrystallizer(int i, int j) {
    return (i >= nwir) && (i < nwir + ncry);
}
int MetalData::calculateSeqSize() {
    return 7*sizeof(double) + 2*sizeof(int) +
        (nwir+ncry)*mwir*sizeof(float);
}
void MetalData::seekSequence(int nseq) {
    data.seek(headerSize + nseq*seqSize);
}
BOOL MetalData::copy(LPCTSTR name) {

```

```

    close();
    return data.copy(name);
}
void MetalData::calculate() {
    iterations = 0; fogSequence = -1;
    candraw = FALSE; clearInterpolators();
    close(); if (fileIsTemp) data.remove();
    data.assign(NULL); data.openCreate();
    fileIsTemp = TRUE;
    writeHeader();
    HeatFlow *oldhfc, *hfc;
    hfc = new HeatFlow(this, NULL);
    if (progressCallback) {
        hfc->init(); Sleep(500);
        progressCallback(progress_callback_param, hfc);
    }
    hfc->calculate(); hfc->writeToFile();
    if (progressCallback) {
        if (!progressCallback(progress_callback_param, hfc)) {
            return;
        }
    }
    oldhfc = hfc;
    double savedTime = 0;
    BOOL cont = TRUE; steps = 1;
    for (; cont; iterations++) {
        hfc = new HeatFlow(this, oldhfc);
        hfc->calculate();
        if (hfc->time - savedTime > 1) {
            steps++;
            hfc->writeToFile();
            max_time = savedTime = hfc->time;
            cry_pos = max_time * flowSpeed / cryLength;
            cont = (hfc->time * flowSpeed < cryLength + fogLength);
            if (progressCallback) {
                if (!progressCallback(
                    progress_callback_param, hfc)) {
                    cont = FALSE;
                }
            }
        }
    }
    delete oldhfc; oldhfc = hfc;
}
delete hfc;
open();
if (progressCallback) {
    progressCallback(progress_callback_param, NULL);
}
}
float MetalData::getFogTime() {
    return cryLength / flowSpeed;
}

```

```

}
double MetalData::cryHeatFlow() {
    double p = cryPt / (cryLength * M_2_PI * (wirX + cryThick));
    return (1 + KF * (1 - 2 * cry_pos)) * p;
}
double MetalData::wirHeatFlow() {
    if (cry_pos > 1) return fogPt / (fogLength * M_2_PI * wirX);
    else return cryHeatFlow();
}

float MetalData::getValue(float x, float y, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    float th1 = seqInt1->get(x, y), th2 = seqInt2->get(x, y);
    float t1 = timeBuffer[currentTimeStep];
    float t2 = timeBuffer[currentTimeStep+1];
    return ((time - t1)*th2 + (t2 - time)*th1)/(t2 - t1);
}
float MetalData::getValueWire(float x, float y, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    if (y == 1) y = 0.99;
    float th1 = seqInt1->getWire1(x, y);
    float th2 = seqInt2->getWire1(x, y);
    float t1 = timeBuffer[currentTimeStep];
    float t2 = timeBuffer[currentTimeStep+1];
    return ((time - t1)*th2 + (t2 - time)*th1)/(t2 - t1);
}
float MetalData::findTemperatureX(float th, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    float a, b, c;
    float ta, tb, tc;
    a = 0; b = wirX;
    ta = getValue(a, 0, time);
    tb = getValue(b, 0, time);
    if (th > ta) return 0; if (th < tb) return 1;
    c = (a + b) / 2; tc = getValue(c, 0, time);
    do {
        if (th > tc) {b = c; tb = tc;}
        else {a = c; ta = tc;}
        c = (a + b) / 2;
        tc = getValue(c, 0, time);
    } while ((c != a) && (c != b));
    return c / wirX;
}
float MetalData::findSolidusX(float time) {
    return findTemperatureX(matSteel.solidus(), time);
}
int MetalData::getProgressPercent() {
    return round(100 * max_time

```

```
    / ((cryLength + fogLength) / flowSpeed));
}
```

### **Fișierul StdAfx.h**

```

////////////////////////////////////
// stdafx.h
//
#ifndef __STDAFX_H
#define __STDAFX_H

// Windows XP
#define WINVER 0x0501
#define _WIN32_WINNT 0x0501

#if _MSC_VER > 1000
#pragma once
#endif // _MSC_VER > 1000

#define VC_EXTRALEAN // Exclude rarely-used stuff from Windows headers

#include <afxwin.h>
#include <afxext.h>
#include <afxdtctl.h>
#ifndef _AFX_NO_AFXCMN_SUPPORT
#include <afxcmn.h>
#endif // _AFX_NO_AFXCMN_SUPPORT

#pragma pack (4)
#pragma warning (disable: 4244 4305)
#include <stdio.h>
#include <io.h>
#include <math.h>
#include <float.h>

//Constante matematice
#define INFINITY (DBL_MAX+DBL_MAX)
#define NAN (INFINITY-INFINITY)
#define M_PI 3.141592653589793238
#define M_PI_2 1.570796326794896619
#define M_2_PI 6.283185307179586477
#define M_PI_180 0.017453292519943296
#define M_180_PI 57.29577951308232088
#define M_E 2.718281828459045235
#define M_1_E 0.367879441171442322

//Constante fizice
#define J_KCAL 4185.5 //transformarea kcal -> J
#define STEFAN_BOLTZMANN 5.66961E-8 //constanta Stefan-Boltzmann
#define KELVIN 273.16

#define DEL(x) if (x) {delete x; x = NULL;}

```

```

#define MIN(x, y) ((x < y) ? (x) : (y))
#define MAX(x, y) ((x > y) ? (x) : (y))
#define BRIGHT

void error(int code);
#define CHKNEW(expression) if (!(expression)) error(1)

#define FILLTYPE_NONE 0
#define FILLTYPE_UNIFORM 1
#define FILLTYPE_RANDOM 2
#define FILLTYPE_URANDOM 3

// #define LOGFILE "e:\\tcr.log"
// #define MDF_RESET // to ignore saved config

#define SIMPLE_WIDTH 600
#define SIMPLE_HEIGHT 400
#define GL_WIDTH 600
#define GL_HEIGHT 500

#endif // __STDAFX_H

Fişierul Material.h
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// Material.h - header file

#ifndef __MATERIAL_H
#define __MATERIAL_H
#define MATERIAL_COPPER 0
#define MATERIAL_OLC45 1

class Material {
    int type;
    double a, b, c, tpr; //pt. lambda
    double lpr, tpr2, tpr3, fipr; //pt. accelerarea calculelor lambda
    FloatBuffer ht, hh; //entalpia prin puncte
    double _ro; //densitatea
    double tsol, tlich; //solidus & lichidus
    void precalc();
public:
    Material();
    Material(Material& mat);
    void clone(Material *mat);
    void defaults(int type = MATERIAL_OLC45);
    void writeToFile(DataFile* df);
    void readFromFile(DataFile* df);

    double ro() {return _ro;}
    double lambda_0() {return c;}
    double solidus() {return tsol;}
    double lichidus() {return tlich;}

```

```

    double lambda_t(double t);
    double fi_t(double t);
    double t_fi(double fi);
    double h_t(double t);
    double t_h(double h);
};

```

```
#endif//__MATERIAL_H
```

### Fişierul Material.cpp

```

////////////////////////////////////
// Material.cpp - implementation file

```

```

#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"

```

```

Material::Material() {
    defaults();
}
Material::Material(Material& mat) {
    mat.clone(this);
}
void Material::clone(Material *mat) {
    mat->_ro = _ro;
    mat->a = a; mat->b = b; mat->c = c;
    mat->tpr = tpr;
    mat->tsol = tsol; mat->tlich = tlich;
    mat->ht.fromFloatBuffer(ht);
    mat->hh.fromFloatBuffer(hh);
    mat->precalc();
}
void Material::defaults(int type) {
    Material::type = type;
    switch (type) {
    case MATERIAL_COPPER:
        a = b = 0;
        c = 393.86;
        tpr = 9999;
        ht.fromString("0 100");
        hh.fromString("0 38550");
        _ro = 8960;
        tsol = tlich = 0;
        break;
    case MATERIAL_OLC45:
        //coeficientii pentru calculul conductibilitatii termice
        // lambda = a*t*t + b*t + c pentru t > tpr
        // si lambda = lpr = a*tpr*tpr + b*tpr + c (constanta)
        // pentru t <= tpr
        a = -3.3253477562765E-05;
        b = -8.6288455272252E-03;
        c = 5.09286185768560E+01;

```

```

    tpr = 768;
    //solidus & lichidus
    tsol = 1440; tlich = 1500;
    //valorile pentru entalpii (hh) la diverse temperaturi (ht)
    ht.fromString(
        "100 200 300 400 500 600 "
        "700 800 900 1000 1100 1200 "
        "1300 1440 1500 1600");
    hh.fromString(
        "11.2 22.6 36.2 49.9 64.3 82.0 "
        "101.0 130.8 148.1 164.6 181.7 198.6 "
        "207.5 220.0 284.0 310.7");
    //entalpiile sunt date in kcal, dar le vrem in J
    hh.multiply(J_KCAL);
    _ro = 7850;
    break;
}
}
precalc();
}
void Material::precalc() {
    tpr2 = tpr*tpr; tpr3 = tpr2*tpr;
    lpr = a*tpr2 + b*tpr + c;
    fipr = tpr + (tpr2/c)*(tpr*a/3 + b/2);
}
void Material::writeToFile(DataFile *df) {
    df->writeInt(type);
    df->writeDouble(a);
    df->writeDouble(b);
    df->writeDouble(c);
    df->writeDouble(tpr);
    df->writeDouble(_ro);
    df->writeDouble(tsol);
    df->writeDouble(tlich);
    ht.writeToFile(df);
    hh.writeToFile(df);
}
void Material::readFromFile(DataFile *df) {
    type = df->readInt();
    a = df->readDouble();
    b = df->readDouble();
    c = df->readDouble();
    tpr = df->readDouble();
    _ro = df->readDouble();
    tsol = df->readDouble();
    tlich = df->readDouble();
    ht.readFromFile(df);
    hh.readFromFile(df);
}
}

double Material::lambda_t(double t) {
    if (type && (t < tpr)) return a*t*t + b*t + c;
}

```



```

    else return lpr;
}
double Material::fi_t(double t) {
    if (t < tpr) return t + (t*t/c)*(t*a/3 + b/2);
    return fipr + (t - tpr)*lpr/c;
}
double Material::t_fi(double fi) {
    if (fi >= fipr) //ecuatie de gr. I, altfel de gr. III
        return tpr + (c/lpr)*(fi - fipr);
    double fit, dfidt, t;
    t = tpr*fi/fipr;
    while (true) { //metoda aproximarilor succesive (Newton)
        fit = t + (t*t/c)*(t*a/3 + b/2);
        if (fabs(fi - fit) < 1e-6) return t;
        dfidt = (t/c)*(a*t + b) + 1;
        t += (fi - fit)/dfidt;
    }
}
double Material::h_t(double t) {
    int n = ht.binarySearch(t);
    float t1 = ht[n], t2 = ht[n+1];
    return ((t-t1)*hh[n+1] + (t2-t)*hh[n])/(t2-t1);
}
double Material::t_h(double h) {
    int n = hh.binarySearch(h);
    float h1 = hh[n], h2 = hh[n+1];
    return ((h-h1)*ht[n+1] + (h2-h)*ht[n])/(h2-h1);
}

```

### Fișierul HeatFlow.h

```

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// HeatFlow.h - header file

#ifndef __HEAT_FLOW_H
#define __HEAT_FLOW_H

class HeatFlow {
    friend class MetalData;
    friend class CProgressDialog;
private:
    MetalData *md;
    HeatFlow *prev;
    double time; //timpul
    double tmin, tmed, tmax; //temp. minima, medie si maxima fir
    double tcrymin, tcrymed, tcrymax; //temperaturi cristalizor
    DoubleArray daf, dat, dah;
    BOOL stripped;
private:
    HeatFlow *spawn();
    void init();
}

```

```

    void initCry();
    void finalize();
private:
    double calculateWir();
    double calculateCry();
    void normWir(double dtime);
    void normCry(double dtime);
    void calculateCryFull();
public:
    HeatFlow(MetalData *md,
             HeatFlow *prev, BOOL calcStrip = TRUE);
    double transfer(double tw, double tc);
    static double flowWir(double t);
    static double flowCry(double t);
    void writeToFile();
    void calculate();
};

```

```
#endif//__HEAT_FLOW_H
```

### **Fişierul HeatFlow.cpp**

```

////////////////////////////////////
// HeatFlow.cpp - implementation file

#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"
extern BOOL calcul_signal_stop;

HeatFlow::HeatFlow(
    MetalData *md, HeatFlow *prev, BOOL calcStrip) {
    HeatFlow::md = md;
    HeatFlow::prev = prev;
    int n = md->nwir + md->ncry;
    int m = md->mwir;
    dat.alloc(n, m);
    daf.alloc(n, m);
    dah.alloc(n, m);
    if (calcStrip) {
        stripped = md->calcFogged && (prev != NULL);
        if (!stripped)
            md->calcFogged = stripped = md->shouldFog(prev);
    } else stripped = FALSE;
}

HeatFlow *HeatFlow::spawn() {
    HeatFlow *hfc = new HeatFlow(md, this, FALSE);
    hfc->stripped = stripped;
    hfc->dat.copy(dat.getBuffer());
    hfc->daf.copy(daf.getBuffer());
    hfc->dah.copy(dah.getBuffer());
    return hfc;
}

```

```

void HeatFlow::writeToFile() {
    md->data.writeDouble(time);
    md->data.writeDouble(tmin);
    md->data.writeDouble(tmed);
    md->data.writeDouble(tmax);
    md->data.writeDouble(tcrymin);
    md->data.writeDouble(tcrymed);
    md->data.writeDouble(tcrymax);
    dat.writeToFileAsFloatArray(&md->data);
}
double HeatFlow::transfer(double tw, double tc) {
    if (tw == tc) {
        return 0;
    } else if (md->dzg <= 0) {
        return 15 * ((tw < tc) ? -1 : 1) * pow(fabs(tw - tc), 1.5);
    } else if (md->shouldAir(this)) {
        return (tw - tc) * md->lambdazg / (md->dzg + 0.002);
    } else {
        return (tw - tc) * md->lambdazg / md->dzg;
    }
}
double HeatFlow::flowWir(double t) {
    int s = (t < 0) ? -1 : 1; return s * pow(fabs(t), 2);
}
double HeatFlow::flowCry(double t) {
    t -= 100;
    if (t <= 0) {
        return 1e-20;
    } else {
        return pow(t, 2);
    }
}
double HeatFlow::calculateWir() { //returns max(dh/dt)
    int i, j;
    double max_dhdt = 0, t;
    double ddfix, dfix, ddfiy;
    double pfix1, pfix2, pfiy1, pfiy2;
    double W, tamb = 0;
    int nwir = md->nwir, mwir = md->mwir;
    double r, x = md->wirX / nwir, y = M_2_PI / mwir;
    int jplus, jminus;
    Material *mats = &md->matSteel;

    DoubleVector w;
    w.alloc(mwir);
    for (j = 0; j < mwir; j++) {
        w[j] = flowWir(prev->dat(nwir - 1, j));
    }
    w.multiply(md->wirHeatFlow() / w.average());

    for (i = 0; i < nwir; i++) {

```

```

r = x * i + 1e-3;
for (j = 0; j < mwir; j++) {
  jplus = (j + 1) % mwir;
  jminus = (mwir + j - 1) % mwir;
  if (i == 0) {
    pfix1 = pfix2 = prev->daf(1, j);
  } else if (i < nwir - 1) {
    pfix1 = prev->daf(i+1, j);
    pfix2 = prev->daf(i-1, j);
  } else {
    t = prev->dat(i, j);
    if (stripped) {
      W = w[j];
      pfix1 = - W * (2*x / mats->lambda_0());
      pfix2 = 2*prev->daf(i-1, j);
    } else {
      W = transfer(t, prev->dat(i+1, j));
      pfix1 = - W * (2*x / mats->lambda_0());
      pfix2 = 2*prev->daf(i-1, j);
    }
  }
  pfiy1 = prev->daf(i, jplus);
  pfiy2 = prev->daf(i, jminus);
  ddfix = (1/(x * x)) * (pfix1 + pfix2 - 2*prev->daf(i, j));
  dfix = (0.5/(r * x)) * (pfix1 - pfix2);
  ddfiy = (1/(r * r * y * y)) * (pfiy1 + pfiy2 - 2*prev->daf(i, j));
  daf(i, j) = t = (mats->lambda_0()/mats->ro())*(ddfix + dfix + ddfiy);
  t = fabs(t); if (max_dhdt < t) max_dhdt = t;
}
}
return max_dhdt;
}

```

```

double HeatFlow::calculateCry() {
  int i, j;
  double max_dhdt = 0, t;
  double ddfix, ddfiy, dfix;
  double pfix1, pfix2, pfiy1, pfiy2;
  double W = md->cryHeatFlow(), tamb = 20;
  int nwir = md->nwir, mwir = md->mwir;
  int ncry = md->ncry;
  int nfull = nwir + ncry;
  int jplus, jminus;
  double r, x = md->cryThick / ncry, y = M_2_PI / mwir;
  Material *matc = &md->matCopper;
  if (stripped) {
    for (i = nwir; i < nfull; i++) {
      for (j = 0; j < mwir; j++) {
        dat(i, j) = tamb; daf(i, j) = dah(i, j) = 0;
      }
    }
  }
}

```

```

    return 0;
}

DoubleVector w;
w.alloc(mwir);
for (j = 0; j < mwir; j++) {
    w[j] = flowCry(prev->dat(nfull - 1, j));
}
W = w.sum() / mwir;
if (W != 0) w.multiply(md->cryHeatFlow() / W);

for (i = nwir; i < nfull; i++) {
    r = md->wirX + x * (i - nwir);
    for (j = 0; j < mwir; j++) {
        jplus = (j + 1) % mwir;
        jminus = (mwir + j - 1) % mwir;
        if (i == nwir) {
            W = transfer(prev->dat(i-1, j), prev->dat(i, j));
            pfix1 = 2 * prev->daf(i+1, j);
            pfix2 = W * (2*x / matc->lambda_0());
        } else if (i < nwir + ncry - 1) {
            pfix1 = prev->daf(i+1, j);
            pfix2 = prev->daf(i-1, j);
        } else {
            W = w[j];
            pfix1 = - W * (2*x / matc->lambda_0());
            pfix2 = 2 * prev->daf(i-1, j);
        }
        pfy1 = prev->daf(i, jplus);
        pfy2 = prev->daf(i, jminus);
        ddfix = (1/(x * x)) * (pfix1 + pfix2 - 2*prev->daf(i, j));
        dfix = (0.5/(r * x)) * (pfix1 - pfix2);
        ddfiy = (1/(r * r * y * y)) * (pfy1 + pfy2 - 2*prev->daf(i, j));
        daf(i, j) = t = (matc->lambda_0()/matc->ro())*(ddfix + dfix + ddfiy);
        ASSERT(_finite(t));
        t = fabs(t); if (max_dhdt < t) max_dhdt = t;
    }
}
return max_dhdt;
}

void HeatFlow::normCry(double dtime) {
    int i, j; double t;
    int npoints = 0; tcrymed = 0;
    int nwir = md->nwir, mwir = md->mwir;
    int ncry = md->ncry;
    Material *matc = &md->matCopper;
    bool first = true;
    for (i = nwir; i < daf.nsize(); i++) {
        for (j = 0; j < daf.msize(); j++) {
            dah(i, j) = t = dtime*daf(i, j) + prev->dah(i, j);
            ASSERT(_finite(t));
        }
    }
}

```

```

    dat(i, j) = t = matc->t_h(t);
    ASSERT(_finite(t));
    if (first) {
        first = false;
        tcrymin = tcrymax = t;
    } else {
        if (tcrymin > t) tcrymin = t;
        if (tcrymax < t) tcrymax = t;
    }
    tcrymed += t; npoints++;
    daf(i, j) = t = matc->fi_t(t);
    ASSERT(_finite(t) && t > 0);
}
}
tcrymed /= npoints;
}
void HeatFlow::normWir(double dtime) {
    int i, nwir = md->nwir;
    int j, mwir = md->mwir;
    double t;
    Material *mats = &md->matSteel;
    for (i = 0; i < nwir; i++) for (j = 0; j < mwir; j++) {
        dah(i, j) = t = dtime*daf(i, j) + prev->dah(i, j);
        dat(i, j) = t = mats->t_h(t);
        daf(i, j) = mats->fi_t(t);
    }
}
void HeatFlow::init() {
    int i, j;
    double max_dhdt = 0, t;
    int nwir = md->nwir, mwir = md->mwir;
    Material *m = &md->matSteel;
    DoubleArray ta; ta.alloc(nwir, mwir);
    double Am = M_PI * sq(md->dmic / 2);
    double Ax = (M_PI / mwir) * sq(md->wirX / nwir);
    double tmic, tini = md->tini;
    ta.fill(tini);

    if (md->filltype == FILLTYPE_NONE) {
        // do nothing
    } else if (md->filltype == FILLTYPE_UNIFORM) {
        int nx, ny, ii, jj;
        double N = md->fillfactor * nwir * mwir;
        double F = md->wirX / M_2_PI;
        nx = round(sqrt(N * F));
        ny = round(sqrt(N / F));
        double dx = 2.0 * nwir / (2 * nx + 1);
        double dy = 2.0 * mwir / (2 * ny + 1);
        for (i = 0; i < nx; i++) {
            ii = round((i + 0.5) * dx);
            if (ii >= nwir) ii = nwir - 1;
        }
    }
}

```

```

    for (j = 0; j < ny; j++) {
        jj = round((j + 0.5) * dy);
        if (jj >= mwir) jj = mwir - 1;
        tmic = tini + (20 - tini) * Am / (Ax * (2 * ii + 1));
        if (tmic < 20) tmic = 20;
        ta(ii, jj) = tmic;
    }
}
else {
    if (md->filltype == FILLTYPE_URANDOM) srand(1);
    else srand(::time(NULL));
    double xrand, yrand;
    double f = md->fillfactor;
    int ii, jj;
    while (f > 0) {
        xrand = (double)rand() / RAND_MAX;
        yrand = (double)rand() / RAND_MAX;
        xrand = pow(xrand, md->fillconc);
        ii = round(xrand * (nwir - 1));
        jj = round(yrand * (mwir - 1));
        if (ta(ii, jj) != tini) continue;
        if ((ii > 0) && (ta(ii - 1, jj) != tini)) continue;
        if ((jj > 0) && (ta(ii, jj - 1) != tini)) continue;
        if ((ii < nwir - 1) && (ta(ii + 1, jj) != tini)) continue;
        if ((jj < mwir - 1) && (ta(ii, jj + 1) != tini)) continue;
        tmic = tini + (20 - tini) * Am / (Ax * (2 * ii + 1));
        if (tmic < 20) tmic = 20;
        ta(ii, jj) = tmic;
        f -= xrand / (nwir * mwir);
    }
}

for (i = 0; i < nwir; i++) {
    for (j = 0; j < mwir; j++) {
        dat(i, j) = t = ta(i, j);
        daf(i, j) = m->fi_t(t);
        dah(i, j) = m->h_t(t);
    }
}
initCry();
tmin = tmax = tmed = md->tini;
time = 0;
}
void HeatFlow::initCry() {
    int i, j;
    double t;
    int nwir = md->nwir, mwir = md->mwir;
    int ncry = md->ncry;
    Material *m = &md->matCopper;
    if (stripped || md->fogImmediate) t = md->tcryini;
    else t = md->tini / 3;
}

```

```

for (i = nwir; i < daf.nsize(); i++) {
    for (j = 0; j < mwir; j++) {
        dat(i, j) = t;
        daf(i, j) = m->fi_t(t);
        dah(i, j) = m->h_t(t);
    }
}
tcrymin = tcrymed = tcrymax = t;
}
void HeatFlow::calculateCryFull() {
    if (md->fogImmediate) return;
    int i, j;
    double dt, max_dhdt;
    HeatFlow *hfc = spawn();
    while (true) {
        if (calcul_signal_stop) break;
        max_dhdt = hfc->calculateCry();
        ////! Valoarea numerica de mai jos poate fi marita (mai rapid
        // si mai instabil) sau micsorata (mai lent si mai stabil)
        dt = 5 / max_dhdt;
        hfc->normCry(dt);
        logf("Tcry(min,max,med),max_dhdt = %lg\t%lg\t%lg\t%lg\n",
            hfc->tcrymin, hfc->tcrymax, hfc->tcrymed, max_dhdt);
        if (hfc->prev != this) delete hfc->prev;
        ////! Valoarea numerica de mai jos poate fi marita (mai rapid)
        // sau micsorata (mai precis), dar poate deveni instabil
        if (max_dhdt < 100) break;
        // that shouldn't be necessary
        if (hfc->tcrymin < 150) break;
        hfc = hfc->spawn();
    }
    for (i = md->nwir; i < daf.nsize(); i++) {
        for (j = 0; j < daf.msize(); j++) {
            dah(i, j) = hfc->dah(i, j);
            dat(i, j) = hfc->dat(i, j);
            daf(i, j) = hfc->daf(i, j);
        }
    }
    delete hfc;
}
void HeatFlow::calculate() {
    double max_dhdt = 0, dt;
    if (!prev) {
        init();
        calculateCryFull();
        finalize();
        return;
    }
    max_dhdt = calculateWir();
    dt = md->max_dh / max_dhdt;
    time = prev->time + dt;
}

```



```

normWir(dt);
if (!stripped) {
    calculateCry();
    normCry(dt);
    calculateCryFull();
} else initCry();
finalize();
}
void HeatFlow::finalize() {
    int i, j; double t, npwir, npcry;
    int nwir = md->nwir, mwir = md->mwir;
    int ncry = md->ncry;
    tmed = 0; tmin = tmax = dat(0, 0);
    tcrymin = tcrymax = dat(nwir, 0); tcrymed = 0;
    npwir = npcry = 0;
    for (i = 0; i < daf.nsize(); i++) for (j = 0; j < daf.msize(); j++) {
        t = dat(i, j);
        if (md->inWire(i, j)) {
            tmed += t * i; npwir += i;
            if (tmin > t) tmin = t;
            if (tmax < t) tmax = t;
        } else {
            tcrymed += t * i; npcry += i;
            if (tcrymin > t) tcrymin = t;
            if (tcrymax < t) tcrymax = t;
        }
    }
    tcrymed /= npcry; tmed /= npwir;
}

```

### Fişierul *SequenceInterpolator.h*

```

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// SequenceInterpolator.h - header file

#ifdef __SEQUENCE_INTERPOLATOR_H
#define __SEQUENCE_INTERPOLATOR_H

class SequenceInterpolator {
    MetalData *md; int nseq;
    double time;
    double tmin, tmed, tmax;
    double tcrymin, tcrymed, tcrymax;
    FloatArray array;
public:
    SequenceInterpolator(MetalData *md, int nseq);
    int seq() {return nseq;}
    float get(float x, float y); //x, y valori fizice
    float get1(float x, float y); //x, y intre [0, 1]
    float get2(float x, float y); //x, y intre [-1, 1]
    float getWire1(float x, float y); //x, y intre [0, 1]
    float getWire2(float x, float y); //x, y intre [-1, 1]

```

```
};
#endif//__SEQUENCE_INTERPOLATOR_H
```

### Fişierul *SequenceInterpolator.cpp*

```
////////////////////////////////////
// SequenceInterpolator.cpp - implementation file
```

```
#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"
```

```
SequenceInterpolator::SequenceInterpolator(MetalData *md, int nseq) {
    md->seekSequence(nseq);
    time = md->data.readDouble();
    tmin = md->data.readDouble();
    tmed = md->data.readDouble();
    tmax = md->data.readDouble();
    tcrymin = md->data.readDouble();
    tcrymed = md->data.readDouble();
    tcrymax = md->data.readDouble();
    array.readFromFile(&md->data);
    SequenceInterpolator::md = md;
    SequenceInterpolator::nseq = nseq;
}
float SequenceInterpolator::get(float x, float y) {
    int i, j, jplus;
    float x1, x2, y1, y2;
    float tx1, tx2, t;
    float wirx = md->wirX;
    float crythick = md->cryThick;
    if (x <= wirx) {
        i = (md->nwir-1)*x/wirx;
        x1 = i*(wirx / (md->nwir-1));
        x2 = (i+1)*(wirx / (md->nwir-1));
    } else {
        i = md->nwir + (md->ncry - 1) * (x - wirx) / crythick;
        if (i == md->nwir + md->ncry - 1) i--;
        x1 = wirx + (i - md->nwir) * (crythick / (md->ncry-1));
        x2 = wirx + (i + 1 - md->nwir)*(crythick / (md->ncry-1));
    }
    j = (int)(y * md->mwir / M_2_PI);
    while (j < 0) j += md->mwir;
    j %= md->mwir;
    jplus = (j + 1) % md->mwir;
    y1 = M_2_PI * j / md->mwir;
    y2 = M_2_PI * (j + 1) / md->mwir;
    tx1 = ((x - x1)*array(i+1, j) + (x2 - x)*array(i, j))/(x2 - x1);
    tx2 = ((x - x1)*array(i+1, jplus) + (x2 - x)*array(i, jplus))/(x2 - x1);
    t = ((y - y1)*tx2 + (y2 - y)*tx1)/(y2 - y1);
    ASSERT(t < 2000);
    return t;
}
```

```

float SequenceInterpolator::get1(float x, float y) {
    return get(x*(md->wirX+md->cryThick), y*M_2_PI);
}
float SequenceInterpolator::get2(float x, float y) {
    return get1((x + 1)/2, (y + 1)/2);
}
float SequenceInterpolator::getWire1(float x, float y) {
    return get(x*md->wirX, y*M_2_PI);
}
float SequenceInterpolator::getWire2(float x, float y) {
    return getWire1((x + 1)/2, (y + 1)/2);
}

```

### **Fişierul Buffers.h**

```

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// Buffers.h - header file

#ifndef __BUFFERS_H
#define __BUFFERS_H

#include "DataFile.h"

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//class FloatBuffer
class FloatBuffer {
    float *buf;
    int n;
public:
    FloatBuffer();
    FloatBuffer(FloatBuffer& fb);
    FloatBuffer(float *fb, int count);
    FloatBuffer(double *fb, int count);
    ~FloatBuffer();
    void empty() {setSize(0);}
    bool isEmpty() {return (n == 0);}
    void setSize(int size);
    int size() {return n;}
    void add(float x);
    void insert(float x, int pos);
    void remove(int pos);
    void sort();
    void multiply(float x);
    int binarySearch(float x);
    CString toString();
    void fromString(LPCTSTR s);
    void fromFloatBuffer(FloatBuffer& fb);
    void fromArray(float *fb, int count);
    void fromArray(double *fb, int count);
    void writeToFile(DataFile *df);
    void readFromFile(DataFile *df);
}

```

```

float& operator [] (UINT index) {return buf[index];}
float interpolate(float x);
};
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//class DoubleBuffer
class DoubleBuffer {
    double *buf;
    int n;
public:
    DoubleBuffer();
    DoubleBuffer(DoubleBuffer& fb);
    DoubleBuffer(float *fb, int count);
    DoubleBuffer(double *fb, int count);
    ~DoubleBuffer();
    void empty() {setSize(0);}
    bool isEmpty() {return (n == 0);}
    void setSize(int size);
    int size() {return n;}
    void add(double x);
    void insert(double x, int pos);
    void remove(int pos);
    void sort();
    void multiply(double x);
    int binarySearch(double x);
    CString toString();
    void fromString(LPCTSTR s);
    void fromDoubleBuffer(DoubleBuffer& fb);
    void fromArray(float *fb, int count);
    void fromArray(double *fb, int count);
    void writeToFile(DataFile *df);
    void readFromFile(DataFile *df);
    double& operator [] (UINT index) {return buf[index];}
    double interpolate(double x);
};
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//class FloatArray
class FloatArray {
    float *buf;
    int n, m;
public:
    FloatArray();
    FloatArray(FloatArray& fa);
    ~FloatArray();
    void alloc(int n, int m);
    void clear();
    float& operator () (int i, int j);
    int nsize() {return n;}
    int msize() {return m;}
    void fill(float x);
    void copy(float *px);
    void copy(FloatArray& fa);
};

```

```

void multiply(float x);
float sum();
float average();
BOOL isEmpty() {return (buf == NULL);}
void writeToFile(DataFile *df);
void readFromFile(DataFile *df);
void writeToTextFile(FILE *file);
float *getBuffer() {return buf;}
float interpolate(float x, float y);
};
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//class FloatSpace
class FloatSpace {
    float *buf;
    int n, m, p;
public:
    FloatSpace();
    FloatSpace(FloatSpace& fa);
    ~FloatSpace();
    void alloc(int n, int m, int p);
    void clear();
    float& operator() (int i, int j, int k);
    int nsize() {return n;}
    int msize() {return m;}
    int psize() {return p;}
    void fill(float x);
    void copy(float *px);
    void multiply(float x);
    float sum();
    float average();
    BOOL isEmpty() {return (buf == NULL);}
    void writeToFile(DataFile *df);
    void readFromFile(DataFile *df);
    float *getBuffer() {return buf;}
    float interpolate(float x, float y, float z);
};
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//class DoubleArray
class DoubleArray {
    double *buf;
    int n, m;
public:
    DoubleArray();
    DoubleArray(DoubleArray& fa);
    ~DoubleArray();
    void alloc(int n, int m);
    void clear();
    double& operator() (int i, int j);
    int nsize() {return n;}
    int msize() {return m;}
    void fill(double x);
};

```

```

void copy(double *px);
void copy(DoubleArray& fa);
void multiply(double x);
double sum();
double average();
BOOL isEmpty() {return (buf == NULL);}
void writeToFile(DataFile *df);
void readFromFile(DataFile *df);
void writeToFileAsFloatArray(DataFile *df);
void writeToTextFile(FILE *file);
double *getBuffer() {return buf;}
double interpolate(double x, double y);
};
//class DoubleVector
class DoubleVector {
    double* buf; int n;
public:
    DoubleVector();
    DoubleVector(DoubleVector& dv);
    ~DoubleVector();
    void alloc(int n);
    void clear();
    double& operator[] (int i);
    int size();
    void fill(double x);
    void multiply(double x);
    double sum();
    double average();
    BOOL isEmpty() {return (buf == NULL);}
    double interpolate(double x);
};
////////////////////////////////////
//class DoubleSpace
class DoubleSpace {
    double *buf;
    int n, m, p;
public:
    DoubleSpace();
    DoubleSpace(DoubleSpace& fa);
    ~DoubleSpace();
    void alloc(int n, int m, int p);
    void clear();
    double& operator() (int i, int j, int k);
    int nsize() {return n;}
    int msize() {return m;}
    int psize() {return p;}
    void fill(double x);
    void copy(double *px);
    void multiply(double x);
    double sum();
    double average();

```

```

double minimum();
double maximum();
BOOL isEmpty() {return (buf == NULL);}
void writeToFile(DataFile *df);
void readFromFile(DataFile *df);
void writeToFileAsFloatSpace(DataFile *df);
double *getBuffer() {return buf;}
double interpolate(double x, double y, double z);
};
#endif//__BUFFERS_H

```

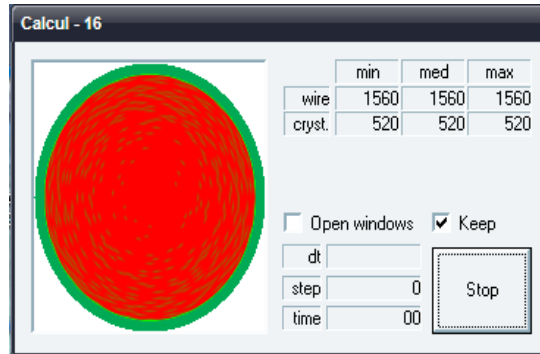
**Tabelul 7.3.A.** Temperatura în fir, funcție de diametrul microrăcitorilor și de cantitatea de microrăcitori adăugată

Conținut de microrăcitori [%]	Diametru microrăcitori [mm]	T <sub>min</sub> [°C]	T <sub>med</sub> [°C]	T <sub>max</sub> [°C]
3%	1	666	1094	1522
	2	654	1079	1517
	3	610	1024	1503
2%	1	665	1093	1521
	2	659	1086	1519
	3	623	1040	1506
1%	1	667	1095	1522
	2	662	1089	1520
	3	630	1049	1508

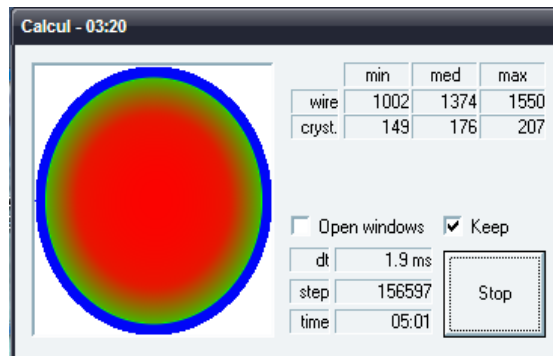
The 'Config' dialog box contains the following parameters and values:

- Temperatura initiala a cristalizorului: 20 °C
- Temperatura de turnare: 1560 °C
- Diametrul firului: 350 mm
- Grosimea peretelui cristalizorului: 50 mm
- Nr. puncte de discretizare fir: 60 x 60 -
- Nr. puncte de discretizare cristalizor: 5 x -
- Maximul variatiei entalpiei / iteratie: 100 J/kg
- Viteza de turnare: 650 mm/min
- Inaltimea cristalizorului: 900 mm
- Inaltimea camerei de ceata: 11000 mm
- Putere disipata in cristalizor: 500 kW
- Putere disipata la r. s.: 2000 kW
- Distributie microracitori: aleatoare repetabila
- Continut de microracitori: 2 %
- Factor de concentrare MP: 5 -
- Grosimea stratului de zgura: 2 mm
- Conduct. termica a zgurii: 1.6 W/mK
- Factor de negreala zgura-cupru: 0.3 -

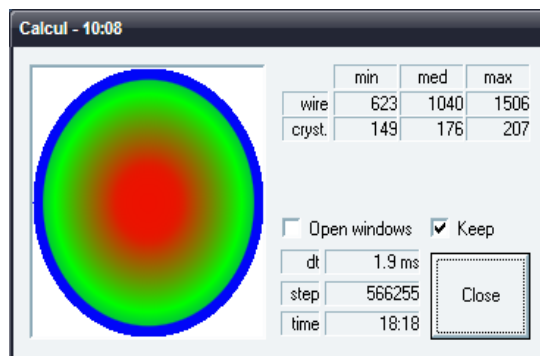
**Fig.7.32.A.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului



**Fig.7.33.A.** Fereastra care indică progresul calculor la începutul simulării

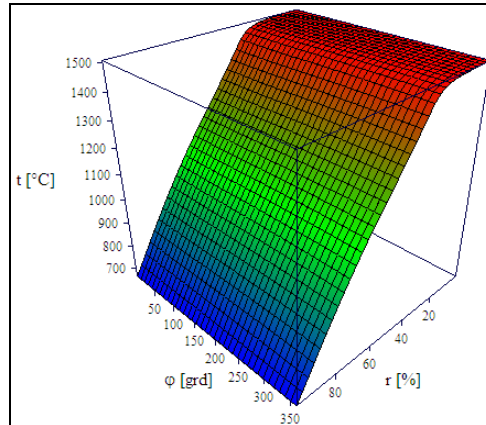


**Fig.7.34.A.** Fereastra care indică progresul calculor, la 3:20min timp real, respective 5:1min timp simulat

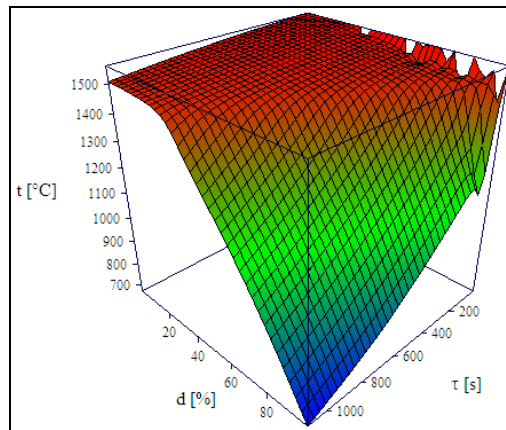


**Fig.7.35.A.** Fereastra care indică progresul calculor la 10:08min timp real, respective 18:18min timp simulat

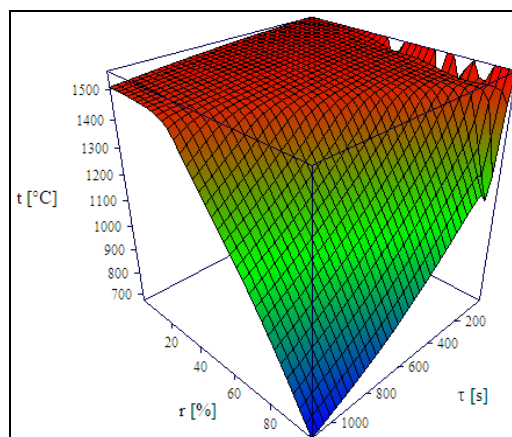




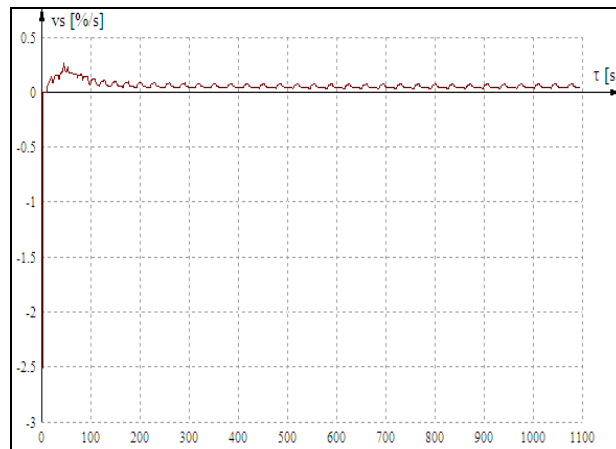
**Fig.7.36.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară



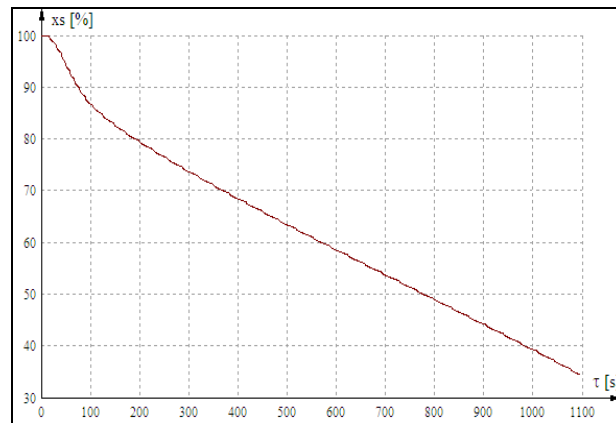
**Fig.7.37.A.** Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. Punctele sunt luate în spirală așa încât d, raza relativă și  $\varphi/2\pi$  să aibă aceeași valoare



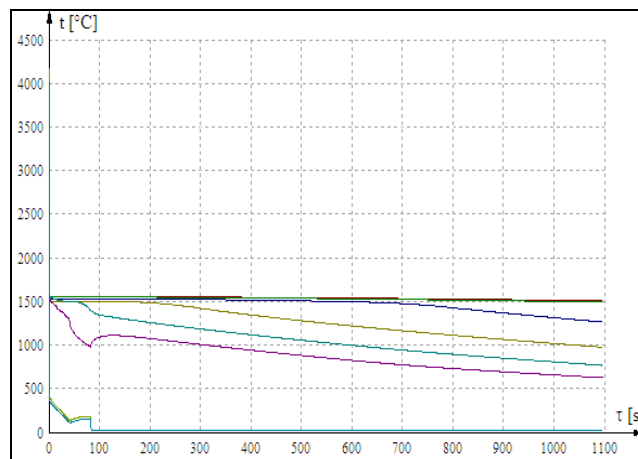
**Fig.7.38.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și timp



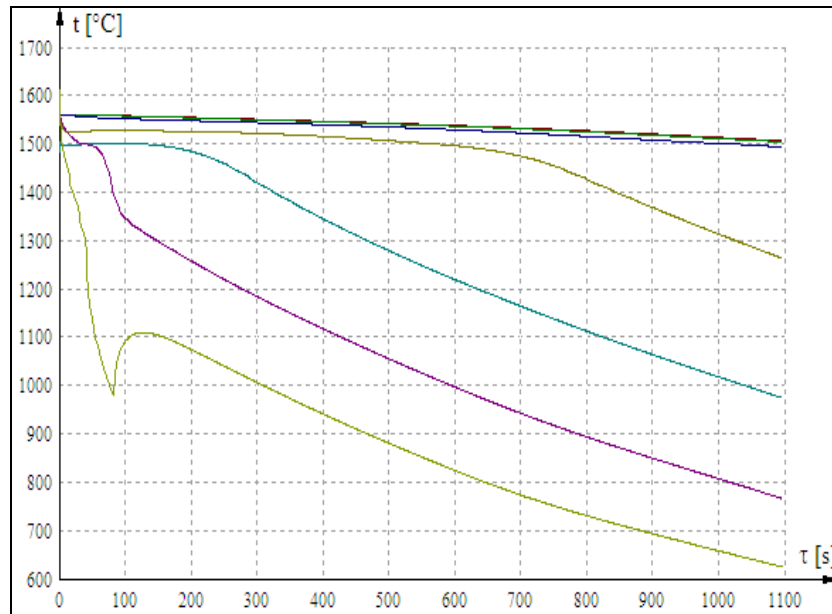
**Fig.7.39.A.** Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare



**Fig.7.40.A.** Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului)



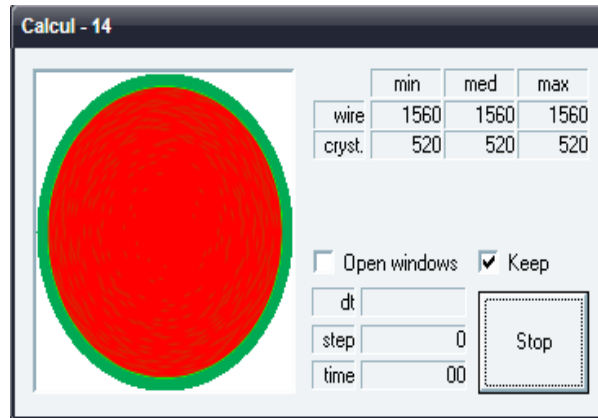
**Fig.7.41.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 50%, 75%, 90% și respectiv 100% din raza firului de turnare, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia (cea mai rece)



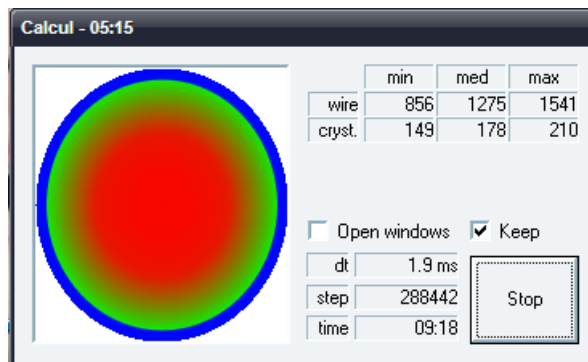
**Fig.7.42.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 10%, 25%, 50% și respectiv 100% din raza firului de turnare

Config		
Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1560	°C
Diametrul firului	350	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	60 x 60	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	5 x	-
Maximul variației entalpiei / iteratie	100	J/kg
Viteza de turnare	650	mm/min
Înălțimea cristalizorului	900	mm
Înălțimea camerei de ceata	11000	mm
Putere disipata în cristalizor	500	kW
Putere disipata la r. s.	2000	kW
Distributie microracitori	aleatoare repetabila	
Continut de microracitori	1	%
Factor de concentrare MR	5	-
Grosimea stratului de zgura	2	mm
Conduct. termica a zgurii	1.6	W/mK
Factor de negreala zgura-cupru	0.3	-
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Reset"/>		

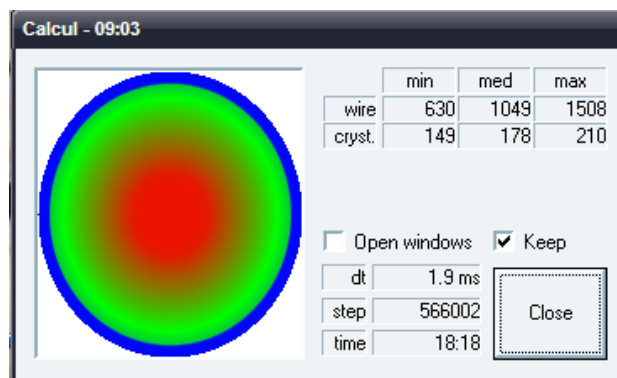
**Fig.7.43.A.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului



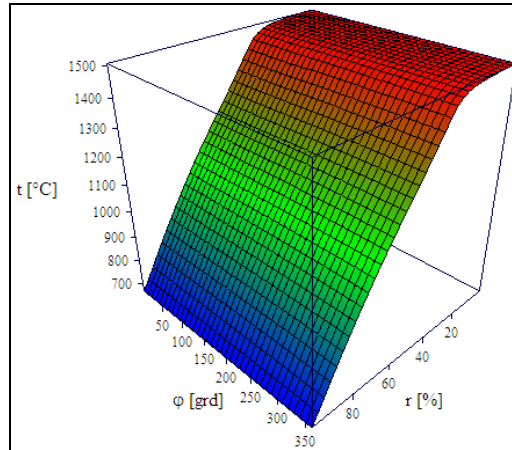
**Fig.7.44.A.** Fereastra care indică progresul calculor la începutul simulării



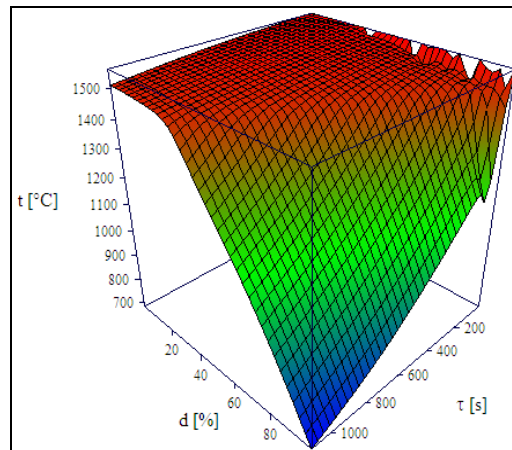
**Fig.7.45.A.** Fereastra care indică progresul calculor la 5:15min timp real, respective 9:18min timp simulat



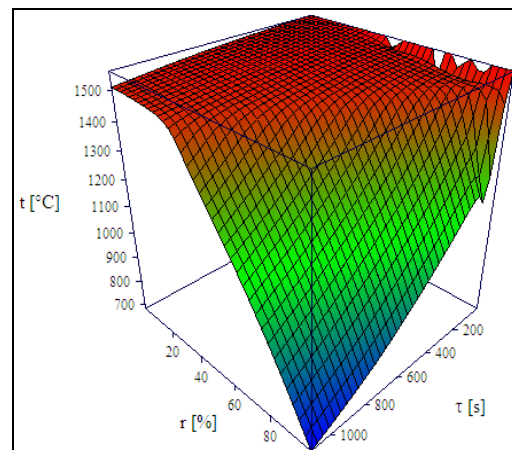
**Fig.7.46.A.** Fereastra care indică progresul calculor la 9:03min timp real, respective 18:18min timp simulat



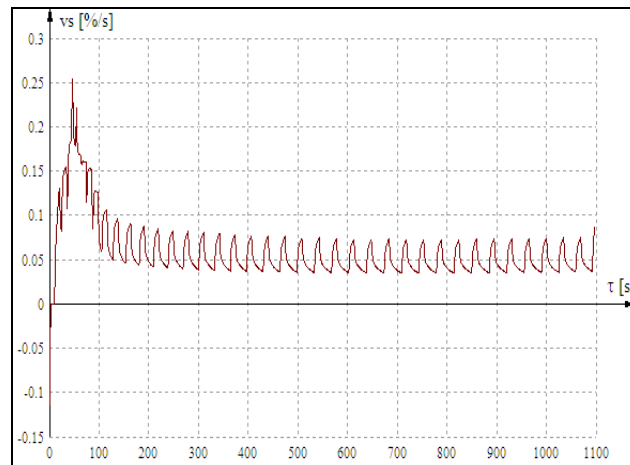
**Fig.7.47.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară



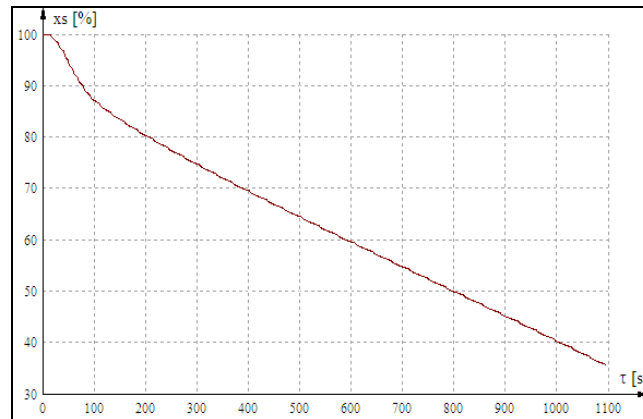
**Fig.7.48.A.** Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. Punctele sunt luate în spirală așa încât d, raza relativă și  $\varphi/2\pi$  să aibă aceeași valoare



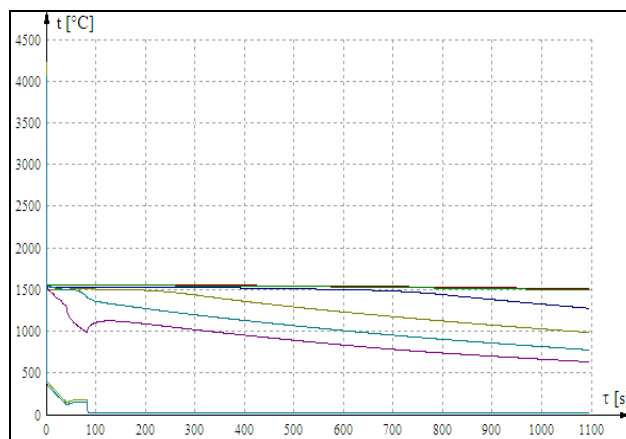
**Fig.7.49.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și timp



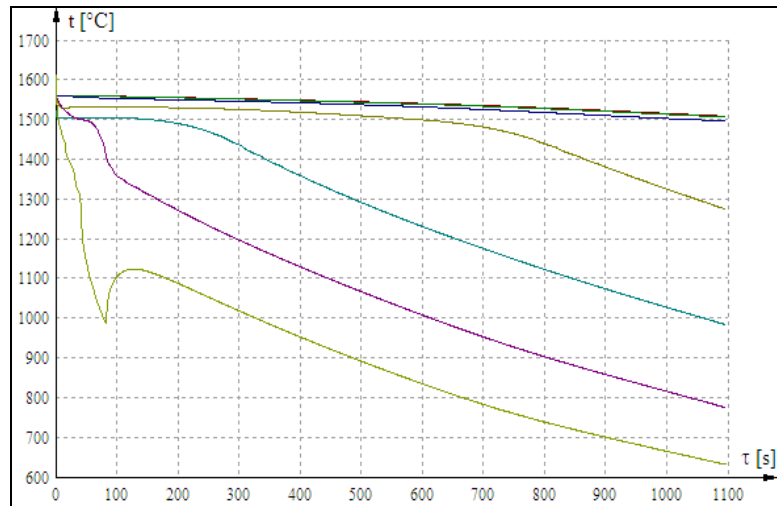
**Fig.7.50.A.** Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare



**Fig.7.51.A.** Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului)



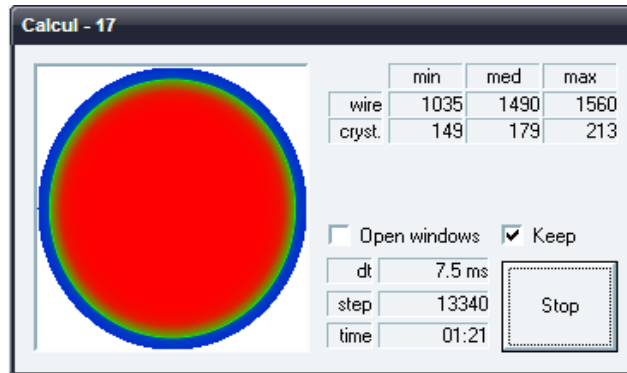
**Fig.7.52.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 50%, 75%, 90% și respectiv 100% din raza firului de turnare, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia (cea mai rece)



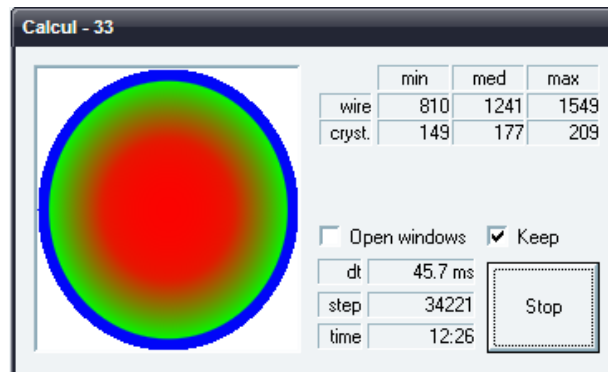
**Fig.7.53.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\phi = 0$ , în puncte situate la 0%, 10%, 25%, 50% și respectiv 100% din raza firului de turnare

Config		
Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1560	°C
Diametrul firului	350	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	60 x 60	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	5 x	-
Maximul variației entalpiei / iteratie	100	J/kg
Viteza de turnare	650	mm/min
Înălțimea cristalizorului	900	mm
Înălțimea camerei de ceata	11000	mm
Putere disipată în cristalizor	500	kW
Putere disipată la r. s.	2000	kW
Distributie microracitori	nici una	
Continut de microracitori	0	%
Factor de concentrare MR	5	-
Grosimea stratului de zgura	2	mm
Conduct. termica a zgurii	1.6	W/mK
Factor de negreala zgura-cupru	0.3	-
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Reset"/>		

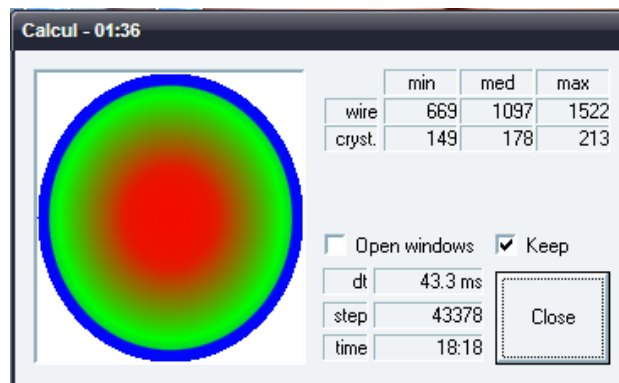
**Fig.7.54.A.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului



**Fig.7.55.A.** Fereastra care indică progresul calculului

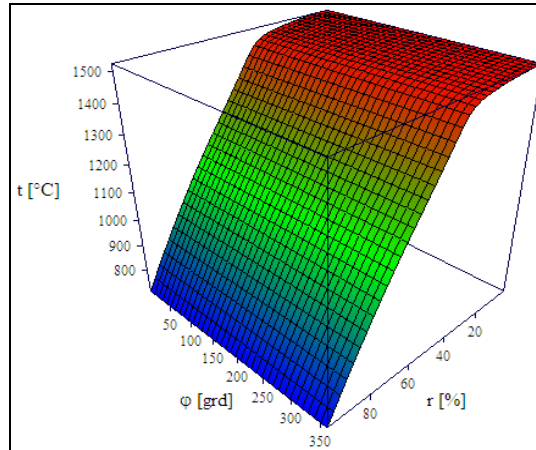


**Fig.7.56.A.** Fereastra care indică progresul calculului

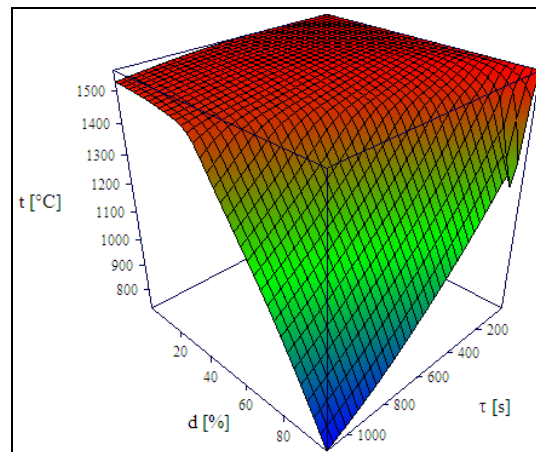


**Fig.7.57.A.** Fereastra care indică progresul calculului

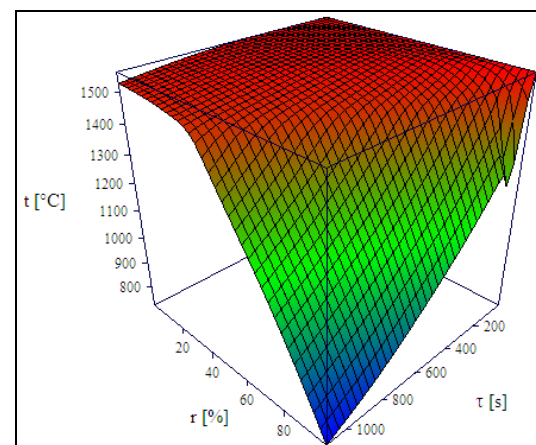




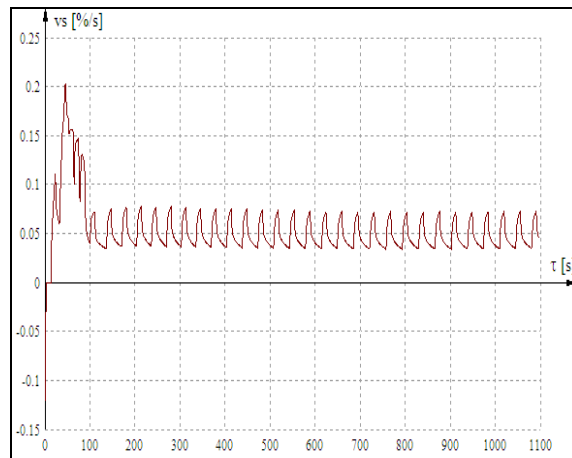
**Fig.7.58.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară



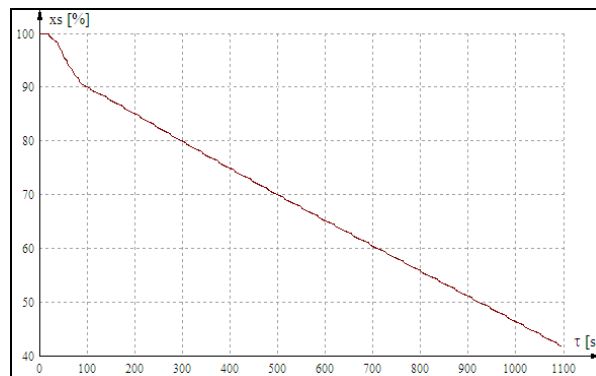
**Fig.7.59.A.** Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. Punctele sunt luate în spirală așa încât d, raza relativă și  $\varphi/2\pi$  să aibă aceeași valoare



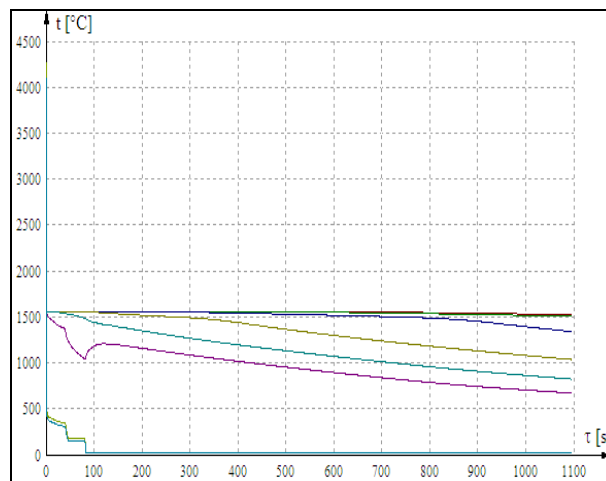
**Fig.7.60.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și timp



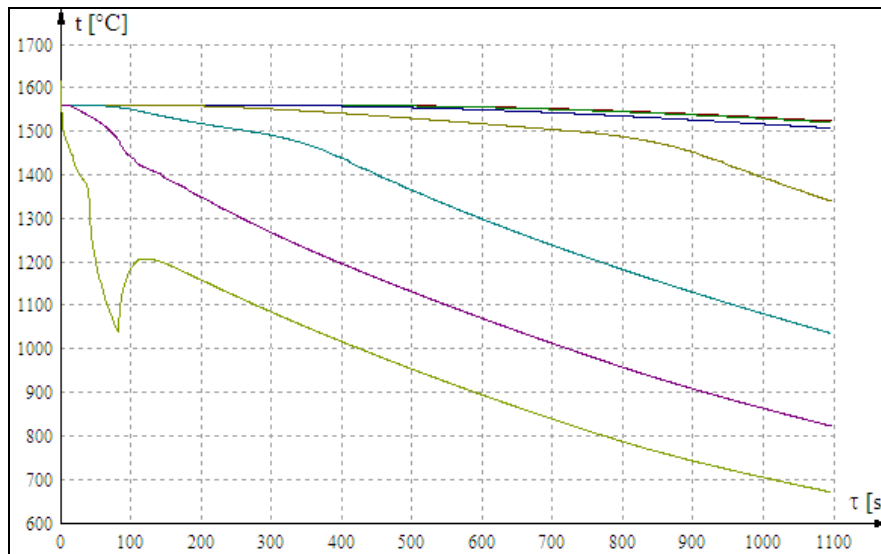
**Fig.7.61.A.** Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare



**Fig.7.62.A.** Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului)



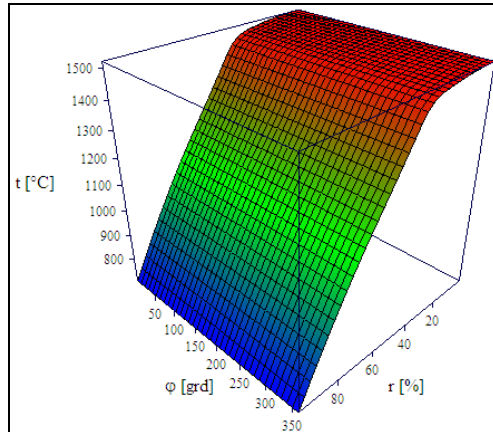
**Fig.7.63.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 50%, 75%, 90% și respectiv 100% din raza firului de turnare, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia(cea mai rece)



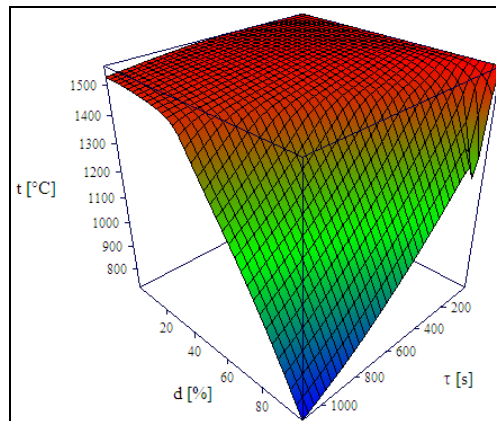
**Fig.7.64.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 10%, 25%, 50% și respectiv 100% din raza firului de turnare

Config		
Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1560	°C
Diametrul firului	350	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	60 x 60	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	5 x	-
Maximul variației entalpiei / iteratie	100	J/kg
Viteza de turnare	650	mm/min
Înălțimea cristalizorului	900	mm
Înălțimea camerei de ceata	11000	mm
Putere disipată în cristalizor	500	kW
Putere disipată la r. s.	2000	kW
Distributie microracitori	aleatoare repetabila	
Conținut de microracitori	2	%
Diametru microracitori	1	mm
Factor de concentrare MR	5	-
Grosimea stratului de zgura	2	mm
Conduct. termică a zgurii	1.6	W/mK
Factor de negreala zgura-cupru	0.3	-
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Reset"/>		

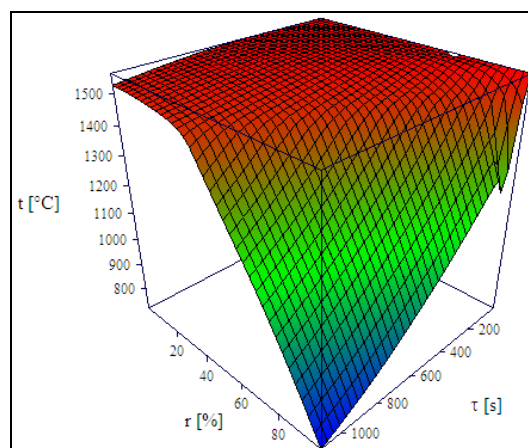
**Fig.7.65.A.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului



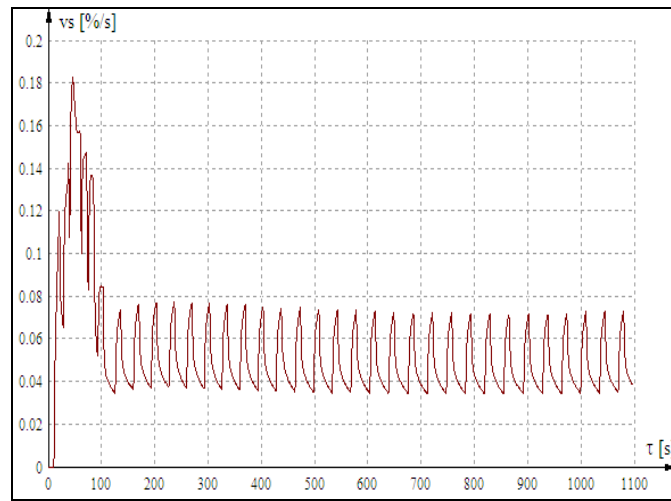
**Fig.7.66.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară



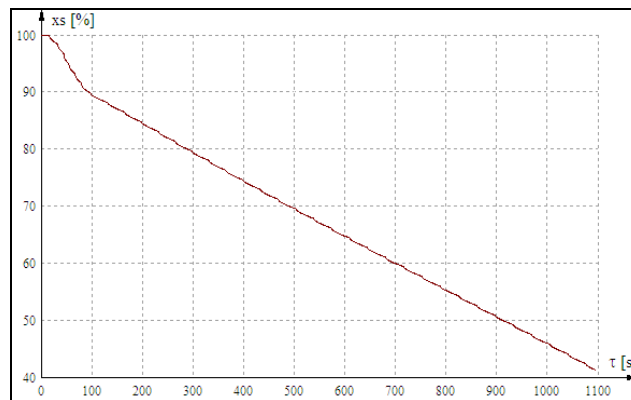
**Fig.7.67.A.** Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata  $d$ . Punctele sunt luate în spirală așa încât  $d$ , raza relativă și  $\varphi/2\pi$  să aibă aceeași valoare



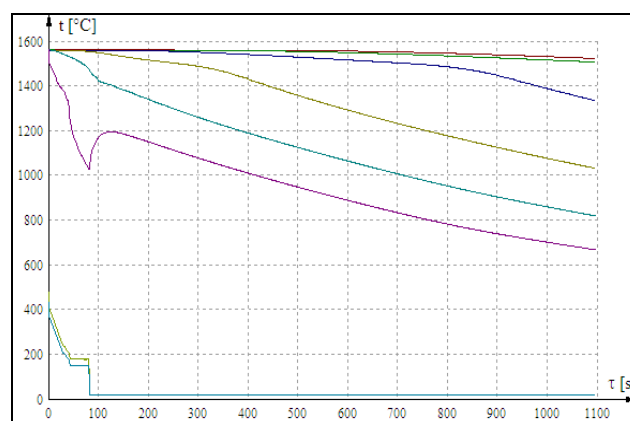
**Fig.7.68.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și timp



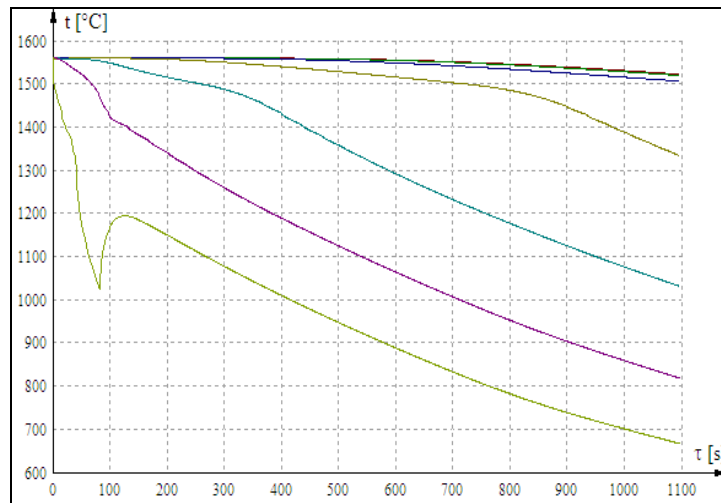
**Fig.7.69.A.** Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare



**Fig.7.70.A.** Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului)



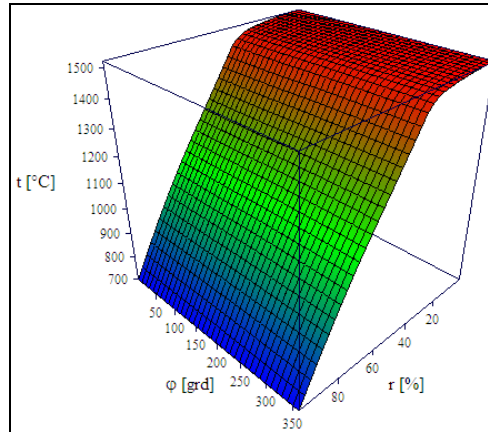
**Fig. 7.71.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 50%, 75%, 90% și respectiv 100% din raza firului de turnare, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia (cea mai rece)



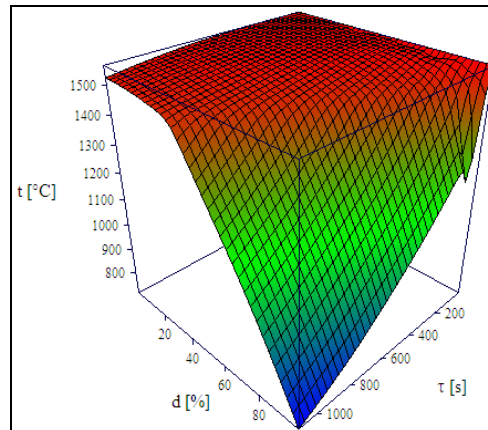
**Fig.7.72.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 10%, 25%, 50% și respectiv 100% din raza firului de turnare

Config		
Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1560	°C
Diametrul firului	350	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	60 x 60	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	5 x	-
Maximul variației entalpiei / iteratie	100	J/kg
Viteza de turnare	650	mm/min
Înălțimea cristalizorului	900	mm
Înălțimea camerei de ceata	11000	mm
Putere disipată în cristalizor	500	kW
Putere disipată la r. s.	2000	kW
Distributie microracitori	aleatoare repetabila	
Conținut de microracitori	2	%
Diametru microracitori	2	mm
Factor de concentrare MR	5	-
Grosimea stratului de zgura	2	mm
Conduct. termică a zgurii	1.6	W/mK
Factor de negreala zgura-cupru	0.3	-
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Reset"/>		

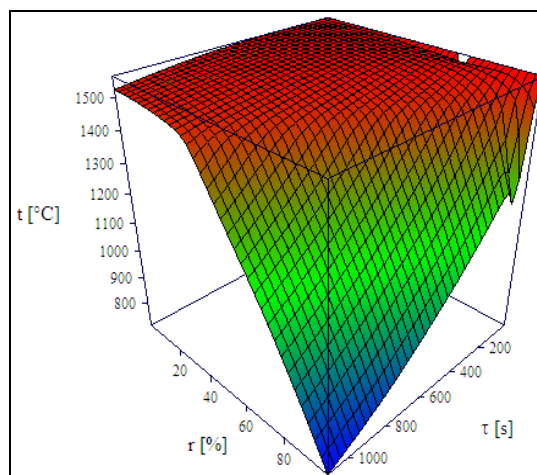
**Fig.7.73.A.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului



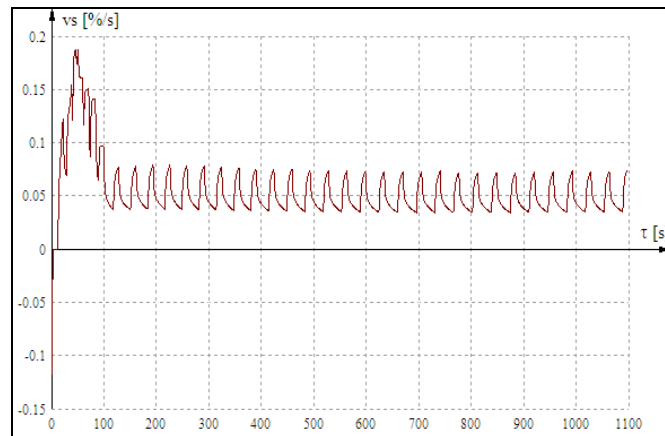
**Fig.7.74.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară



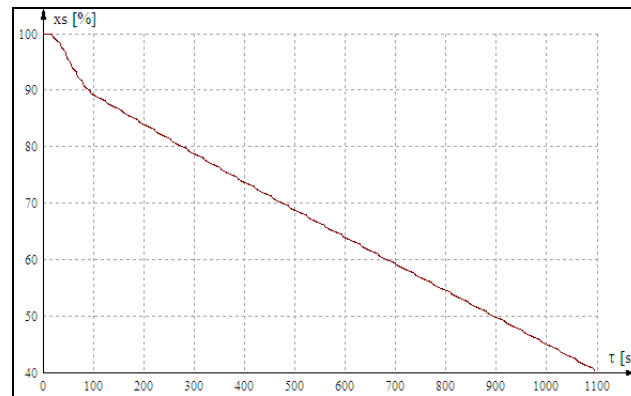
**Fig.7.75.A.** Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. Punctele sunt luate în spirală așa încât d, raza relativă și  $\varphi/2\pi$  să aibă aceeași valoare



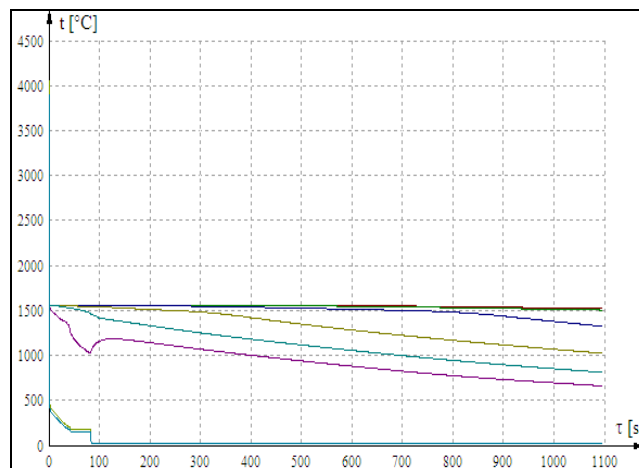
**Fig.7.76.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și timp



**Fig.7.77.A.** Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare

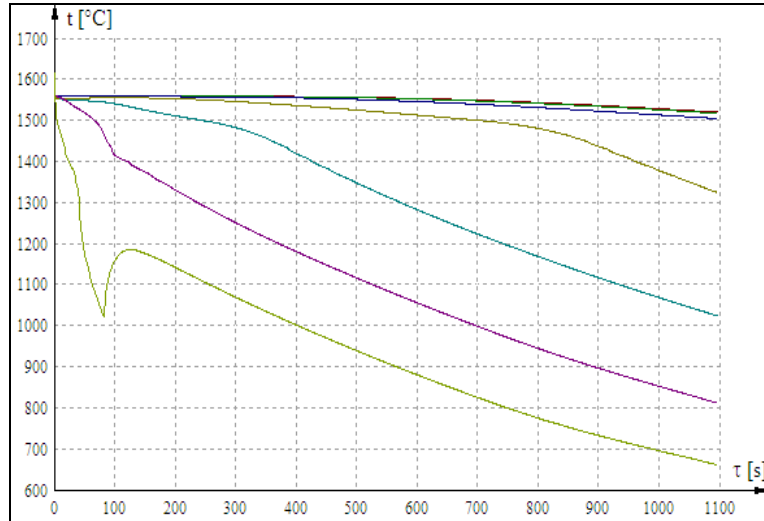


**Fig.7.78.A.** Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului)



**Fig.7.79.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 50%, 75%, 90% și respectiv 100% din raza firului de turnare, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia(cea mai rece)

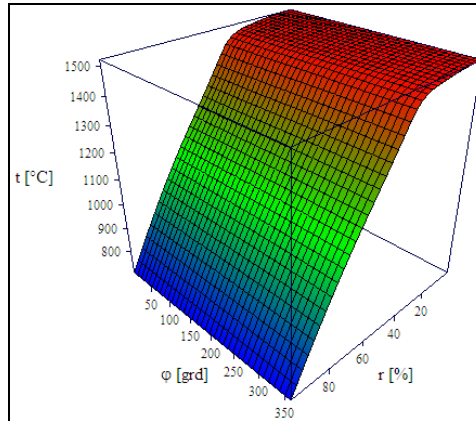




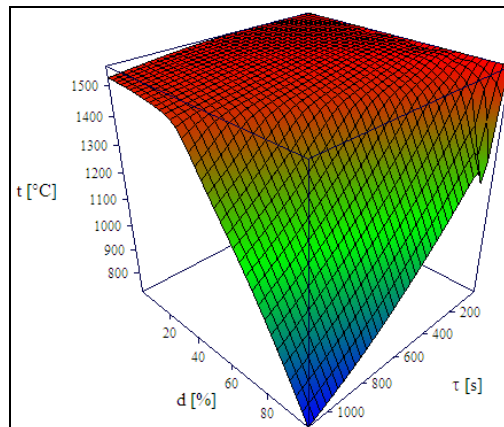
**Fig.7.80.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 10%, 25%, 50% și respectiv 100% din raza firului de turnare

Config		
Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1560	°C
Diametrul firului	350	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	60 x 60	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	5 x	-
Maximul variației entalpiei / iteratie	100	J/kg
Viteza de turnare	650	mm/min
Înălțimea cristalizorului	900	mm
Înălțimea camerei de ceata	11000	mm
Putere disipata în cristalizor	500	kW
Putere disipata la r. s.	2000	kW
Distributie microracitori	aleatoare repetabila	
Continut de microracitori	1	%
Diametru microracitori	2	mm
Factor de concentrare MR	5	-
Grosimea stratului de zgura	2	mm
Conduct. termica a zgurii	1.6	W/mK
Factor de negreala zgura-cupru	0.3	-
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Reset"/>		

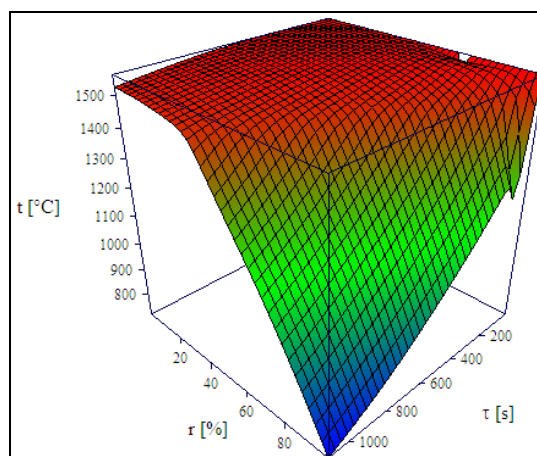
**Fig.7.81.A.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului



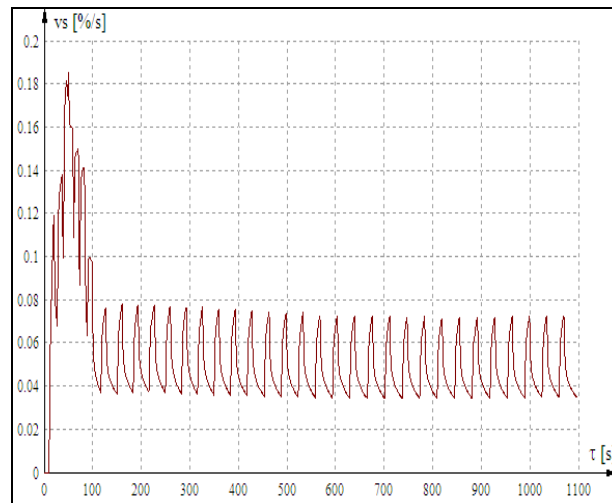
**Fig.7.82.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară



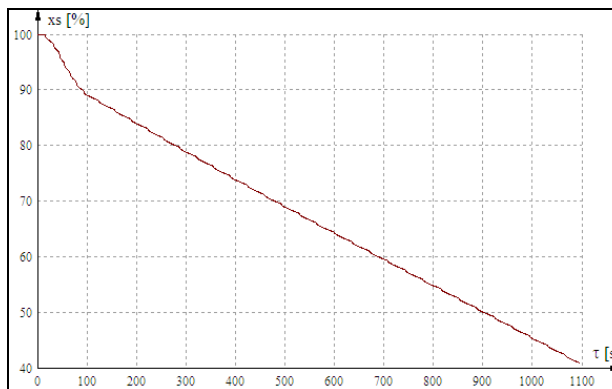
**Fig.7.83.A.** Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. Punctele sunt luate în spirală așa încât d, raza relativă și  $\varphi/2\pi$  să aibă aceeași valoare



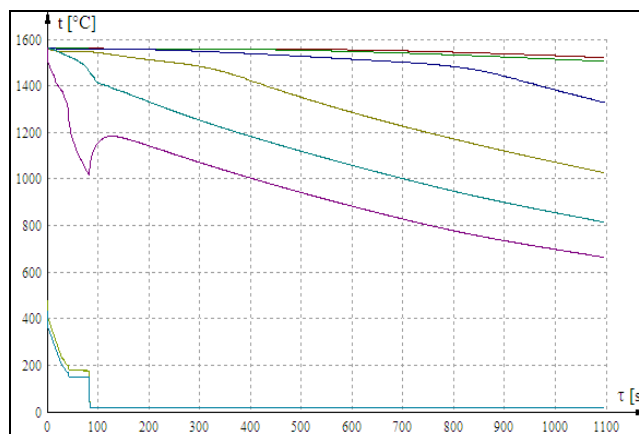
**Fig.7.84.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și timp



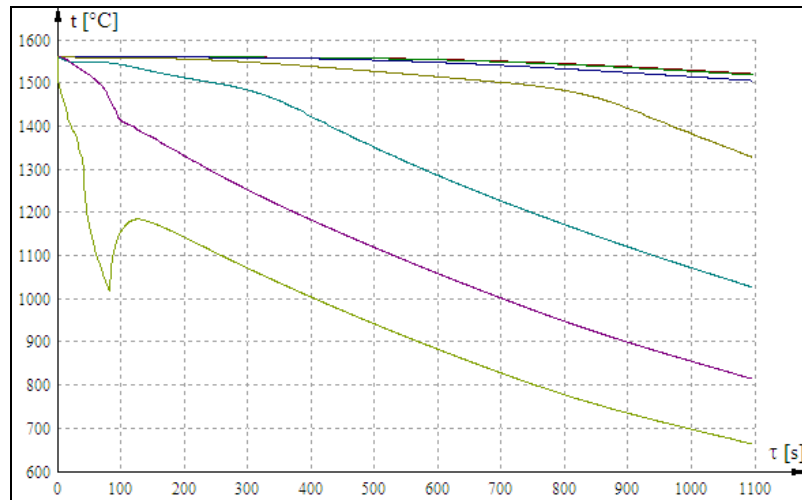
**Fig.7.85.A.** Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare



**Fig.7.86.A.** Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului)



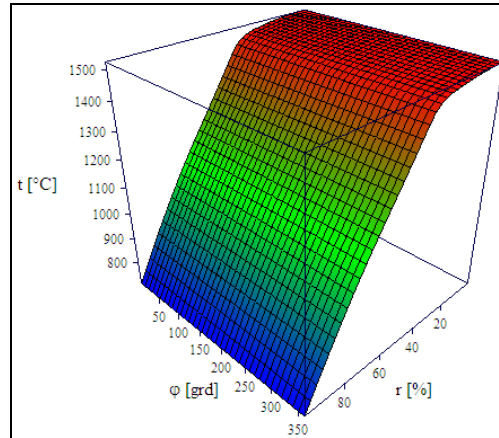
**Fig.7.87.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 50%, 75%, 90% și respectiv 100% din raza firului de turnare, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia(cea mai rece)



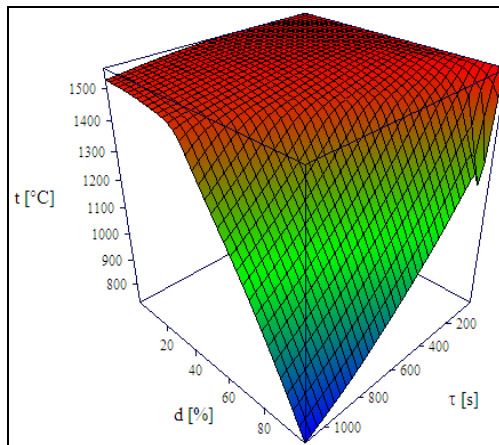
**Fig.7.88.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 10%, 25%, 50% și respectiv 100% din raza firului de turnare

Config		
Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1560	°C
Diametrul firului	350	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	60 x 60	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	5 x	-
Maximul variatiei entalpiei / iteratie	100	J/kg
Viteza de turnare	650	mm/min
Inaltimea cristalizorului	900	mm
Inaltimea camerei de ceata	11000	mm
Putere disipata in cristalizor	500	kW
Putere disipata la r. s.	2000	kW
Distributie microracitori	aleatoare repetabila	
Continut de microracitori	1	%
Diametru microracitori	1	mm
Factor de concentrare MR	5	-
Grosimea stratului de zgura	2	mm
Conduct. termica a zgurii	1.6	W/mK
Factor de negreala zgura-cupru	0.3	-
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Reset"/>		

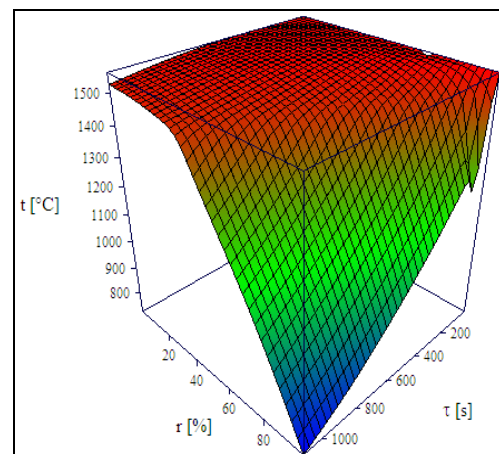
**Fig.7.89.A.** Fereastra de dialog pentru configurarea datelor de rulare a programului



**Fig.7.90.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară



**Fig.7.91.A.** Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d. Punctele sunt luate în spirală așa încât d, raza relativă și  $\varphi/2\pi$  să aibă aceeași valoare



**Fig.7.92.A.** Temperatura în funcție de raza relativă și timp

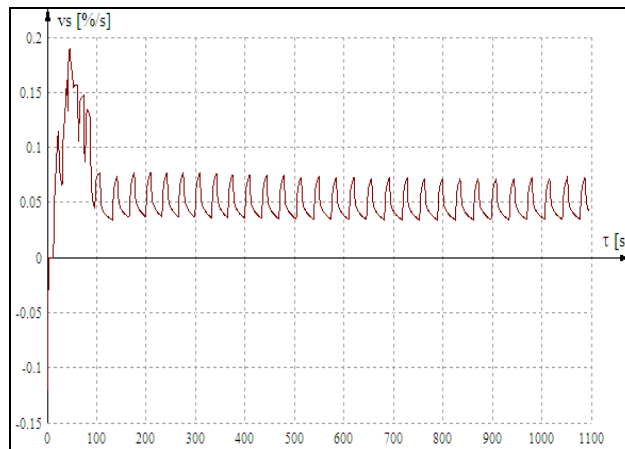


Fig.7.93.A. Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare

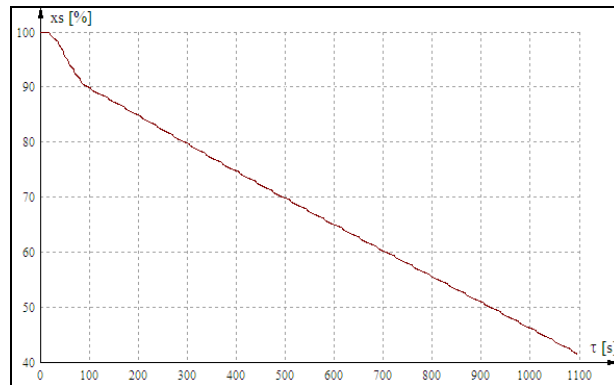
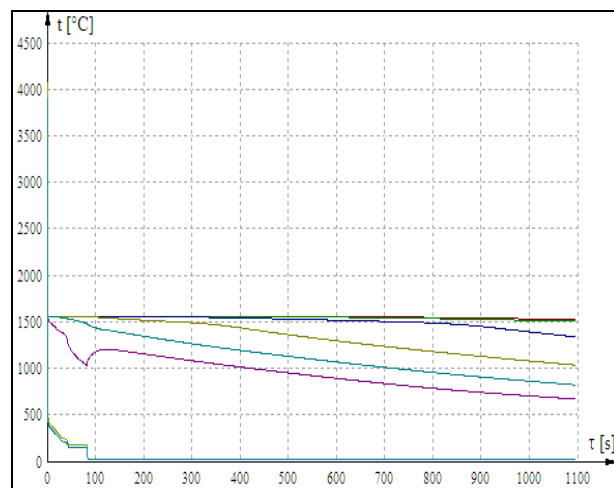
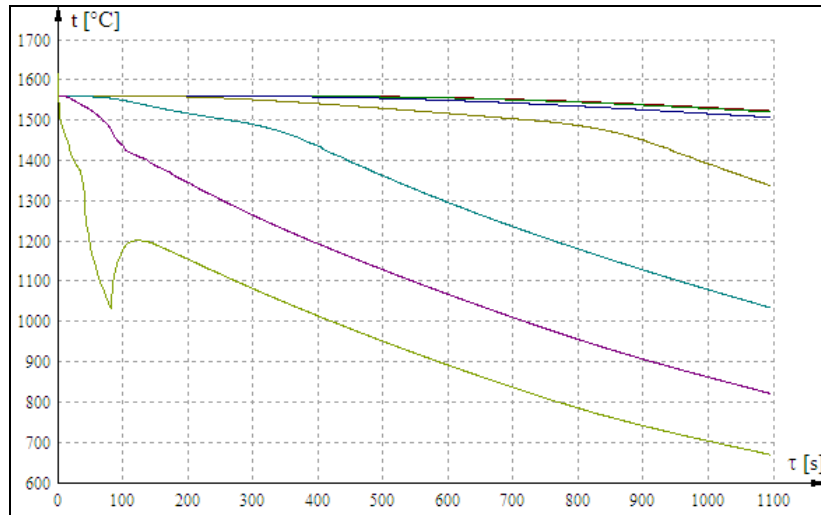


Fig.7.94.A. Raza relativă a frontului de solidificare (100% reprezintă suprafața firului)

Fig.7.95.A. Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 50%, 75%, 90% și respectiv 100% din raza firului de turnare, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia(cea mai rece)



**Fig.7.96.A.** Variația temperaturii în funcție de timp, pentru coordonata polară  $\varphi = 0$ , în puncte situate la 0%, 10%, 25%, 50% și respectiv 100% din raza firului de turnare

## BIBLIOGRAFIE

1. Nicolae, A., Ioana, A., Predescu C., Sandu, I.F., Sohaciu, M., Calea, G.G., Conducerea optimală a cuptoarelor cu arc electric, Ed. Fair Partners, București, 2002.
2. Instrucțiuni tehnologice de lucru la cuptorul EBT, SC ArcelorMittal SA Hunedoara, 2006.].
3. Nica, Ghe., Socalici, A., Ardelean E., Heput, T., Tehnologii pentru îmbunătățirea calității oțelului, Ed. Mirton, Timișoara, 2003
4. [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=ladle\\_refining](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=ladle_refining)
5. Drăgoi, F., Cercetări privind reducerea conținutului de gaze din oțelurile elaborate și tratate pe fluxul tehnologic E.B.T. - L.F., teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, 2012
6. Geantă, V., Procese și tehnologii de obținere a oțelurilor de înaltă puritate prin tratare în afara cuptorului, teză de doctorat, Universitatea Politehnica București, 1998;
7. Schuster, M., Perfecționări în tehnica turnării continue cu implicații privind calitatea semifabricatelor, reducerea consumului de metal și creșterea productivității instalațiilor, Gazeta Tehnico Științifică, ICEM, nr.3/1980
8. \*\*\* Documentația tehnică a firmei Mannesmann, 1998
9. Butnariu, I., Geantă, V., Turnarea continuă a semifabricatelor de oțel, Editura Tehnică, București, 2000;
10. \*\*\* Buletin Statistic, Informații externe, UniRomSider, 2003-2004
11. \*\*\* Stadiul tehnologic actual și tendințe de viitor în turnarea continuă, Sinteze - Documentare, 1973;
12. Ardelean, E., Heput, T., Ardelean, M., Turnarea continuă a oțelului, Editura Politehnica, Timișoara, 2001
13. [www.steeluniversity.org](http://www.steeluniversity.org)
14. [www.britanica.com](http://www.britanica.com)
15. [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com)
16. [www.steelcosmos.com](http://www.steelcosmos.com)
17. [www.amazon.com](http://www.amazon.com)
18. Popa E. M., Cercetări privind influența proceselor fizico-chimico-metalurgice ce au loc la interfețele cristalizor-zgură-oțel lichid, teza de doctorat, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 2009
19. Ardelean E., ș.a., Optimizarea proceselor la turnarea continuă a oțelului, Editura Cermi, Iași, 2007
20. Rău Al., Tripșa I., Metalurgia oțelului, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1973
21. Contract de cercetare nr.3194/13.10.2005: Optimizarea regimului termic al oțelului pe traseul cuptor-agregat de tratament termic secundar-instalație de turnare continuă, Programul de Cercetare de Excelență pentru Tinerii Cercetători, CEEEX 2005, director Grant - Ardelean E.
22. Putan Vasile, Studii asupra hidrodinamicii și regimului termic al aliajului la nivelul oalelor de turnare, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2005



23. Fredman T. P., *Heat transfer in steelmaking ladle refractories and steel temperature-a literature review*, Scandinavian Journal of Metallurgy, Vol. 29, 2000, p. 232-258.
24. Kitamura M., Kawasaki S., Kawai S, Kawai K. and Miyake K., *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, Vol. 23, 1983, p. B156.
25. Minion R.L., Leckie C.F., *Steelmaking Conference Proceedings*, Vol. 69, 1986, Iron and Steel Society, Washington, U.S.A, p. 335-343.
26. Rutqvist S., Bergman D., Olika B., *Scandinavian Journal of Metallurgy*, Vol. 19, 1990, p. 146-152.
27. Tomazin C. E., Upton E. A., Wallis R. A., *Iron Steelmaker*, June 1986, pag. 28-34.
28. Mucciardi F., *Iron Steel Eng.*, Dec. 1997, p. 24-30
29. Chen J-D., Wang P-H., *Development and application of a thermal model for the relined ladle in China Steel Corporation*, *International Journal of Energy Research*, Vol. 20, 1996, p. 423-435.
30. Olika B., Bjorkman B., *Prediction of Steel Temperature in Ladle through Time/Temperature Simulation*, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, Vol. 22, 1993, p.213-219.
31. Rees C., Poots G., Small V.J., *Applied Scientific Research*, Vol. 1-2, 1987, p.111-137.
32. Fredman T. P., Saxen H., *Model for Temperature Profile Estimation in the Refractory of a Metallurgical Ladle*, *Metall. Mater.Trans.B*, Vol.29B, 1998, p.651-659.
33. Fredman T.P., Torrkulla J., Saxén H., *Two Dimensional Dynamic Simulation of the Thermal State of Ladles*, *Metallurgical and Materials Transactions B*, 30B, 1999, 323-330.
34. Hlinka J.W., Bright, *A Model for Predicting the Thermal History of a Ladle*, *Steelmaking Conference Proceedings of ISS-AIME*, Vol. 68, (1985), p. 35-47.
35. Zoryk A., Reid P. M., *Steelmaking Conference Proceedings*, Vol. 76, 1993, Iron and Steel Society, Detroit, U.S.A., p. 31-40.
36. Prohaba M., Molinek J, Klekova Z., *Neue Hutte*, Vol. 37, 1992, p. 379-385.
37. Hoppmann W., Pfeifer, H., *Stahl Eisen*, Vol. 107, 1987, p. 27-32.
38. Hlinka, J. W., Miller T. W., *Iron Steel Eng.*, August, 1970, p. 123-133.
39. Petegnief J., Birat J.P., *La Revue de Metallurgie - CIT*, Jan., 1989, p. 47.
40. Wester J. A., *Internal technical report*, MF 2/68, 1968, MEFOS, Lulea, Sweden.
41. Jonsson K. O., *PhD Thesis in ferrous metallurgy*, 1970, MEFOS, Lulea, Sweden.
42. Reiche K., Kohn W., Wunnenberg Klaus, *Stahl Eisen*, Vol. 105, 1985, p. 41-46.
43. Grip C.E., *Measurement of Ladle Wall Temperature to Improve Control of Steel Temperature in BOF Plant*, *STEELMAKING CONFERENCE PROCEEDINGS*, Volume 77, Chicago Il, USA, (1994), p. 103 -115.
44. Grip C.E., Lampinen, H.O., *Determination of Thermal Stratification and Emptying Flow in Ladles by Continuous Temperature Measurement and Tracer Addition*, *ISIJ Int.*, Vol. 36 (1996), supplement, p. 211-214.
45. Ilegbusi O. J., Szekely J., *Melt Stratification in Ladles*, *Transactions Iron Steel Inst. Jpn.*, Vol. 27, 1987 p. 563-569.

46. Koo Y. S., Kang T., Lee I. R., ș.a., *Steelmaking Conference Proceedings*, Vol.72, 1989, Iron and Steel Society, U.S.A., p. 415-421.
47. Austin P. R., Camplin J. M., Herbertson J., Taggart I. J., *Mathematical Modelling of Thermal Stratification and Drainage of Steel Ladles*, ISIJ Int., Vol. 32, Nr.2, 1992, p.196-200.
48. Chakraborty S., Sahai Y., Effect of Slag Cover on Heat Loss and Liquid Steel Flow in Ladles before and during Teeming to a Continuous Casting Tundish, *Metallurgical Transaction B*, Vol. 23B, April, 1992, p. 135-167.
49. Grip C.E., ș.a., *Prediction of Emptying Flows in Ladles and Verification with Data from Trace Element Plant Trials*, ISIJ International, Vol. 37, Nr. 11, 1997, p.1081-1090.
50. Lowry M. L., Sahai Y., *ISS Transactions*, Vol. 14, 1993, p.17-22.
51. Barreto S.J., Barron M., Morales,R.D.,*ISIJ Int.*,Vol. 36, Nr. 5, 1996, p.543-552.
52. Damle C., Shay Y., *ISIJ Int.*, Vol. 36, Nr. 6, 1996, p. 681-689.
53. Wang J., Dai C., ș.a., *Acta Metalurgica Sinica*, Vol. 33, Nr. 5, 1997, p. 509-514.
54. Sinha A. K., Vassilicos A., *Ironmaking*, Vol. 25, Nr. 5, 1998, p. 386-393.
55. Sheng D. Y., Kim C.S., ș.a., *ISIJ Int.* Vol. 38, Nr. 8, 1998, p. 843-851.
56. Sheng D.Y., Jonsson L., *Metall. Mater. Trans. B*, Vol.30B, p. 997-985.
57. Tetileanu A., Cercetări privind rafinarea oțelului elaborat pe fluxul cuptor cu arc electric-oala cuptor- turnare continuă, teza de doctorat, Universitatea „Politehnica” Timișoara, 2013
58. Ardelean E., Hepuț T., Ardelean M., *Turnarea continua a oțelului*, Editura Politehnica Timișoara, ISBN 973-8247-18-7, 2001
59. \*\*\*Stadiul tehnologic actual și tendințe de viitor în turnarea continuă, *Sinteze-Documentare*, 1973.
60. Ioan Romulus Vasile, *Turnarea continuă a semifabricatelor rotunde- noțiuni teoretice minimale și notițe din experiența proprie*, Editura Neutrino, Reșița, 2013
61. Schwertfeger K., *Metallurgie des Stranggießes, Gießen und Erstarren von Stahl und Eisen*, Dusseldorf 1992
62. Aiordăchioaiei D., ș.a. , *Some results on neutr modeling of the steel CC process*, the Modelica Association, Modelica 2005, march 7-8, 131-140
63. Ehrenberg H., ș.a., *Internal quality of round strands for tubs and long products*, CC Confe. Mannesmann, Dusseldorf 1995
64. \*\*\*Danieli, *Oferta tehnică 1021.000/92 Danieli*, *Reconstruirea instalației de turnare continuă*, 1992
65. Zou Wen Zheng, Zou Li Xin, *Round casting at Tianjin, development and outlook*, CC Confe. Mannesmann, Dusseldorf 1995, 165
66. \*\*\*Vesuvius, *Prezentare: Accumetrix, Vesuvius' Continuous Temperature Measurement Systems*
67. [www.tms.org](http://www.tms.org)
68. Petry S., *Development of an inline thermal mold monitoring system for longitudinal crack detection*, CC Confe. Mannesmann, Dusseldorf 1995, 323
69. Ioan R., *Curs de turnare predat la Seria de Master*, Facultatea de Inginerie Hunedoara, Universitatea Politehnica București, 2001-2003
70. Kiflie B., ș.a., *Thermal Analysis of CC Process*, Fac. Of Technology, Addis Abeba University, 5<sup>th</sup> Annual Confe. on Manufacturing and Process Industry, Sep. 2002
71. Brimacombe J. K., *Canadian MetalQuart*, 1976, vol. 15, 165-175

72. Goodman T. R., Trans ASM, vol. 80, 1958, 335-342
73. Hill AWD, Journal Iron and Steel, vol. 203, 1965, 18-26
74. Hill AWD, Trans TSM-AIRE, vol 245, 1969, 1471-1474
75. Brimacombe J. K., Lait J. E., Mathematical Process Models Applied in Iron and Steelmaking, Amsterdam, 1975, 174-186
76. Miyazono K., Muchi I., Tetsu to Hogane, vol. 60, 1974, 1000-1006
77. Peaceman D. W., Rochford H. Jr. J. So., Industri. Applic. Mathematic, vol 3, 1955, 28-41
78. Carnahan B., Luther H., Wiles J. O., Applied Numerical Method, 1969, Wiley, New York
79. Meng Y., Brian G. Th., Heat transfer and solidification model of CC slab, University of Illinois, IEMeMB, vol. 4B, No. 5, Oct. 2003, 685-705
80. Lanyi M.D., Rosa C.J., Viscosity of Casting Fluxes Used During CC of Steel, Metall. Trans. B, 1981, vol. 12B, 287-298.
81. \*\*\*RHI-Refractoris, Dry Setting Mixes for Tundish, December 2005
82. Kagawa A., Okamoto T., Influence of Alloying Elements on Temperature and Composition for Peritectic Reaction in Plain Carbon Steels, MS., 1986, vol.2, 997-1008.
83. Won Y. M., Thomas B. G., Simple model of microsegregation during solidification of steels, Metallurgical and Materials Transactions, 2001, vol. 32A(7), 1755-1767
84. Myers, R., Montgomery, D., Anderson-Cook, C.M., Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments, Wiley, ISBN: 978-0-470-17446-3, 2009.
85. Consluk J., Optimal Response Surface Design in Monte Carlo Sampling Experiments, Annals of Economic and Social Measurement, 3/3, pp. 463-473, 1974.
86. JMP, Design of Experiments, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA, ISBN 1-59047-816-9, 2005.
87. Miller S., The Method of Least Squares, Mathematics Department Brown University Providence, RI 02912.
88. Maksay St., Bistriian D., Introducere În Metoda Elementelor Finite, Editura Cermi Iasi, ISBN 978-973-667-324-5, 2008.
89. Bistriian D., Stoica D., Maksay St., Matematici Asistate De Calculator- Aplicații, Editura Politehnica Timisoara, ISBN 978-606-554-076-7, 2009.
90. Ardelean E., Turnarea semifabricatelor de oțel, Ed. Mirton Timișoara, 2004.
91. \*\*\*- International Iron and Steel Institute-Steel Statistical Yearbook 2002, Committee on Economic Studies, Brussels 2002
92. Efimov V.A., Turnarea și cristalizarea oțelurilor, Ed. Tehnică, București, 1980
93. Continous casting of steel 1985, A Second Study, International Iron and Steel Institute, Brussels, 1986.
94. \*\*\* Continous Casting Conference, Linz, 1996
95. \*\*\* La Revue de Metalurgie, nr.4, 1997
96. \*\*\* Revista Metalurgia, nr. 12, 2001
97. \*\*\* Revista Metalurgia, nr.10, 2002
98. Popa E., Rezultate experimentare privind influența parametrilor turnării asupra temperaturii suprafeței semifabricatului turnat continuu A X-a Sesiune de comunicări științifice cu participare internațională, SIBIU 2005.
99. Popa E., Study regarding the mass and heat transfer in the crystallizing vessel of the continous casting machine, ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY 2006, Vol. V

100. V.N. Constantinescu, *Dinamica Fluidelor Vîscoase în regim laminar*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, 1987.
101. Polyanin A.D., Kutepov A.M., Vyazmin A.V., Kazenin D.A., *Hydrodynamics, Mass and Heat Transfer in Chemical Engineering*, Taylor & Francis, London, 2002, ISBN 0-415-27237-8
102. [Lăscuțoni A.](#), [Ardelean E.](#), [Heput T.](#), Thermal Optimization Of Steel At Continuous Casting, 12th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Mathematical Methods in Economics and Engineering, Rhodes, Greece, 22-28 September 2014
103. [Lăscuțoni A.](#), [Ardelean E.](#), [Pascu L.](#), [Heput T.](#), Mathematical model regarding at addition of microcoolers in tundish of continuous casting machines, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Rhodos, Greece, Sep.21-27, 2013, Volume 1558, pp.1333-1336.
104. [Lăscuțoni A.](#), [Ardelean E.](#), Socalici A., Ardelean M., Mathematical modeling of micro - coolers added in the continuous casting tundish, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Rhodos, Greece, Sep. 21-27, 2013, Volume 1558, pp.1603-1606.
105. [Pascu L.](#), [Putan A.](#), [Putan V.](#), [Lăscuțoni A.](#), Analysis on the similarity between steel ladles and hot-water models regarding natural convection phenomena, ICNAAM, Greece, 19-25 Sep., 2012, Vol.1479, p.767-770.
106. [Lăscuțoni A.](#), [Ardelean E.](#), [Heput T.](#), Optimization of heat transfer on distributor, depending on the thickness of powder coating using surface answer method, Annals of Faculty Engineering Hunedoara, Tom XII, Fascicule 3, August 2014, pp. 303 - 306, accredited and ranked in the B+ category by CNCSIS.
107. 107. Popa E., Pascu L., Socalici A., Lăscuțoni A., Industrial research on the quality of brake shoes meant for rolling stock, International Conference on Applied Sciences ICAS 2014, Hunedoara, 2-4 october 2014.
108. [Ardelean E.](#), Ardelean M., [Heput T.](#), Lăscuțoni A., Technological aspects at continuous casting of semi-finished products with  $\Phi 270$ mm, International Conference on Applied Sciences ICAS 2014, Hunedoara, 2-4 october 2014.
109. Lăscuțoni A., Steel thermal stratification during stationary period in ladle, Acta Tehnica Corviniensis – Buletin of Engineering Hunedoara, Tom VII, Fascicule 4, October - December 2014, pp.153-158, accredited and ranked in the B+ category by CNCSIS.
110. Lăscuțoni A., [Ardelean E.](#), A study of steel thermal regime in the continuous casting tundish, Annals of Faculty Engineering Hunedoara, Tom XII, Fascicule 4, November 2014, pp.173-177, accredited and ranked in the B+ category by CNCSIS.



