

CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA PRECESELOR FIZICO-CHIMICO- METALURGICE CE AU LOC LA INTERFEȚELE CRISTALIZOR- ZGURĂ-OȚEL LICHID

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR
de către

Ing. POPA MONIKA ERIKA

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. SPOREA ION
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. SOFRONIE
prof.univ.dr.ing. BRATU CONSTANTIN.
Prof.univ.dr.ing. HEPUJ TEODOR

Ziua susținerii tezei: 15.12.2009

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

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

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

Cuvânt înainte

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

Procesul de turnare continuă a oțelului, atât sub aspect tehnologic cât și a celui referitor la parametrii instalației de turnare continuă, a fost și reprezintă în continuare o preocupare de bază a tuturor specialiștilor din marile firme producătoare de oțel.

În stabilirea liniei de cercetare proprie am plecat de la concluziile pe care le-am desprins în urma cercetării bibliografice, ținând cont de următoarele:

- calitatea semifabricatelor turnate continuu din oțel este influențată în mod deosebit de doi parametri de turnare, temperatura oțelului lichid și răcirea secundară;
- parametrii procesului de turnare continuă a oțelului reprezintă factorul definitoriu al conceptului, influențând întreaga tehnologie de lucru cu repercurșiuni nemijlocite asupra calității semifabricatelor și asupra indicatorilor tehnico-economici;
- în contextul unei concurențe acerbe pe piața oțelului, cunoașterea modalităților de influențare a factorilor tehnologici asupra calității semifabricatelor turnate continuu este de foarte mare importanță.

În teza de doctorat propusă prin tematica abordată, se urmărește clarificarea unor probleme cu privire la realizarea unei structuri cristaline îmbunătățite a semifabricatelor turnate continuu, prin utilizarea adaosului de microrăcitori în acesta, în timpul turnării continue a oțelului.

În cadrul temei propuse pentru experimentările industriale s-au utilizat ca și microrăcitori pilitura de oțel cu granulație cuprinsă în intervalul 0.074-0.5mm și granule de oțel cu dimensiuni sub 1mm. Având în vedere faptul că producerea pulberilor metalice necesită instalații performante și de asemenea au un cost foarte ridicat, experimentările industriale s-au axat pe utilizarea de microrăcitori sub formă de granule obținuți prin tăiere de sârmă laminată de aceeași marcă cu oțelul turnat sau marca apropiată, având diametrul sub 1mm.

Cu această ocazie doresc să îmi exprim întreaga recunoștință conducătorului de doctorat Prof.dr.ing. Ion Sporea, adresându-i multe mulțumiri pentru sprijinul acordat, sugestiile și îndrumările primite pe tot parcursul elaborării tezei de doctorat. De asemenea mulțumesc pe această cale:

Colegiilor de la Facultatea de Inginerie Hunedoara pentru sugestiile date la redactarea lucrării și în special domnului decan Prof. dr. ing. Teodor Hepuț, care mi-a acordat tot sprijinul.

Doamnei ing. Mariana Hodean de la S.C. ArcelorMittal HUNEDOARA, Secția TURNARE CONTINUA.

Nu în ultimul rând, vreau să mulțumesc soțului meu Victor și băiețelului meu Andrei, pentru răbdarea, încurajările și susținerea de care au dat dovadă în această perioadă de timp, precum și părinților mei care poate de undeva dintre stele mă privesc și se bucură.

POPA, Monika Erika

CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA PROCESELOR FIZICO-CHIMICO-METALURGICE CE AU LOC LA INTERFEȚELE CRISTALIZOR-ZGURĂ-OȚEL LICHID ASUPRA CALITĂȚII OȚELULUI TURNAT CONTINUU

Teze de doctorat ale UPT, Seria 11, Nr. YY, Editura Politehnica, 2009, 279 pagini, 135 figuri, 28 tabele.

ISSN:uuuu-vvvv

ISBN (10):; ISBN (13):

Cuvinte cheie: oțel turnat continuu, cristalizor, zgură, oțel lichid, microrăcitori, calitate

Rezumat ,

Scopul tezei de doctorat constă în obținerea unui model de simulare numerică, general valabil și aplicabil tuturor cazurilor particulare de turnare continuă, model cu ajutorul căruia să poată fi studiată posibilitatea optimizării:

- regimului curgerii aliajului lichid,
- a distribuției câmpului de temperaturi,
- a fazei lichide,
- a contracției în timpul solidificării,

cu cost minim (necesar acoperirii cheltuielilor cu echipamentul de calcul și software), într-un timp foarte scurt etc.

Direcția de cercetare a tezei o reprezintă determinarea principalelor variabile ale procesului, care influențează calitatea semifabricatelor din oțel turnat continuu și stabilirea relațiilor de interdependență; definirea conceptului de turnare și identificarea principalilor parametrii de turnare, factori tehnologici și perturbatori; analiza transferului termic la turnarea continuă a semifabricatelor din oțel, în scopul identificării unor ipoteze care să permită obținerea unor ecuații simplificate pentru calculul grosimii crustei solidificate ținând seama de cele două zone de răcire (primară și secundară).

Conținând un număr de 8 capitole, prezenta teză poate fi structurată pe două părți. În prima parte a lucrării se încadrează capitolele 1 – 4 care prezintă date referitoare la influența proceselor fizico-chimico-metalurgice ce au loc la interfața-cristalizor-zgură-oțel.

Capitolele 5-7 prezintă experimentările propriu-zise.

Teza de doctorat se încheie cu capitolul 8 în care se prezintă concluziile finale.

CUPRINS

	INTRODUCERE	13
1.	STADIUL ACTUAL ȘI PERSPECTIVE PRIVIND PROCESUL DE TURNARE CONTINUĂ A OȚELULUI	15
1.1.	Scurt istoric al turnării continue	15
1.2.	Factorii care au impus extinderea tehnologiei de turnare continuă	19
1.3.	Avantajele procedurii de turnare continuă a oțelului	20
1.4.	Perfecționări ale tehnologiei de turnare continuă la nivel mondial	21
1.4.1.	Ponderea oțelului turnat continuu	21
1.5.	Stadiul actual al turnării continue în România	23
1.5.1.	Caracteristici dimensionale	23
1.5.2.	Caracteristici privind compoziția chimică a oțelului	24
1.6.	Producători de instalații pentru turnarea continuă	25
1.7.	Producători de semifabricate turnate din oțel	27
1.7.1.	Producători de țagle	27
1.7.2.	Producători de brame	29
1.8.	Preocupări privitoare la cercetarea procesului de turnare continuă a oțelului	31
1.8.1.	Perfecționări la nivel mondial a procesului de turnare continuă realizate de producătorii de instalații și semifabricate	31
1.8.2.	Perspectiva creșterii ponderii oțelului turnat continuu și tendințe de evoluție a producției mondiale de oțel	32
1.9.	Concluzii	34
2.	STUDIUL PARAMETRIILOR TEHNOLOGICI AI PROCESULUI DE TURNARE CONTINUĂ ȘI INFLUENȚA LOR ASUPRA PROCESULUI DE SOLIDIFICARE	35
2.1.	Factori de influență la turnarea continuă	35
2.1.1.	Temperatura de turnare	38
2.1.2.	Timpul de turnare	41
2.1.3.	Viteza de turnare	42
2.2.	Solidificarea oțelului	44
2.2.1.	Formarea crustei de oțel și înaintarea frontului de solidificare	47
2.2.2.	Rezistența mecanică a crustei de oțel formată în cristalizor	50
2.2.3.	Formarea zonei axiale a semifabricatului	51
2.3.	Cristalizorul, oscilatorul și lubrifierea în cristalizor	53
2.4.	Concluzii	60
3.	ANALIZA INFLUENȚEI PROCESULUI DE SOLIDIFICARE ASUPRA CALITĂȚII OȚELULUI	62
3.1.	Concluzii	68
4.	ANALIZA PRIVIND INFLUENȚA PRAFURILOR DE TURNARE ASUPRA PROCESULUI DE TURNARE CONTINUĂ	70
4.1.	Introducere	70
4.2.	Compoziția chimică și mineralogică	70
4.3.	Fuzibilitatea	71
4.4.	Vâscozitatea	76
4.5.	Tensiunea interfațială	85
4.6.	Finețea de măcinare	87
4.7.	Umiditatea	87
4.8.	Comportarea prafului de turnare în cristalizor	88
4.9.	Specificația și încercarea prafului de turnare	88
4.10.	Concluzii	89
5.	EXPERIMENTĂRI TEHNOLOGICE PRIVIND PRODUCEREA ȘI UTILIZAREA PRAFURILOR DE TURNARE CONTINUĂ LA OȚELĂRIA ELECTRICĂ 2	90

	ARCELOR MITTAL STEEL HUNEDOARA	
5.1.	Alegerea materialelor și stabilirea componenței prafurilor de turnare	90
5.2.	Producerea prafurilor de turnare	91
5.3.	Experimentarea prafurilor de turnare	93
5.4.	Concluzii	95
6.	MODELUL MATEMATIC DE SIMULARE A SOLIDIFICĂRII SEMIFABRICATELOR TURNATE CONTINUU CU ADAOS DE MICRORĂCITORI	98
6.1.	Cercetări cu privire la îmbunătățirea structurii semifabricatelor turnate continuu	98
6.2.	Obținerea microrăcitorilor	104
6.3.	Pregătirea microrăcitorilor pe caracteristici calitative	104
6.4.	Întocmirea modelului matematic	106
6.4.1.	Modelarea prin metoda diferențelor finite	106
6.4.2.	Criteriul de stabilitate a ecuațiilor cu diferențe finite	109
6.4.3.	Modelul bidimensional al solidificării și răcirii semifabricatului	110
6.4.4.	Desfășurarea calculelor și funcționarea programului	112
6.4.5.	Conductibilitatea termică	113
6.4.6.	Temperatura redusă	114
6.4.7.	Dependența entalpiei de temperatură	115
6.4.8.	Relațiile de calcul utilizate în program	115
6.5.	Realizarea programului de solidificare a semifabricatelor turnate continuu	118
6.6.	Simularea solidificării semifabricatelor turnate continuu cu adaos de microrăcitori în cristalizor	120
6.6.1.	Realizarea simulării solidificării semifabricatelor turnate continuu cu adaos de microrăcitori în cristalizor	120
6.6.2.	Realizarea simulării solidificării țagtelor rotunde turnate continuu cu 3% adaos de microrăcitori în cristalizor	140
6.7.	Concluzii	157
7.	CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI INDUSTRIALE REFERITOARE LA CALITATEA SEMIFABRICATELOR TURNATE CONTINUU	159
7.1.	S.C. ArcelorMittal HUNEDOARA – Instalația de producere a oțelului lichid și a produselor din oțel	159
7.1.1.	Prezentarea S.C. ArcelorMittal HUNEDOARA	160
7.2.	Experimentări propriu-zise. Defecte de turnare specifice țagtelor turnate continuu	162
7.2.1.	Defecte de suprafață	165
7.2.1.1.	Crăpături	165
7.2.1.2.	Depresiuni	168
7.2.1.3.	Găuri	169
7.2.1.4.	Întrerupere turnare	170
7.2.1.5.	Retasura de capăt	171
7.2.2.	Defecte interne	172
7.2.2.1.	Fisuri	172
7.2.2.2.	Microretasura	173
7.2.2.3.	Porozitate centrala	174
7.2.2.4.	Incluziuni	174
7.2.2.5.	Segregațiile	175
7.2.3.	Defecte de formă	175
7.2.3.1.	Ovalizarea	175
7.2.3.2.	Curbură	176
7.2.4.	Defecte mecanice	177
7.2.4.1.	Urma de rolă	177
7.2.4.2.	Presare rolă	178
7.2.5.	Abateri de la compoziția chimică	178
7.3.	Concluzii	179
8.	CONCLUZII FINALE	181
	ANEXE	187
	BIBLIOGRAFIA	251

Listă de tabele

Tabelul 1.1.	Numărul instalațiilor de turnare continuă existente în perioada 1955-1966	17
Tabelul 1.2.	Structura dimensională a țaglelor turnate continuu la nivel mondial	22
Tabelul 1.3.	Ponderea pe dimensiuni a blumurilor turnate continuu în unele țări	22
Tabelul 1.4.	Structura sortimentelor de oțel turnate continuu în blumuri și țagle la nivel mondial	22
Tabelul 1.5.	Producția de oțelului tunat continuu în România	30
Tabelul 1.6.	Producția de oțel pe zone	33
Tabelul 2.1.	Viteza de răcire a metalului funcție de capacitatea oalei de turnare	40
Tabelul 2.2.	Timpul de turnare din oală, funcție de mărimea semifabricatului	42
Tabelul 2.3.	Viteza de turnare funcție de mărimea semifabricatului	43
Tabelul 2.4.	Timpii de solidificare la turnarea în lingouri și la turnarea continuă	46
Tabelul 2.5.	Compoziția chimică și principalele caracteristici ale unor fluxuri de lubrifiere utilizate industrial	54
Tabelul 2.6.	Coeficienți de dilatare pentru diferite elemente	56
Tabelul 4.1.	Compoziția chimică și temperatura de topire a eutecticelor	72
Tabelul 4.2.	Criteriile de determinare a prafurilor	89
Tabelul 5.1.	Limitele de variație pentru compoziția chimică a materiilor prime folosite pentru producere prafurilor de lubrifiere	98
Tabelul 5.2.	Compoziția chimică și masa volumică a materiilor prime folosite pentru producerea prafurilor de lubrifiere	96
Tabelul 5.3.	Componența rețetelor	91
Tabelul 5.4.	Componența și compoziția chimică pentru rețeta nr.	96
Tabelul 5.5.	Componența și compoziția chimică pentru rețeta nr.2	97
Tabelul 5.6.	Componența și compoziția chimică pentru rețeta nr.3	97
Tabelul 5.7.	Componența și compoziția chimică pentru rețeta nr.4	98
Tabelul 5.8.	Principalele proprietăți ale prafurilor de turnare	91
Tabelul 5.9.	Caracteristicile prafului etalon	92
Tabelul .10.	Rețete derivate din rețeta de bază	94
Tabelul5.11.	Compozițiile chimice ale rețetelor derivate obținute conform buletinului de analiză	94
Tabelul 6.1.	Valorile experimentale și cele aproximative	113
Tabelul 6.2.	Valorile entalpiei în funcție de temperatură	115
Tabelul 7.1.	Compoziția chimică a șarjelor	164

Listă de figuri

Figura 2.1.	Instalația de turnare continuă. Părți componente.	36
Figura 2.2.	Turnarea oțelului din distribuitor în cristalizor	37
Figura 2.3.	Variația timpului de turnare în funcție de mărimea formatului turnat continuu	42
Figura 2.4.	Variația vitezei de turnare în funcție de mărimea formatului semifabricatului turnat continuu	43
Figura 2.5.	Schema solidificării primare și secundare la turnarea continuă	45
Figura 2.6.	Determinarea adâncimii și forme concavității cu metal lichid prin introducerea în semifabricat a plumbului și a izotopului radioactiv de fosfor	48
Figura 2.7.	Variația grosimii crustei pe înălțimea unui semifabricat cu secțiunea de 150 x 475 mm, turnat cu o viteză de 700 mm/min	48
Figura 2.8.	Fisuri longitudinale interne scurte, foarte aproape de suprafață	52
Figura 3.1.	Reprezentarea schematică a variației temperaturii în zona cristalizorului la turnarea continuă	63
Figura 4.1.	Sistemul $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$	71
Figura 4.2.	Diagrama de echilibru termic $\text{CaO} - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$.	72
Figura 4.3.	Sistemul $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO}$. a - eutectice; b - izoterme	73
Figura 4.4.	Diagrama de echilibru a sistemului $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO}$, pentru 5% Al_2O_3	73
Figura 4.5.	Diagrama de echilibru a sistemului $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO}$, pentru 10% Al_2O_3	74
Figura 4.6.	Diagrama de echilibru a sistemului $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO}$, pentru 15% Al_2O_3	75
Figura 4.7.	Diagrama de echilibru a sistemului $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$	75
Figura 4.8.	Sistemul de echilibru $\text{CaF}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ și $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$	76
Figura 4.9.	Diagrama vâscozității după relația lui Arhenius	78
Figura 4.10.	Reprezentarea izocomelor sistemului $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ la temperaturile de a. 1400, b. 1500 și c. 1600°C	78
Figura4.11a.	Vâscozitatea zgurei de turnare continuă în funcție de conținutul de Al_2O_3 la temperatura de 1300 °C	78
Figura4.11b.	Vâscozitatea zgurei de turnare continuă în funcție de conținutul de Al_2O_3 la temperatura de 1350 °C	79
Figura4.11c.	Vâscozitatea zgurei de turnare continuă în funcție de conținutul de Al_2O_3 la temperatura de 1400 °C	79
Figura4.11d.	Vâscozitatea zgurei de turnare continuă în funcție de temperatura și de conținutul de Al_2O_3	80
Figura 4.12.	Influența raportului $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ asupra vâscozității	80
Figura4.13a.	Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/1$	81
Figura4.13b.	Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/2$	81
Figura4.13c.	Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/3$	81
Figura4.13d.	Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/4$	82
Figura4.13e.	Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/5$	82
Figura 4.14.	Influența raportului $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ asupra vâscozității, la 5%MgO	83

Figura 4.15.	Influența raportului Al_2O_3 / SiO_2 asupra vâscozității, la 10%MgO	83
Figura 4.16.	Influența raportului Al_2O_3 / SiO_2 asupra vâscozității, la 15%MgO	84
Figura 4.17.	Izocome în sistemul $SiO_2-Al_2O_3-CaO-MgO$ la 10% MgO	85
Figura 4.18.	Variația vâscozității în funcție de temperatură	86
Figura 6.1.	Nod în interiorul semifabricatului	107
Figura 6.2.	Schema rețelei utilizate la aplicarea metodei diferențelor finite	111
Figura 6.3	Dependența $\lambda(T)$, valori experimentale (punctele) și approximate	114
Figura 6.4.	Dependența $\lambda(T)$, rezultată din simulare	114
Figura 6.5.	Dependența $H(T)$	116
Figura 6.6.	Fereastra de dialog pentru progresul calculilor	119
Figura 6.7.	Interfața principală a programul	120
Figura 6.8.	Fereastră de dialog pentru stabilirea datelor de rulare a programului	121
Figura 6.9.	Ferestrele de dialog	122
Figura 6.10.	Ferestrele de dialog la sfârșitul rulării programului	123
Figura 6.11.	Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 1% adaos uniform de microrăcitori	123
Figura 6.12.	Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp	124
Figura 6.13.	Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 1% adaos aleator repetat de microrăcitori	124
Figura 6.14.	Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 2% adaos uniform de microrăcitori	124
Figura 6.15.	Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 2% adaos aleator de microrăcitori	125
Figura 6.16.	Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 2% adaos aleator repetat de microrăcitori	125
Figura 6.17.	Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 1% adaos uniform de microrăcitori	126
Figura 6.18.	Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 1% adaos aleator de microrăcitori	126
Figura 6.19.	Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 1% adaos aleator repetat de microrăcitori	126
Figura 6.20.	Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 2% adaos uniform de microrăcitori	127
Figura 6.21.	Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 2% adaos aleator de microrăcitori	127
Figura 6.22.	Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 2% adaos aleator repetat de microrăcitori	127
Figura 6.23.	Variația temperaturii din fir și cristalizor, în funcție de timp, 1% adaos uniform de microrăcitori	128
Figura 6.24.	Variația temperaturii din fir și cristalizor, în funcție de timp, 2% adaos aleatoriu repetat de microrăcitori	128
Figura 6.25.	Distribuția temperaturilor în semifabricat, 1% adaos uniform de microrăcitori: a – 3s; b – 10s; c – 30s; d - la sfârșitul rulării programului	129
Figura 6.26.	Distribuția temperaturilor în semifabricat, 1% adaos aleator de microrăcitori: a – 3s; b – 10s; c – 30s; d - la sfârșitul rulării programului	139
Figura 6.27.	Distribuția temperaturilor în semifabricat, 1% adaos aleatoriu rep. de microrăcitori: a – 3s; b – 10s; c – 30s; d – 50s, e– 60s, f – la sfârșitul rulării programului	131
Figura 6.28.	Distribuția temperaturilor în semifabricat, 2% adaos uniform de microrăcitori: a – 3s; b – 10s; c – 30s; d - 50s, e– 60s, f – la sfârșitul rulării programului la sfârșitul rulării programului	132

Figura 6.29.	Distribuția temperaturilor în semifabricat, 2% adaos aleatoriu de microrăcitori: a – 3s; b – 10s; c – 30s; d – 50s, e– 60s, f – la sfârșitul rulării programului la sfârșitul rulării programului	133
Figura 6.30.	Distribuția temperaturilor în semifabricat, 2% adaos aleat.repetat de microrăcitori: a – 3s; b – 10s; c – 30s; d - la sfârșitul rulării programului	134
Figura 6.31.	Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul axei x pentru $y = 0$, în funcție de timp, 1% adaos uniform de microrăcitori	135
Figura 6.32.	Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul axei x pentru $y = 0$, în funcție de timp, 2% adaos aleatoriu repetat de microrăcitori	135
Figura 6.33.	Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul diagonalei, în funcție de timp, 1%adaos uniform de microrăcitori	135
Figura 6.34.	Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul diagonalei, în funcție de timp, 2%adaos aleatoriu repetat de microrăcitori	136
Figura 6.35.	Variația în timp a vitezei de solidificare, 1%adaos uniform de microrăcitori	134
Figura 6.36.	Variația în timp a vitezei de solidificare, 1%adaos aleatoriu de microrăcitori	136
Figura 6.37	Variația în timp a vitezei de solidificare, 1% adaos aleatoriu repetat de microrăcitori	137
Figura 6.38.	Variația în timp a vitezei de solidificare, 2%adaos uniform de microrăcitori	137
Figura 6.39.	Variația în timp a vitezei de solidificare, 2%adaos aleatoriu de microrăcitori	138
Figura 6.40.	Variația în timp a vitezei de solidificare, 2%adaos aleatoriu repetat de microrăcitori	138
Figura 6.41.	Variația grosimii crustei solidificate în timp, 1%adaos uniform de microrăcitori	138
Figura 6.42.	Variația grosimii crustei solidificate în timp, 1%adaos aleatoriu de microrăcitori	139
Figura 6.43.	Variația grosimii crustei solidificate în timp, 1%adaos aleatoriu repetat de microrăcitori	139
Figura 6.44.	Variația grosimii crustei solidificate în timp, 2%adaos uniform de microrăcitori	139
Figura 6.45.	Variația grosimii crustei solidificate în timp, 2%adaos aleatoriu de microrăcitori	140
Figura 6.46.	Variația grosimii crustei solidificate în timp, 2%adaos aleatoriu repetat de microrăcitori	140
Figura 6.47.	Interfața principală a programului	141
Figura 6.48.	Fereastra de dialog pentru progresul calculelor	141
Figura 6.49.	Fereastră de dialog pentru stabilirea datelor de rulare a programului	142
Figura 6.50.	Conductivitatea termică a oțelului în funcție de temperatură	143
Figura 6.51.	Funcția directă $\Phi(t)$	143
Figura 6.52.	Funcția inversă $t(\Phi)$	144
Figura 6.53.	Entalpia în funcție de temperatură	144
Figura 6.54.	Temperatura funcție de entalpie	145
Figura 6.55.	Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 10%, 25%, 50% și 100% din raza firului de turnare	145
Figura 6.56.	Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în	146

	puncte situate la coordonatele 1%, 5%, 10%, 50% și 100%	
Figura 6.57.	Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 50%, 75%, 90%, 100% din raza cristalizorului	146
Figura 6.58.	Raza relativă a frontului de solidificare	147
Figura 6.59.	Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare	147
Figura 6.60.	Temperatura în funcție de raza relativă și timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$	148
Figura 6.61.	Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d	148
Figura 6.62.	Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 10 s	149
Figura 6.63.	Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 60 s	149
Figura 6.64.	Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 217 s	149
Figura 6.65.	Ferestrele de dialog cu adaos 3%microrăcitori	150
Figura 6.66.	Ferestrele de dialog la sfârșitul rulării programului	151
Figura 6.67.	Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 10%, 25%, 50% și 100% din raza firului de turnare	152
Figura 6.68.	Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la coordonatele 1%, 5%, 10%, 50% și 100% – unde 0% este suprafața de separare fir-cristalizer iar 100% suprafața exterioară a cristalizorului	152
Figura 6.69.	Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 50%, 75%, 90%, 100% din raza cristalizorului, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia (cea mai rece)	152
Figura 6.70.	Raza relativă a frontului de solidificare (100% = suprafața firului)	153
Figura 6.71.	Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare	153
Figura 6.72.	Temperatura în funcție de raza relativă și timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$	154
Figura 6.73.	Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d	154
Figura 6.74.	Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 10 s	154
Figura 6.75.	Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 60 s	155
Figura 6.76.	Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 217 s	155
Figura 6.77.	Distribuția temperaturilor din semifabricat în funcție de raza relativă și coordonata polară la: 1s, 2s, 5s, 8s, 20s, 30s	156
Figura 6.78.	Distribuția temperaturilor din semifabricat în funcție de raza relativă și coordonata polară la : 40s, 75s, 140s și 190s	157
Figura 7.1.	Instalația de turnare continuă-S.C. ArcelorMittal Hunedoara	161
Figura 7.2.	Ponderea blumului turnat continuu	162
Figura 7.3.	Ponderea oțelurilor de masă, carbon superioare, slab aliate și aliate turnate continuu	163
Figura 7.4.	Ponderea sortimentală	163
Figura 7.5.	Crăpături longitudinale	166
Figura 7.6.	Crăpături transversale	167
Figura 7.7.	Crăpături stelare	167
Figura 7.8.	Depresiuni longitudinale	168
Figura 7.9.	Depresiuni transversale	169
Figura 7.10.	Găuri	170
Figura 7.11.	Întrerupere turnare	171
Figura 7.12.	Retasură de capăt	171
Figura 7.13.	Fisuri interne marginale	172

Figura 7.14.	Fisuri interne la centru	173
Figura 7.15.	Microretasura	173
Figura 7.16.	Porozitate centrală	174
Figura 7.17.	Incluziuni	175
Figura 7.18.	Bare ovalizate	176
Figura 7.19.	Bare prezentând defectul de curbura	177
Figura 7.20.	Urma de rolă	177
Figura 7.21.	Presare rolă	178

INTRODUCERE

Ultimul deceniu al secolului XX și primul deceniu al secolului XXI marchează pentru siderurgia mondială o etapă esențială care face trecerea de la fabricația clasică la producerea semifabricatelor în condițiile de calitate conform ISO 9000. Acest concept este cel care va marca prin importanță și însemnătatea care îi este dată primii ani ai noului mileniu. Este de la sine înțeles că alinierea la standardele care definesc această noțiune va fi o problemă esențială a fiecărui producător în parte, dar și al industriei în general, opinia experților ISO fiind aceea că, la sfârșitul mileniului, 95% din produsele existente pe piața mondială vor fi supuse certificării.

Aceasta este deci direcția pe care trebuie să se înscrie și activitatea de cercetare în metalurgia oțelului, indiferent de subdomeniul de activitate. Astfel, în domeniul turnării și solidificării oțelului trebuie ca eforturile să fie îndreptate spre elucidarea fenomenelor fizico-chimice și a mecanismelor prin care o compoziție chimică a unui oțel, turnat și solidificat în anumite limite tehnologice constituie în urma proceselor de deformare plastică, la obținerea proprietăților fizico-mecanice la limitele superioare ale normelor în vigoare.

Siderurgia românească după 1990 s-a confruntat, atât cu situația grea generată de căderea dramatică a pieței interne și de decalajul tehnologic, cât și cu dificultăți în respectarea regulilor impuse de poziția sa pe piața liberă, globalizată la nivel mondial. Aceste reguli presupun performanțe economice la grade înalte de viabilitate, întrucât interzic cu desăvârșire subvențiile-indiferent de natura lor cu excepția unor programe aprobate și monitorizate la nivelul Uniunii Europene.

Principalele acțiuni ale procesului de restructurare ce a avut loc în siderurgia românească în ultimii ani au vizat în principal modernizarea capacităților de elaborare oțel rămase în funcțiune și echiparea acestora cu instalații și utilaje competitive la nivel european.

Viitorul turnării continue în România este strâns legat de performanțele industriei producătoare de oțel în general. Într-o economie concurențială, oțelul trebuie să fie mai ieftin și în același timp mai bun comparativ cu alte materiale. În acest context, turnarea continuă s-a dovedit deschisă la modernizare, tendință care se va menține atât timp cât acest procedeu tehnologic va rămâne deschis la investiții în cercetare și dezvoltare, chiar și cu riscul creșterii costurilor suplimentare.

Cercetarea experimentală în domeniul turnării continue prezintă dezavantaje importante, întrucât este un domeniu greu abordabil din cauza acurateței maxime care trebuie acordată experimentului, în caz contrar, rezultatele obținute fiind neconcludente, precum și prin prisma costurilor foarte mari ale unei astfel de cercetări științifice.

Tendința actuală în studierea influenței parametrilor tehnologici asupra calității semifabricatelor turnate continuu este utilizarea modelelor științifice care reproduc procedeul cercetat cu ajutorul unor relații funcționale și permit găsirea soluțiilor optime de acțiune într-un timp scurt, cu costuri reduse.

Pe plan mondial, turnarea continuă a început să fie tot mai automatizată, ajungându-se în numeroase cazuri la computerizarea întregului proces. Acest pas presupune controlarea tuturor parametrilor, cunoașterea fenomenelor în acest proces tehnologic, cât și a proprietăților materialelor. Conform studiilor de cercetare efectuate pe plan mondial, a experimentelor industriale precum și a

opiniilor avizate ale specialiștilor, calitatea semifabricatelor din oțel turnate continuu este influențată în mod deosebit de cel puțin doi parametri de turnare: temperatura oțelului lichid și răcirea secundară.

Efectele parametrilor de proces și a mărcii de oțel asupra structurii de solidificare sunt teme de cercetare aflate și în prezent în atenția specialiștilor. Cu puține excepții, literatura de specialitate nu abordează sistematica conceptului de turnare continuă în întreaga sa complexitate, astfel încât să asigure obținerea oțelurilor și aliajelor de înaltă calitate, cu caracteristici de exploatare superioare și totodată să includă soluțiile cele mai raționale, ținând seama de productivitate și protecția mediului.

Considerentele menționate m-au determinat ca în cazul tezei "**CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA PROCESELOR FIZICO-CHIMICO-METALURGICE CE AU LOC LA INTERFEȚELE CRISTALIZOR-ZGURĂ-OȚEL LICHID ASUPRA CALITĂȚII OȚELULUI TURNAT CONTINUU**" să cercetez următoarele aspecte:

- determinarea principalelor variabile ale procesului, care influențează calitatea semifabricatelor din oțel turnat continuu și stabilirea relațiilor de interdependență;
- definirea conceptului de turnare și identificarea principalilor parametri de turnare, factori tehnologici și perturbatori;
- analiza transferului termic la turnarea continuă a semifabricatelor din oțel, în scopul identificării unor ipoteze care să permită obținerea unor ecuații simplificate pentru calculul grosimii crustei solidificate ținând seama de cele două zone de răcire (primară și secundară).

Lucrarea de doctorat este structurată pe 8 capitole:

Capitolul1– prezintă sintetic stadiul actual al procesului de turnare continuă a oțelului și tendințe de dezvoltare în domeniul producției de utilaje, semifabricate și al tehnologiei;

Capitolul2–cuprinde analiza parametrilor procesului de turnare continuă a oțelului;

Capitolul3–tratează problema calității semifabricatelor din oțel turnat continuu;

Capitolul4–analizează influența prafurilor asupra procesului de turnare continuă;

Capitolul5– cuprinde considerații asupra solidificării la turnarea continuă;

Capitolul6–prezintă modelul matematic de simulare a solidificării semifabricatelor turnate continuu cu adaos de microrăcitori;

Capitolul7–cercetări și experimentări industriale propriu-zise referitoare la calitatea semifabricatelor turnate continuu;

Capitolul8- prezintă concluziile finale.

Tema de cercetare se adresează specialiștilor cu preocupări în domeniul turnării continue a oțelului. Prin bogatul conținut de date științifice prezentate într-o concepție sistemică, deschide perspectivele unei colaborări mai strânse între informatică și tehnologie.

Lucrarea a fost elaborată sub competența conducere științifică a domnului prof. dr. ing. Sporea Ion, reputat specialist în domeniul turnării metalelor, care a contribuit la formarea mea profesională în domeniul menționat. Pe această cale îi exprim sincere și respectuoase mulțumiri, profundă recunoștință, pentru îndrumările și sprijinul permanent acordate pe parcursul stagiului de pregătire, al întocmirii referatelor și al realizării tezei de doctorat.

1. Stadiul actual și perspective privind procesul de turnare continuă a oțelului

1.1. Scurt istoric al turnării continue

Conceptul inițial al turnării continue a metalelor a fost înregistrat la mijlocul secolului al XIX-lea. Limitată de posibilitățile tehnologice de la acea oră, ideea turnării continue dezvoltată de G. E. Sellers (1840), J. Laing (1843) și H. Bessemer (1846) a fost aplicată doar la metale neferoase cu punct de topire scăzut.

Prima propunere de construcție a unei mașini de turnare continuă pentru oțel, cu un desing apropiat de cel al mașinilor actuale de turnare continuă a fost înregistrată în anul 1887 de către germanul R. M. Daelen (German Patent No. 51217 din 30 iulie 1889). Mașina propusă de Daelen include un cristalizor răcit cu apă, o zonă de răcire secundară, o bară falsă, role de susținere și un utilaj de tăiere a firului. Toate încercările de turnare continuă a oțelului din acea perioadă au rămas la stadiul de propuneri sau experimentale, până când în anul 1933 Sigfried Junghans, considerat părintele turnării continue moderne, a conceput, dezvoltat și patentat sistemul de oscilare a cristalizorului (US Patent No. 2135 din 1 noiembrie 1938). Această realizare a făcut posibilă dezvoltarea la scară industrială a turnării continue.

Prima mașină de turnat continuă a fost construită la Low Moor (Anglia) și a fost pusă în funcțiune în anul 1946, fiind o mașină verticală pentru țagle. După anul 1950 turnarea continuă a început să se dezvolte din ce în ce mai mult, în prezent înregistrându-se peste 7000 de patente în acest domeniu.

Se acceptă de către cercetători, că prima mașină de turnare continuă cu cristalizor cu capăt deschis independent a fost supusă brevetării în anul 1887 de către R.M. Daelean. În special în perioada 1920-1937 s-au făcut progrese în cea ce privesc procesele de turnare continuă pentru metale neferoase.

În anul 1930, S. Junghans a turnat continuu alamă într-un cristalizor din cupru cu pereți dubli răciți cu apă. În anul 1932, B. E. Eldred a realizat o instalație cu cristalizor din grafit, iar în 1933 S. Junghans a dezvoltat procedeul prin construcția unei instalații pentru turnarea bronzului și aluminului.

Mașinile utilizate erau caracterizate de un cristalizor fix, drept cu o viteză de turnare scăzută. Adesea, lungimea miezului lichid depășește lungimea cristalizorului, înălțimea generală a unor astfel de echipamente este relativ mică; având în vedere valorile mici ale șarjelor utilizate în industria neferoaselor, capacitățile de turnare atinse erau suficiente. Șarjele mari din practica elaborării oțelului, precum și temperaturile ridicate de turnare, conductivitatea termică scăzută a oțelului, au necesitat rezolvarea unei serii de probleme care nu apar la turnarea metalelor neferoase.

Între anii 1935-1938, C.W. Hezellet a construit instalații industriale pentru turnarea continuă a aliajelor neferoase și a oțelului. Astăzi, turnarea continuă a oțelului este recunoscută la unison de către toți experții din industrie ca fiind un proces ce oferă nu doar un nivel ridicat de productivitate și de randament, dar și beneficii ale unei calități îmbunătățite, obținută prin aplicarea diferitelor tehnologii de rafinare ale procesului, în mod special în domeniul metalurgiei secundare, Deși

16 Stadiul actual și perspective privind procesul de turnare continuă a oțelului - 1

idei noi continuă să contribuie la evoluția conceptului de turnare continuă, se poate afirma că principiile procesului au fost cercetate de la un capăt la altul.

Anterior progresului turnării continue a oțelului, procesele de elaborare implicau, în general, turnarea oțelului topit în lingouri care erau ulterior prelucrate la dimensiunile finale dorite. În acest proces erau necesare, în mod frecvent, câteva etape intermediare de reîncălzire și fiecare pas în procesul de prelucrare implică o anumită pierdere de material.

La sfârșitul secolului al XIX-lea, a început să fie vehiculată ideea turnării continue a oțelului în semifabricate. Aceasta are avantajul unei reduceri a numărului de etape de prelucrare. Un astfel de proces nu conduce doar la o reducere considerabilă a consumului de energie, dar mărește de asemenea posibilitatea obținerii unei calități uniforme, pe toată lungimea semifabricatului. Inițial, punerea în practică a unei astfel de idei într-un concept eficient din punct de vedere al costurilor nu era realizabil tehnic și au fost necesari 80 de ani pentru ca acest proces să poată fi aplicat la scară industrială.[3]

Astăzi, turnarea continuă a oțelului se realizează cu un cristalizor din cupru cu capăt deschis, răcit cu apă, separat de unitatea de alimentare cu oțel topit, care oscilează de-a lungul axei semifabricatului mobil după un model de viteză relativ sinusoidal. La începerea operației de turnare, cristalizorul este închis la bază cu o așa numită bară falsă, este alimentat cu oțel topit, iar bara falsă este apoi retrasă continuu. Pelicula de oțel care se formează în cristalizor, conține un miez de oțel lichid care se solidifică treptat, pe măsură ce semifabricatul pătrunde în agregat.

Capacități mari de turnare se pot obține dacă se utilizează viteze ridicate de turnare, secțiuni transversale mari ale semifabricatului și turnarea simultană a mai multor semifabricate. Un cristalizor fix limitează viteza de turnare la aproximativ 0.6m/min.[1]

Ideea hotărâtoare, care în final a făcut posibilă turnarea continuă a oțelului la viteze mari, a fost observarea faptului că, este necesară oscilarea cristalizorului odată cu semifabricatul pe o anumită distanță, pentru a preveni ca pelicula de oțel solid, încă subțire, datorită conductivității termice reduse a oțelului, să fie întreruptă, având în vedere că semifabricatul este extras din cristalizor.

Primele încercări serioase de a turna oțel prin proces continuu au avut loc simultan în Germania și SUA în perioada 1940 - 1946. Un eveniment care se pare că a avut o influență importantă asupra dezvoltării ulterioare a tehnologiei de turnare continuă a fost decizia lui JUNGHANS de a-l avea pe I.ROSSI ca reprezentant al drepturilor sale de proprietate în SUA.

Compania "Continous Metalcast" al cărui principal acționar a fost I.ROSSI, a exploatat la maximum aceste drepturi după război, iar JUNGHANS și I.ROSSI au început să conducă experimente separate în domeniul turnării continue a oțelului.

În jurul anului 1942, compania americană "Republic Steel" a demarat propriul program de cercetare și dezvoltare în domeniul turnării continue a oțelului pe baza unei brevete al lui E.R.WILLIAMS.

Împreună cu „Babcock & Wilcox Tube Co”, ei au construit o secție pilot în Beaver Falls, Pa., în anul 1946. Spre deosebire de procedeul JUNGHANS cu cristalizor oscilant, a fost aplicată o metodă de extragere cu semifabricatului intermitentă, utilizând un cristalizor cu pereți subțiri care avea doar 750 mm lungime. Oricum, astăzi cristalizorul oscilant este standardul recunoscut, iar cristalizoarele fixe, cardanice, montate cu arc, țin de domeniul trecutului. Chiar și sistemul de deformare negativă, cu accelerarea cristalizorului împărțite de came cu disc, a condus la modelul de viteză sinusoidală produs de un sistem cu excentric.

Instalația pentru turnare continua de tip arc care se regăsește de obicei în oțelurile actuale, este rezultatul următoarelor descoperiri:

În anul 1950, V.TARQUINEER și R.J.SCOVILL a realizat proiectul unui agregat de turnare, în care semifabricatul ce ieșea din cristalizorul drept era curbat și ghidat în poziția orizontală. Cristalizorul era încă conectat la rezervorul de alimentare cu oțel. În anul 1952 O.SCHAABER a brevetat pentru prima dată un cristalizor oscilant curbat în numele lui "Vereinigte Leichtmetall - Werke" și "Wieland - Werke" care opera independent de rezervorul de alimentare cu oțel lichid. Cristalizorul oscila pe un arc, iar semifabricatul este ghidat în acest arc către rolele de extragere, unde era îndreptat în plan orizontal.

În anul 1954 la Manesmann este utilizată pentru prima dată o oală clasică de turnare echipată cu închizător cu dop la turnarea continuă. Distribuitorul este echipat cu închizătoare cu dop pentru controlul celor patru fire. La Atlas Steel (Canada) este pusă în funcțiune o mașină de turnare continuă verticală pentru sleburi din oțel inoxidabil construită de CONCAST

Primele teste pe scară largă au indicat faptul că, lungimea conului de solidificare a fost de departe mai mare decât cea înregistrată în turnarea continuă a metalelor neferoase datorită conductivității termice relativ scăzute a oțelului. Astfel, a existat o trecere rapidă la turnarea cu fir curb.

Primele experimente de turnare cu fir curb, au avut loc la oțelăriile din Duisburg ale companiei "Mannesmann AG" în anul 1963. În anul 1955 această companie a preluat moștenirea tehnologică a pionierului turnării continue, Siegfried Junghan, care a murit în anul 1954.

Primele agregate de turnare continuă au fost realizate spre sfârșitul anilor 1950. Au fost proiectate pe baza conceptelor de turnare continuă deja cunoscute, pentru metale neferoase și modificate în conformitate cu experiența câștigată în primele agregate pilot de turnare a oțelului. Așa cum rezultă din tabelul 1.1.. agregatele verticale au dominat inițial piața.

Tabelul 1.1. Numărul instalațiilor de turnare continuă existente în perioada 1955-1966

Anul	Instalații verticale	Instalații verticale cu îndoire a firului	Agregate de tip arc	Număr mașini	Număr fire	Fire/mașină
1955	17	-	-	17	22	1.3
1960	33	3	-	36	55	1.5
1961	37	7	-	44	68	1.5
1962	43	9	-	52	111	2.1
1963	45	13	1	59	126	2.1
1964	47	20	5	72	165	2.3
1965	49	30	29	108	231	2.1
1966	61	33	36	130	320	2.5

La oțelăriile sale din Duisburg, Mannesmann a instalat un cristalizor curbat agregatului său de turnare vertical, care era în operare din 1950 și a început producția de semifabricate cu secțiunea transversală de 200x200 mm în luna februarie 1963. În luna aprilie 1963, von "Moos'sche Eisenwerke" a început turnarea de semifabricate curbate cu dimensiunea de 85x85 mm. [4]

Îndoirea semifabricatului din poziție verticală pentru a realiza un arc circular sau îndreptarea semifabricatului din arc în plan orizontal, cu miezul mai mult sau

18 Stadiul actual și perspective privind procesul de turnare continuă a oțelului - 1

mai puțin lichid, a condus rapid la dezvoltarea, la începutul anilor 1960, a mașinilor de încovoiere și îndreptare. Proiectele au fost realizate de companiile "Olsson" (1960), von "Moos'sche Eisenwerke" (1961), "Bondanelli" și "Mannesmann" (1962 și 1963).

Primele instalații industriale de turnare continuă au fost realizate spre sfârșitul anilor 1950. Ele au fost proiectate pe baza conceptelor de turnare continuă deja cunoscute, pentru metale neferoase și modificate în conformitate cu experiența câștigată în primele agregate pilot de turnare a oțelului.

Agregatele verticale au dominat inițial piața. Odată cu introducerea cristalizorului curbat și a conceptului de îndoire a semifabricatului, numărul instalațiilor în care semifabricatul era deviat în timpul turnării în plan orizontal a crescut rapid în doar câțiva ani.

Toate mașinile erau dotate cu cristalizor oscilant. Numărul de fire/mașină a crescut, confirmând eforturile făcute de specialiști pentru turnarea unor șarje mari, într-un timp cât mai scurt, astfel încât să fie reduse la minim pierderile de temperatură. Această creștere a numărului de fire/mașină s-a datorat în principal numărului de fire încorporate în instalațiile de turnare a țagelilor. Agregatele pentru sleburi au fost și sunt încă proiectate sub forma unor mașini cu două fire. A fost realizat un singur agregat pentru sleburi cu patru fire până în prezent la "National Steel", Weirton, SUA.

În țara noastră primele instalații de turnare continuă a oțelului au fost puse în funcțiune în anul 1978 la SIDEX Galați și SOCOMET Oțelul Roșu, iar în 1980 la SIDERCA Călărași. Ulterior astfel de instalații au fost implementate și la COST Târgoviște și la SIDERURGICA Hunedoara.

România turna oțel prin metoda de turnare continuă circa 30% în 1989, atingând în 1992 circa 52%, dar nu prin lărgirea ariei ocupate de turnarea continuă, ci prin restrângerea producției de oțel – lingou [1]. În prezent se toarnă circa 61% din producția de oțel a țării [5].

Răspândirea pe scară largă a turnării continue a dus la apariția a peste 1400 de mașini de turnat continuu cu peste 4000 de fire, tehnologia și utilajele fiind accesibile celor mai mulți producători. La nivel mondial, această tehnologie de turnare continuă a oțelului, a fost promovată cu rapiditate, iar cantitatea de oțel realizată prin turnare continuă s-a majorat de la 333 milioane tone în anul 1985 la 816 milioane tone în anul 2006.

Ponderea oțelului turnat continuu pe mapamond în anul 1985 a fost de 46% pentru ca în anul 2006 să depășească 96%.

În Uniunea Europeană prin tehnologia de turnare continuă s-a realizat 72% din producția de oțel în anul 1985 și 96% în anul 2006. În CSI ponderea oțelului turnat continuu din producția totală de oțel reprezenta 13,6% în 1985, 17,3% în 1989 și 69,7% 2006.

Din 90 de țări în care se practică acest procedeu, în aproximativ 40 de state oțelul este integral turnat continuu.

Pe zone geografice evoluția ponderii oțelului turnat continuu se prezintă astfel: Între țările care toarnă continuu 100% din producția de oțel se pot nominaliza: Arabia Saudită, Croația, Cuba, Danemarca, Ecuador, Elveția, Emiratele Arabe, Filipine, Grecia, Hong-Kong, Indonezia, Iran, Irlanda, Israel, Letonia, Malaiezia, Noua Zeelandă, Singapore, Siria, Tailanda, Ungaria, Uruguay, Venezuela.

În alte 8 țări se toarnă continuu peste 99% din producția de oțel: Australia, Belgia, Finlanda, Moldova, Norvegia, Slovacia, Taiwan, Tunisia.

Din cercetarea efectuată au mai rezultat și următoarele concluzii:

- ♣ procedeul de turnare continuă s-a extins foarte mult în ultimii 10 ani în unele țări în curs de dezvoltare din Europa: Cehia, Polonia, Slovacia, Portugalia; America de Nord (Cuba, Mexic); America de Sud (Brazilia, Chile); Asia (China, India) și chiar în stare industrializate: Anglia, Austria, Luxemburg, Canada, SUA;
- ♣ în țările în care se produc multe oțeluri aliate și înalt aliate, mai sunt de rezolvat unele probleme de tehnologie, care să asigure competitivitate ridicată acestor produse cu valoare adăugată foarte mare;
- ♣ România în anul 1989 a turnat continuu aproximativ 35% din producția de oțel și 73% în anul 2001.

1.2. Factorii care au impus extinderea tehnologiei de turnare continuă

Procedeul de turnare continuă, care este o tehnologie eficientă și mai puțin poluantă, a fost promovat cu întârziere în unele combinate metalurgice din România. Dezvoltarea economiei mondiale și extinderea unor ramuri de vârf, a avut ca efect o diversificare și îmbunătățire a producției siderurgice, în vederea colerării fabricației cu solicitări tot mai exigente ale utilizatorilor.

În majoritatea statelor este de neconceput realizarea unor produse fără utilizarea oțelului, din care se nominalizează: utilaje tehnologice, mașini unelte, mijloace de ridicat, autovehicule, vagoane, utilaje pentru agricultură, aparate medicale, tehnică militară, echipamente nucleare-electrice, unele bunuri de larg consum, mașini pentru industria textilă, pentru tipografii, construcții industriale și civile, căi ferate, ș.a.

Enumerând câteva destinații ale produselor siderurgice, se desprinde influența pe care metalurgia o are asupra multor sectoare de activitate, care în ultimă instanță determină puterea economică a unei țări.[2]

Pe mapamond din consumul de laminate la cald, produsele lungi au o pondere de 47%, comparativ cu 36% în anul 1990 (+30%).

Având în vedere necesarul crescând de oțel, firmele din statele industrializate și în curs de dezvoltare, au acționat operativ pentru majorarea producției și îmbunătățirea calității produselor. În acest scop au fost concepute forme de organizare îmbunătățite și programe speciale de restructurare.

Acțiunea de modernizare a industriei siderurgice care se desfășoară la nivel mondial, are în vedere introducerea sau extinderea unor tehnologii mai eficiente și pe cât posibil nepoluante sau cu grad redus de emisii nocive în mediul înconjurător, așa cum este și procedeul de turnare continuă.[5]

Principalii factori care au urgentat extinderea tehnologiei moderne de turnare continuă pot fi sintetizați astfel:

1. Realizarea unor produse care să corespundă solicitărilor impuse de tehnicile de vârf (cosmonautică, electronică, militară, nucleară etc.).
2. Protecția mediului și neperturbarea ciclurilor biologice.
3. Creșterea productivității muncii.
4. Reducerea cheltuielilor materiale.
5. Adaptarea criteriilor de calitate la exigențele sporite ale utilizatorilor produselor din oțel.

La un produs metalurgic calitatea este caracterizată prin mulți parametri și determinări din care se nominalizează:

- ⇒ Analiza chimică.
- ⇒ Valorile proprietăților fizico-mecanice.

- ⇒ Gradul de puritate în incluziuni nemetalice (natura, cantitatea, mărimea, forma și amplasarea acestora).
- ⇒ Conținutul de gaze al oțelului (H_2 , N_2 , O_2).
- ⇒ Alte caracteristici specifice domeniului de utilizare (fluaj, călibilitate, sudabilitate, pierderi magnetice, rezistență la coroziune, ș.a.).
- ⇒ Finisarea suprafeței (planeitatea, curbura, rugozitate etc.).
- ⇒ Plaja de toleranțe.
- ⇒ Constanța loturilor produse (certitudinea fabricației).

1.3. Avantajele procedurii de turnare continuă a oțelului

O calitate superioară la un produs siderurgic finit care să asigure acestuia competitivitate ridicată, se poate realiza prin conceperea și aplicarea unor tehnologii integrate de elaborare, turnare, laminare, trefilare, forjare, tratament termic a oțelului ș.a. Respectarea unor parametrii de lucru este obligatorie în toate fazele de fabricație, pentru a asigura condițiile necesare realizării unor produse, la care fiabilitatea și eficiența să fie indicatorii cei mai expresivi ai unei calități deosebite.

În industria oțelului realizarea unor produse de calitate la nivelul exigențelor mondiale și a tendințelor de globalizare, depinde de mulți factori, între care:

- ⇒ Itinerariul de producție, tehnologiile și procedurile de lucru aplicate.
- ⇒ Calitatea materialelor utilizate în procesul de elaborare, turnare, laminare.
- ⇒ Nivelul de dotare tehnică, organizare, exploatare întreținere și parametrii de funcționare ai agregatelor și instalațiilor de producție.
- ⇒ Pregătirea profesională, exigența managerilor și cointeresarea materială a personalului în realizarea unei calități superioare.

Turnarea continuă în statele industrializate și în curs de dezvoltare a avut o contribuție importantă la ridicarea nivelului calitativ al produselor finite, majorarea profitului și îmbunătățirea prestanței unor firme ("marca fabricii") prin avantajele tehnico-economice pe care le prezintă acest procedeu de realizare a oțelului:

► Majorarea gradului de utilizare a metalului (scoaterea de la 70-75%, la 90-92% media în statele industrializate.

► Reducerea consumului integrat de combustibil și energie cu 50-70%, comparativ cu fluxul clasic de realizare a laminatelor calde din lingou.

► Produsele au structură omogenă și mai fină.

► Semifabricatele au suprafață mai curată și laminatele finite defecte mai puține.

► Oțelul are puritate mai ridicată.

► Cheltuielile de producție sunt mai reduse cu 14-26%.

► Prin turnarea continuă în multe țări se produc semifabricate și în aval produse finite de o calitate mai bună din mărcile de oțel aliat cu bor, crom, mangan, molibden, niobiu, titan, vanadiu, ș.a. destinate producției de sârmă, de electrozi de sudare, construcții sudate, echipamente nucleare-electrice, tehnică militară, etc.

► Turnarea continuă este posibilă și pentru oțeluri înalt aliate inoxidabile, de scule ș.a.

Unele firme - exemplu BÖEHLER Austria - au înlocuit turnarea clasică a oțelului de scule, cu procedeu modern de turnare continuă.

► Avantajele acestei tehnologii sunt ilustrate și prin extinderea procedurii în foarte multe state și profitul realizat la firmele respective.

► Produsele finite din oțel realizate din semifabricate turnate continuu au competitivitate mare, în cele mai multe cazuri la nivel mondial și asigură un profit ridicat în industria oțelului.

► Pentru considerentele enumerate mai sus, se recomandă uzinelor din România să intensifice preocuparea pentru realizarea într-o pondere mai mare a produselor lungi din semifabricate turnate continuu.

Orientarea pe plan mondial, cu precădere în Uniunea Europeană, a fost de a realiza la instalațiile de turnare continuă o extindere a gamei sortimentale de oțeluri, de obținere a unor semifabricate la dimensiuni apropiate produsului finit pentru creșterea eficienței, diminuarea segregajilor, uniformizarea structurii și creșterea stabilității acesteia, ș.a.

1.4. Perfecționări ale tehnologiei de turnare continuă la nivel mondial

În țările cu industrie dezvoltată a existat o preocupare susținută față de diversificarea nivelului calitativ al fabricației de mașini și utilaje, ceea ce a impus o creștere a exigenței la recepția produselor metalurgice. Urmare acestor cerințe generale, metalurgii au inițiat cercetări vaste și au reușit să perfecționeze tehnologia și să modernizeze instalațiile de turnare continuă, pentru a realiza o creștere a competitivității produselor finite din oțel, între care și laminatele lungi (profile, sârme etc.).

În continuare vor fi exemplificate succint principalele măsuri și perfecționări aplicate în domeniul re tehnologizării procedurii de turnare continuă în alte țări:

- Automatizarea conducerii procesului de fabricație.
- Dotarea mașinilor cu aparataj pentru controlul multor parametri tehnologici (temperatură oțel, nivel lichid în distribuitor, debit și temperatură apă răcire, analiză chimică ș.a.
- Creșterea vitezei de turnare (2-6 m/min.).
- Optimizarea conicității cristalizorului.
- Agitarea electromagnetică a oțelului în timpul turnării
- Vibrarea cristalizorului pe verticală.
- Protejarea jetului de oțel cu gaze inerte.
- Microalierea în distribuitor sau cristalizor.
- Creșterea ponderii oțelului aliat și înalt aliat.
- Realizarea de sârme și sleburi subțiri, precum și semifabricate cu diametrul până la 450 (600) mm, sau tubulare pentru țevi.
- Posibilitatea turnării a cca.20 șarje în secvență.
- Desțunderizarea semifabricatelor cu apă sub presiune.
- Modernizarea și optimizarea fluxului de transport între oțelărie și laminor.
- Creșterea ponderii oțelului aliat și înalt aliat.
- Diminuarea investițiilor cu aprox. 25 %, comparativ cu realizarea de mașini de turnare noi.

1.4.1. Ponderea oțelului turnat continuu

La nivel mondial s-a intensificat acțiunea de modernizare – restructurare a industriei siderurgice, iar procedeul de turnare continuă a fost extins aproape în toate țările producătoare de oțel (turnare continuă=85 state, realizare oțel=94), urmare avantajelor tehnico-economice pe care le prezintă această tehnologie cu grad redus de poluare.

Ponderea oțelului turnat continuu pe mapamond în anul 1985 a fost de 46%, pentru ca în anul 2002 să depășească 88%.

22 Stadiul actual și perspective privind procesul de turnare continuă a oțelului - 1

În alte 10% țări se toarnă continuu peste 99% din producția de oțel: Australia, Belgia, Finlanda, Mexic, Moldova, Norvegia, Slovacia, Taiwan, Tunisia, Uzbekistan.

Din cercetări au rezultat și alte concluzii între care:

- Procedul de turnare continuă s-a extins foarte mult în ultimii 10 ani în unele țări în curs de dezvoltare din Europa: Cehia, Polonia, Portugalia, Slovacia; America N(Cuba, Mexic); America S (Brazilia, Chile); Asia (China, India) și chiar în state industrializate: Anglia, Australia, Canada, Luxemburg, SUA etc.

- În țările în care se produc multe oțeluri aliate și înalt aliate, mai sunt rezolvate unele probleme de tehnologie, care să asigure competitivitatea ridicată produselor acestea cu valoare adăugată foarte mare.

- România în anul 1990 a turnat continuu 36.2% din producția de oțel și 83.6% în anul 2002.

La nivel mondial din total instalații de turnare continuu, aproximativ 26% realizează țagle, 20% blumuri și 54% sleburi. Ponderea pe grupe dimensionale a țagelilor turnate continuu în alte țări este prezentată astfel în tabelul 1.2., iar ponderea pe dimensiuni a blumurilor turnate continuu în tabelul 1.3.

Tabelul 1.2. Structura dimensională a țagelilor turnate continuu la nivel mondial

Grupa dimensională	75-100	101-125	126-150	151-175
Ponderea [%]	27	30	33	10

Tabelul 1.3. Ponderea pe dimensiuni a blumurilor turnate continuu în unele țări

Grupa dimensională [mm]	Ponderea [%]	Grupa dimensională [mm]	Ponderea [%]
175-200	23	301-325	9
201-225	9	326-350	5
226-250	17	351-375	5
251-275	14	376-400	5
276-300	6	> 400	7

Pe grupe sortimentale de oțel ponderea țagelilor și a blumurilor turnate continuu se prezintă în tabelul 1.4.

Tabelul 1.4. Structura sortimentelor de oțel turnate continuu în blumuri și țagle la nivel mondial

Sortimentul de oțel	Ponderea [%] la:	
	Țagle	Blumuri
Conținut de C scăzut sau mediu	21	7
Carbon ridicat	18	13
Oțeluri pentru refulare la rece	8	6
Arcuri	10	5
Șină	3	10
Rulmenți	6	8
Oțeluri cu sulf pentru automate	6	6
Oțeluri cu plumb pentru automate	3	...
Țevi laminate	3	10
Semifabricate pentru forjă	9	5
Alte oțeluri	11	30

1.5. Stadiul actual al turnării continue în România

În ultimii ani în metalurgia noastră a fost extinsă această tehnologie ponderea oțelului turnat continuu majorându-se de la 29.9% în anul 1985, la 85.5% în anul 2002.

Comparativ cu stadiul mondial în România s-a acționat insuficient pentru extinderea turnării continue, ponderea acestei tehnologii pe mapamond reprezentând în prezent 88.4%. Această situație explică în mare măsură de ce produsele din oțel realizate de siderurgia noastră au preț mai ridicat, calitate medie și penetrează uneori cu greutate pe piață internațională.

În țara noastră turnarea continuă este utilizată predominant pentru oțeluri nealiante, iar în Uniunea Europeană, Japonia, Canada, SUA, din producția de sortimente aliate mai mult de 90% sunt realizate prin acest procedeu (mondial cca. 80%).

De asemenea, structura sortimentală a produselor turnate continuu în România este simplificată, comparativ cu ceea ce se practică în alte state, unde se asigură laminoarelor și sleburi subțiri, profile și sârme de dimensiuni mici, semifabricate tubulare, rotunde cu diametrul până la 600 mm ș.a.

Un alt aspect analizat a fost gradul de utilizare a instalațiilor de turnare continuă menținute în funcțiune, care în România este în medie de 63% (mondial aproape 90%).

Ritmul lent de introducere a acestei tehnologii foarte avantajoasă, a adus România la un decalaj de aproximativ 15 ani în comparație cu nivelul existent în Uniunea Europeană.

Avantajele tehnico-economice pe care le prezintă turnarea continuă impun ca în următorii 3-5 ani prioritatea nr.1 a restructurării siderurgice să o prezinte extinderea acestei tehnologii moderne. Prin tehnologia de turnare continuă la nivel mondial s-a realizat 46% din producția de oțel a anului 1985 și de 88% în anul 2002, în UE=72%/97%, în România =30%/83%.

În 36 de țări se toarnă continuu toată producția de oțel, iar în 9 ponderea este mai mare de 99%, majoritatea sunt state în curs de dezvoltare.

Din instalațiile de turnare continuă la nivel mondial, în 26% se realizează țagle, 20% blumuri și 54% sleburi.

În România produsele lungi se realizează în proporție de 43% din semifabricate turnate continuu, iar laminatele plate 94% (mondial=81%, respectiv 96%).

1.5.1. Caracteristici dimensionale

Avantajele oferite de turnarea continuă, au determinat extinderea procedurii pe sortimente dimensionale și calitative tot mai largi. Astfel, se toarnă semifabricate cu secțiuni pătrată sau dreptunghiulară, cu raportul laturilor până la 2-3 (țagle, blumuri) în limitele a 100x100:350x350mm, secțiunea minimă fiind de 80x80mm. Sub această valoare apar dificultăți la centrarea jetului în cristalizor, care conduc la solidificarea inegală pe laturi, precum și la pericolul erupțiilor la ieșirea din cristalizor și respectiv la uzura asimetrică a pereților cristalizorului.

De asemenea, există rezerve datorită coroaiei insuficient realizabil cu aceste secțiuni mici. Secțiunile maxime se situează în jur de 400x400mm. În mod excepțional și izolat s-au turnat semifabricate cu secțiunea de 450x650mm.

Bramele turnate continuu au secțiunile cuprinse în intervalul 700x100:2500x300mm. Izolat, se toarnă și brame cu grosimi de 350mm și lățimi de

2900mm. În cazul turnării bramelor cu lățimi peste 2300mm apar probleme de repartizare a metalului în distribuitor, deoarece un traseu prea lung în aceasta determină o scădere inadmisibilă de temperatură. Soluția tehnologică este turnarea cu două orificii și tuburi imersate pentru fiecare fir.

Semifabricatele cu secțiuni rotunde hexagonale și ortogonale se toarnă în cantități reduse, în limitele dimensionale $\Phi 100-300\text{mm}$.

În ultimii ani s-a reușit turnarea semifabricatelor încadrate în domeniul raportului $\Phi_{\text{exterior}}/\Phi_{\text{interior}}$, 400/100-750/350mm.

O altă noutate o reprezintă turnarea secțiunilor fasonate, destinate de exemplu, laminării grinzilor I cu tălpi late.

1.5.2. Caracteristici privind compoziția chimică a oțelului

În principal, se pot turna continuu majoritatea calităților de oțeluri, rămânând nerezolvată încă turnarea oțelurilor necalmate. Dificultatea constă în controlul fierberii oțelului în cristalizor și influențarea procesului de solidificare, ceea ce impune secțiuni minime (150x150) și viteze reduse de turnare (cca. 56-60% din viteza oțelului calmat). Astfel, ponderea majoritară revine oțelurilor carbon obișnuite calmate. Totuși, gama de mărci turnate continuu este limitată datorită unor aspecte teoretice și tehnologice neelucidate încă. Astfel:

- la conținuturi de carbon sub 0.3% se obține în general, suprafața foarte bună și grad redus de segregare;
- la conținuturi de carbon mai mari de 0.3% suprafața se menține bună, dar crește tendința de segregare a carbonului în zonele centrale;
- la un conținut mai mare de 0.7% există pericolul apariției crăpăturilor la suprafața semifabricatului;
- o comportare surprinzătoare o au oțelurile cu 0.17-0.25%C, care generează microfisuri superficiale. Efectul de microfisurare se preîntâmpină cu un plus de Mn (cca. 1%) și prin limitarea elementelor P,S (<0.015%) și Cu (<0.15%), care au acțiune fragilizantă.
- mărcile de oțel slab aliat și înalt aliat nu prezintă particularități deosebite la turnarea continuă.

Oțelurile pentru construcții metalice și mecanice se toarnă în condiții bune. O categorie aparte o formează oțelurile de rulmenți cu 1% C și 1.5% Cr, care se caracterizează printr-o tendință accentuată de segregare a carburilor și de finisare în zona de transcristalizare datorită unei răcirii prea intense. La acestea, restricțiile tehnologice prevăd o variație redusă a temperaturii de turnare (cca. 20°C peste punctul lichidus) secțiuni mici ale formatului, tuburi imersate și zgură sintetică adăugată sub forma de praf.

Oțelurile inoxidabile se pretează la obținerea produsului finit pe fluxul integrat turnare continuă – laminare, ca urmare a cerințelor crescânde pentru aceste materiale, ca tablă groasă și bandă laminată la rece. Oțelurile inoxidabile austenitice se toarnă în condiții bune cu parametri apropiați oțelurilor cu conținut redus de carbon.

Mărcile de oțel cu conținut ridicat de Al sau stabilizate cu Ti sau Nb creează greutăți similare celor de la turnarea convențională. Oțelurile inoxidabile feritice și martensitice le sunt caracteristice în timpul procesului de turnare continuă succesibilitatea la fisurare și la formarea de fulgi și porozități.

Măsurile speciale impuse în aceste cazuri prevăd următoarele: alierea cu feroaliaje preîncălzite, barbotarea cu argon, turnarea cu temperaturi minime admise, utilizarea de tuburi imersate și zguri sintetice, reducerea cu cca. 40% a

debitelor de apă în cristalizor în zona de răcire secundară și răcirea lentă până la temperatura ambiantă. De asemenea, se recomandă conicitatea redusă a cristalizorului și rază mare de curbură a firului turnat.

Existență similară se impune oțelurilor silicoase care se toarnă obligatoriu cu tub imersat și zgură sintetică și care se răcesc lent în cuptoare tunel până la temperatura ambiantă. Îndreptarea firului la orizontală se face la o temperatură de cel puțin 900°C.

Oțelurile nealiate și aliate de scule și rapide se toarnă continuu în condiții satisfăcătoare, impunându-se măsuri sporite de control a temperaturii de turnare și utilizarea tuburilor imersate și a zgurilor sintetice, precum și limitarea secțiunii de turnare.

1.6. Producători de instalații pentru turnarea continuă

DANIELI (Italia)

Este una dintre marile firme din lume, producătoare de utilaj metalurgic, printre care se numără și mașinile de turnare continuă. Primele mașini au fost produse în anul 1964. Creșterile considerabile de vânzări din următorii ani au propulsat firma în poziția de lider mondial în domeniul turnării continue, cu o cotă semnificativă de 32%.

Având o experiență de 35 de ani în 2000-2005 și o activitate susținută de cercetare – dezvoltare, firma Danieli a stabilit repere importante în domeniul turnării continue, atât pentru oțeluri obișnuite, cât și pentru oțeluri speciale, ultima realizare în domeniu fiind mașina de turnat continuu cu viteză ridicată pentru oțeluri speciale, care este în funcțiune din toamna anului 2000 la o uzină din Italia.

Are soluții tehnice interesante acolo unde s-au pus condiții speciale (limitare de spațiu, diversificare a producției etc.) și sunt adaptate pentru asigurarea unei calități deosebite a semifabricatelor.

Realizările de ultimă oră, în plan tehnic, la mașina de turnare continuă produse de această firmă sunt:

- cale de rulare suspendată la vagonet pentru distribuitor;
- acționare cu mecanism electromagnetic la dispozitivul de închidere cu dop;
- amortizare pneumatică la oscilatorul cristalizorului.

CONCAST STANDARD A. G. (Elveția)

Are o activitate de circa 60 de ani în domeniul turnării continue a oțelului, a livrat sau modernizat peste 400 de mașini în 64 de țări, printre care și în România.

În perioada 1992-2005, firma elvețiană a livrat mașini de turnare continuă țagale care însumează 167 de firme. Mașinile construite de această firmă se remarcă din punct de vedere tehnic prin:

- sistem de ridicare-coborâre oală montat în brațele turnului rotitor;
- cale de rulare suspendată (cu contrașină) la căruciorul pentru distribuitor;
- eliminarea necesității reglajului la rolele de centrare interioare la ghidajul semifabricatului (role mobile cu contragreutate);
- agitator pe semifabricat;
- protecție deosebită antitermică a echipamentului mecanic și electric începând cu caja de tragere.

Concast este lider în domeniul inovațiilor destinate fabricațiilor de profile mari productivitatea mărită, calitatea îmbunătățită, cheltuielile reduse pentru întreținere sunt principalele atuuri ale mașinilor de turnat continuu marca Concast.

Producătorii de oțel au recunoscut foarte rapid avantajele tehnologiei Concast bazate pe cristalizor tubular încă de la introducerea acesteia în 1994. Astăzi

peste 150 fire sunt în funcțiune în lume, Producând peste 15 milioane tone, dominând piața datorită avantajelor conferite de stabilitate, viteză și calitatea produselor. Noutatea constă în forma secțiunii inferioare a tubului care se subțiază progresiv, formând gradual dimensiunile finale ale secțiunii. Astfel, se creează o tranziție sinuoasă pe măsură ce forma finală a țaglei se formează.

Geometria progresivă, în trepte a noului tub oferă numeroase avantaje: stabilitate ridicată și la viteze mici de turnare, conform cerințelor, pentru a sprijini secvențele de turnare lungi; creșterea duratei de funcționare.

MANNESMANN DEMAG-SMS SCHLOEMANN SIEMAG (Germania)

Este una dintre firmele cu tradiție în domeniul siderurgic, are o activitate în turnarea continuă de circa 50 de ani, perioadă în care a livrat sau modernizat un număr de peste 160 de mașini de turnare continuă cu fir curb. Din 1990 până în 2002 firma a livrat 32 de mașini de turnare continuă inclusiv în România (la Hunedoara și la Călărași), dintre care 11 pentru producerea țaglelor. În plan tehnic firma Mannesmann a realizat:

- dispozitiv de blocare mecanică a turnului rotitor în poziția de turnare și primire;
- dispozitiv de desprindere ușă la orificiile de golire a distribuitorului;
- acționarea servohidraulică a oscilatorului.

VOEST ALPINE INDUSTRIEANLAGENBAU – POMINI (Austria)

Este o companie nouă, orientată spre viitor în ceea ce privește tehnologiile și serviciile în turnare continuă a țaglelor și laminarea produselor lungi și oferă parteneriat tehnologic pentru a obține cele mai bune rezultate operaționale, ținând poziția de lider pe piață.

VAIPOMONI furnizează soluții conform cerințelor clientului pentru turnare țaglelor pe baza experienței proprii și a firmei americane ROKOP acumulată din mai mult de 1000 fire de turnare țagle instalate și modernizate.

Pentru a furniza clienților săi avantaje decisive în ceea ce privește calitatea, costurile, scoaterea flexibilitatea și întreținerea, VAI POMINI oferă pachete tehnologice avansate pentru mașinile de tunare continuă blumuri. Conceptul modular compact, flexibilitatea operațională ridicată, componentele robuste pentru cele mai scăzute costuri de funcționare și întreținere, stabilesc standardul pentru turnare continuă economică, de calitate ridicată și performanță.

VAIPOMINI este unul dintre pionierii tehnologiei de turnare a sleburilor.

Aceasta se reflectă prin utilajele moderne realizate, care include conceptul de cristalizor drept, îndoirea și îndreptarea continuă, pas mic al rolor răcire secundară dinamică pe lângă sisteme de control a calității. Acestea sunt elemente standard în orice mașină de turnare continuă modernă.

Jinta companiei a fost întotdeauna să asigure operatori de instalații, având cele mai avansate soluții tehnologice pentru asigurarea unor avantaje importante de producție și costuri. Exemplele include, oscilatorul DYNAFLEX, CRISTALIZORUL HIDRAULIC HYDROWAM cu reglaj, tehnologia de interfață îngustă DIAFACE, MoldExpert, gestiunea răcirii semifabricatului DYNACS, segmentul SMART, precum și rotele – START.

ROKOP (SUA)

A apărut în familia producătorilor de mașini de turnat continuă în anul 1971. Are meritul de a fi introdus sistemul de bară rigidă și eliminarea rolor de picior. În perioada 1974-1976 a modernizat un număr de 24 de mașini de turnat continuă din care 6 în Europa. Modernizările realizate de firma Rokop au vizat:

- realizarea unei construcții simple și compacte a cajei de tragere (o singură pereche de role motoare fără rola de susținere intermediară);
- ghidarea semifabricatului cu role de susținere numai pe exterior: eliminarea necesității reglajului la rolele de centrare la ghidajul semifabricatului (role mobile).

1.7. Producători de semifabricate turnate din oțel

În continuare voi prezenta principalii producători de semifabricate turnate continuu atât pentru produse lungi cât și pentru cele plate.

1.7.1. Producători de țagle

Voest – Alpine Stahl Donawitz GmbH (Austria)

Uzina a fost modernizată în mai 2000. Taglele turnate au dimensiunea 283x390 mm și rotund de 230 mm. Instalația are 5 fire și este echipată cu un cristalizor curbat, închizător oscilator hidraulic, agitator electromagnetic și un sistem de cântărire a semifabricatelor pentru fiecare fir.

Krupp – Thyssen – Nirosta (Germania)

Este principalul producător de tablă din oțeluri speciale inoxidabile rezistente la acizi și la temperaturi înalte, din lume. Are 5 uzine în landurile Nordrhein – Westfalen și Hessen care au 4 instalații de turnare continuă.

Lech – Stahlwerke (Germania)

Produce țagle cu dimensiunea de 115x115 mm, 200x200 mm, utilizând turnarea cu jet deschis cât și cu tuburi imersate. Toarnă semifabricate din oțeluri obișnuite dar și speciale cu conținut de carbon de 1.5%.

ThyssenStahl AG.Oberhausen (Germania)

Toarnă țagă cu secțiunea 100-160mm² pe o instalație cu 6 fire Concast/SMS.

BGH Edelstahl (Germania)

Toarnă aproximativ 150 de mărci diferite de oțel din care 70% îl reprezintă mărcile înalt aliate. Utilizează o instalație de turnare continuă orizontală cu 2 fire cu o productivitate de 15-24 tone/oră.

Corus Scunthorpe Works (Marea Britanie)

Toarnă blumuri cu dimensiunea de 230x283mm, 230x483 și 305x483mm. Capacitatea este de 1.25milioane tone/an. Gama de produse include oțel obișnuit și oțeluri microaliate.

Birmingham Southeast (Georgia- SUA)

Are o instalație de turnare continuă cu 4 fire a cărei capacitate este de 725.000tone/an, pusă în funcțiune în anul 1999. Se toarnă țagle cu dimensiunea de: 140x230mm, 160x230mm, 160x320mm.

Hang Gang – Chang Xing EAF SteelmakingCo Ltd. (China)

Produce țagă pătrată de 150mm și 200mm din oțel de calitate superioară. Instalația a fost pusă în funcțiune în anul 1999 și are o capacitate de 500.000tone/an.

Wakayama Works, Sumitomo Metal Industries (Japonia)

A pus în funcțiune în anul 1966 o instalație cu 6 fire pentru turnarea continuă a țagelor rotunde (Ø190mm) cu viteza de turnare 3m/min.

Suez Steel (Egipt). Toarnă țagă cu dimensiunea 130x130mm, 100x100, 150x150mm din oțel obișnuit. Instalația are o capacitate de 600.000 tone/an și a fost pusă în funcțiune în anul 2000.

Hadeed-Saudi Iron and Steel Company (Arabia Saudită)

Are 3 instalații de turnare continuă cu același echipament și aceeași parametri. Produce în prezent 2.65 milioane tone/an profile lungi. În viitorul apropiat, se vor realiza îmbunătățiri tehnice pentru a mări producția la 3 milioane tone/an prin modernizarea zonei de răcire primară și secundară, prin modernizarea și schimbarea cristalizoarelor.

Wuhan Iron and Steel Company (China)

În 1999 a pus în funcțiune două instalații de turnare continuă cu 5 fire având o capacitate anuală de 1.7 milioane/tonă. Gama de produse conține oțeluri cu conținut ridicat de carbon și oțeluri aliate.

Cele două instalații sunt proiectate și construite identic. Dimensiunile semifabricatelor turnate continuu sunt 200x200mm, 200x230mm, 230x250mm și 250x280mm. La patru luni de la punerea în funcțiune rata de turnare continuă a fost de 100%.

Maanshan Iron and Steel Co.Ltd. (China)

Instalația de turnare – laminare cu 2 fire produce anual cca 2mil. tone/an bandă la cald. Cu procedeele de laminare a benzii subțiri, laminare feritică și laminare semicontinuă, vor fi produse benzi cu grosimi între 0.8 și 12.7 și lățimi de 900-1600mm.

Ispat Unimetal (Franța)

În anul 2000 a modernizat două instalații de turnat țagle cu 6 fire, la viteze mai mari de turnare. În 18 luni de la data modernizării a turnat aproximativ 1 milion tone țagle din oțel cu conținut scăzut și ridicat de carbon.

Bielorussian Steelworks at Shlobin (Belarus)

Produce aproximativ 365000 tone/an cu o instalație de turnare continuă care are 4 fire, modernizată în 1988 pentru a corespunde cerințelor de calitate.

Semifabricatele turnate au dimensiunile 250x300mm, 300x400mm și sunt destinate producției de cabluri pentru anvelope.

Iscor Newcastle (Africa de Sud)

A modernizat două dintre cele trei instalații de turnat continuu cu 6 fire în anul 1998. Toarnă oțeluri cu conținut scăzut, mediu și ridicat de carbon. Are o capacitate de 2.1 milioane tone/an.

Ellwood Steel (Belgia)

Este unul din principalii furnizori de oțel pentru forjare în centrul Europei. Are o instalație de turnare continuă cu două fire pentru profilul rotund cu diametre de la 310 la 600mm.

Store și Jesenice (Slovenia)

Au 3 instalații de turnare continuă cu 5 fire fiecare. Dimensiunile țagelilor turnate sunt: 135x135mm, 140x140mm, 180x180mm, 220x220mm, 100x100mm.

Steel Dynamics Inc. Columbia City-Indiana (SUA)

Are instalație combinată de turnare continuă cu 3 fire pentru țagle și semifabricate profilate pentru traverse. Construcția instalației face posibilă obținerea produselor în cinci mărimi diferite: o țagă și 4 mărimi de semifabricate pentru traverse.

ARCELOR MITTAL STEEL (ROMÂNIA)

În țara noastră primele instalații de turnare continuă a oțelului au fost puse în funcțiune în anul 1978 la SIDEX Galați și SOCOMET Oțelul Roșu, iar în 1980 la SIDERCA Călărași. Ulterior astfel de instalații au fost implementate și la COST Târgoviște și la SIDERURGICA Hunedoara.

În anul 1989 se turna continuu oțel în 3 combine, iar în anul 2002 numărul acestora s-a majorat la 5, cu precizia că DONASID Călărași este în curs de reorganizare după privatizare, iar la SOCOMET Oțelul Roșu producția se desfășoară cu intermitență urmare unor probleme de management.

La IS Câmpia Turzii și la CS Reșița urmează a se introduce acest procedeu în următorii ani. Comparativ cu stadiul mondial în România s-a acționat insuficient pentru extinderea turnării continue. Această situație explică în mare măsură de ce produsele din oțel realizate de siderurgia noastră au preț mai ridicat, calitate medie și penetrează uneori cu greutate pe piața internațională.

În țara noastră turnarea continuă este utilizată predominant pentru oțeluri nealiat, iar în Uniunea Europeană, Japonia, Canada, S.U.A. din producția de sortimente aliate mai mult de 90% sunt realizate prin acest procedeu.

De asemenea, structura sortimentală a produselor turnate continuu în România este simplificată, comparativ cu ceea ce se practică în alte state, unde se asigură laminoarelor și sleburi subțiri, profile și sârme de dimensiuni mici, semifabricate tubulare, rotunde cu diametrul până la 600 mm ș.a.

În metalurgia din țara noastră oțelul destinat produselor lungi este turnat continuu în proporție de 43%, iar pentru laminate plate 94%.

Un alt aspect analizat a fost gradul de utilizare a instalațiilor de turnare continuă menținute în funcțiune, care în România este în medie de 63% (mondial 90%). Ritmul lent de introducere a acestei tehnologii foarte avantajoasă, a adus România la un decalaj de aproximativ 15 ani în comparație cu nivelul existent în Uniunea Europeană.

Avantajele tehnico-economice pe care le prezintă turnarea continuă (îmbunătățirea calității produselor, creșterea productivității, reducerea costurilor de fabricație, eliminarea unor surse de poluare, etc.) impun ca în următorii 3-5 ani prioritatea nr.1 a restructurării siderurgiei să o prezinte extinderea acestei tehnologii moderne. Producția de oțelului turnat continuu în România în perioada 1989-2005 este următoarea (tabelul 1.5.).

1.7.2. Producători de brame

Magnitodorsk, Severstal, Novo Lipetk (Rusia)

Sunt cele mai mari uzine siderurgice din Rusia. Împreună au produs în anul 2000 cca 27.8 milioane tone oțel/an, ceea ce reprezintă jumătate din producția de oțel brut a Rusiei. Cele trei uzine dețin 23 de instalații de turnare continuă brame.

Severstal a fost construită în 1940 la Cerepoveț, situat la 600km nord de Moscova. A fost privatizată la 24 septembrie 1993. Novo Lipetk, al treilea producător de oțel, ca mărime, este amplasat la Lipetk, 700kmk sud de Moscova. A fost privatizată în anul 1993, iar în anul 1998 a vândut ultimul pachet de acțiuni (14.8%) firmei "Renaissance Securities Ltd" (Ziyern). Cele trei societăți, s-au orientat după dezmembrarea fostului U.R.S.S. pe exportul produselor proprii. După devalorizarea drastică a rublei în anul 1998, poziția lor competitivă pe piețele internaționale ale oțelului s-a îmbunătățit vizibil, în pofida creșterii prețurilor interne.

Magnitogorsk se menține în continuare la sortimentul său larg de produse, iar Severstal încearcă în prezent să lărgească activitățile comerciale din amonte și aval Novo Lipetk se concentrează în totalitate pe produsele plate și încearcă racordarea tehnologică la standardele vestice. Are 6 instalații de turnare continuă verticale cu două fire și realizează o producție de 4 milioane tone/an. Instalația nr. 6 a fost înlocuită cu una nouă care are capacitatea de 1.5 milioane tone/an.

30 Stadiul actual și perspective privind procesul de turnare continuă a oțelului - 1

Grosimea bramelor poate varia de la 200 la 260mm, iar lățimea până la 1850mm și sunt turnate toate tipurile de oțel.

Tabelul 1.5. Producția de oțelului tunat continuu în România

PRODUCĂTOR	INDICATOR	1989	1990	1992	1995	1997	2000	2005
TOTAL	C	4900	3558	2249	3174	3670	3814	4590
METALURGIE	P	36.5	39.1	44.7	50.2	57.0	73.1	85.5
SIDEX-ISPAT	C	4449	3252	1993	2831	3375	3476	4226
GALAȚI	P	58.1	60.2	68.6	68.4	73.3	94.3	93.6
SIDERURGICA	C	-	-	-	-	-	145	207
HUNEDOARA	P	-	-	-	-	-	38.5	69.7
COS	C	-	-	-	13	44	112	118
TÂRGOVIȘTE	P	-	-	-	3.4	13.4	33.7	40.2
DOŃASID	C	143	100	129	159	111	-	-
CĂLĂRAȘI	P	87.2	90.1	95.6	100	100	-	-
SOCOMET	C	308	207	127	154	140	85	39
OȚELUL ROȘU	P	80.4	80.2	90.7	96.9	98.1	99.1	100

UM: C = cantitate (mii t)

P = pondere de producție

Nova Hut (Republica Cehă)

Capacitatea de producție este de 1 milion tone/an.

Gama de produse include 88% oțel peritectic, 6% oțeluri cu conținut scăzut de carbon și 6% în gama de carbon 0.12%. Dimensiunile bramelor este de 125mm, iar înălțimea variază de la 740mm la 1575mm.

Cia Siderurgica Nacional (Brazilia)

A pus în funcțiune o instalație de turnare continuă cu două fire având o capacitate de 2.4 milioane tone/an în 1999. Se toarnă brame cu o lățime de 1800mm și grosimea de 200 sau 250mm. Gama de produse include oțeluri cu conținut scăzut, mediu și ridicat de carbon, oțeluri peritectice și microaliate.

Anyang Iron and Steel (China)

Are o instalație cu un singur fir pentru producerea a 670000 tone/an, pune în funcțiune în anul 1999. Se toarnă brame cu dimensiunile 210, 230 și 250mm, lățimea fiind de până la 1500mm.

Saudi Iron Steel (Arabia Saudită)

Mașina de turnat continuu cu un fir are o capacitate de producție de 825000 tone/an. A fost pusă în funcțiune în anul 1999, se toarnă brame cu grosimea de 220mm și lățimea de 1650mm.

Rautaruukki Raahse Seel (Finlanda)

Produce peste 2.8 milioane tone brame/an și a modernizat recent două instalațiile cu un fir. A construit o instalație adițională pentru brame cu grosimea de 150-270mm și lățimea de 2000mm.

Sollac Fos-sur-Mer (Franța)

Instalația de produs brame cu grosimea de 220mm și lățimea de 2200mm, are capacitatea de producție de 2.5 milioane tone/an. Sollac Fos este centrul Usinor-ului Pentru oțeluri cu conținut scăzut de carbon.

Ilva Taranto Works (Italia)

Dispune de patru instalații de turnare continuă brame cu două fire. Două au fost modernizate în perioada 1998-1999, iar celelalte două în anul 2000.

1.8. – Preocupări privitoare la cercetarea procesului de turnare continuă a 31 oțelului

Brame semi-groase

Din motive legate de productivitate și calitate, grosimea cristalizorului utilizat la turnarea bramelor subțiri s-a mărit gradual, de la 50mm la 70-90mm. Reducerea miezului lichid la o grosime finală de 50mm sau chiar mai puțin, s-a introdus pentru a compensa această mărire. Unii producători de oțel consideră că, această reducere nu este suficientă pentru calitatea produsului, în special pentru sortimente din tablă de oțel.

În perioada 1994-1998 s-a introdus turnarea continuă a bramelor semi-groase:

* **Tuscalosa Steel: 125mm**

* **Ipsco, Montpellier: 152mm.**

Recent, s-a pus în funcțiune cu succes în Europa noua turnătorie de brame semi-groase (100-125mm) la **Nova Hut, Ostrava, Republica Cehă.**

1.8. Preocupări privitoare la cercetarea procesului de turnare continuă a oțelului

Acțiunea de modernizare-restructurare a industriei siderurgice care se desfășoară la nivel mondial, are în vedere introducerea sau extinderea unor tehnologii mai eficiente și pe cât posibil nepoluante sau cu grad redus de emisii nocive în mediul înconjurător, așa cum este și procedeul de turnare continuă a oțelului. Cercetarea științifică și dezvoltarea tehnologică în ultimii 10-15 ani s-a orientat mai insistent spre perfecționarea acestui flux tehnologic, acționând în următoarele direcții:

Ridicarea nivelului calitativ al produselor prin:

- realizarea unei suprafețe fără defecte;
- diminuarea conținutului de incluziuni nemetalice;
- reducerea gradului de segregare a elementelor.

Creșterea productivității muncii.

Îmbunătățirea fiabilității instalațiilor.

Reducerea consumurilor energetice.

Majorarea coeficientului de scoatere.

Diminuarea cheltuielilor de producție.

Diversificarea structurii de fabricație în sensul:

- extinderii ponderii oțelului aliat și înalt aliat;
- realizarea prin turnare continuă a sleburilor subțiri, a profilelor și a sârmelor de dimensiuni mici, a semifabricatelor tubulare, ș.a.

Microalierea în distribuitor sau cristalizor prin utilizare de Mișmetal, FeTi, CaSi.

Purificarea oțelului în distribuitor cu ultrasunete, barbotare cu Ar, etc.

Agitarea electromagnetică a oțelului în cristalizor.

Perfecționarea fluxului de transport între oțelărie și laminor, pentru creșterea ponderii semifabricatelor turnate continuu și utilizate în stare caldă la prelucrarea în produse finite.

1.8.1. Perfecționări la nivel mondial a procesului de turnare continuă realizate de producătorii de instalații și semifabricate

Cercetătorii din multe țări, ca și cei din România, au acționat pentru extinderea și modernizarea tehnologiilor de turnare continuă. Din referințele care

32 Stadiul actual și perspective privind procesul de turnare continuă a oțelului - 1

privesc pe principalii constructori de mașini de turnat continuă rezultă preocuparea comună a acestora pentru realizări tehnice, care vizează:

- sisteme de protecție a jetului de oțel între oala de turnare și distribuitor, între distribuitor și cristalizor, controlul nivelului în distribuitor și cristalizor, agitarea electromagnetă în cristalizor și pe fir;
- soluții de tăiere a semifabricatelor cu flacăra oxi-gaz și mașini automate de marcat pe capătul semifabricatului;
- sisteme de susținere a oalei de turnare cu turn rotitor cu sau fără brațe basculante;
- realizarea unor mașini de turnat continuă cu fir curb și sistem de bară curbă rigidă;
- distribuitoare de capacitate mărită, cu construcție complexă, căptușită cu materiale performante, având șicane și filtre, eventual chiar componente mai complexe pentru controlul presiunii și al temperaturii, pentru continuarea operațiilor de rafinare și de adăugare a unor modificatori;
- cristalizoare cu sisteme automate de lubrifiere, dispozitive de oscilare, dispozitive de măsurare a nivelului oțelului și agitare electromagnetă, menită să asigure un foarte bun control al solidificării, cu efecte notabile asupra calității semifabricatelor;
- bare false rigide și role de susținere care să permită obținerea unei zone de răcire secundară de o suprafață cât mai mare;
- caje de tragere, capabile să realizeze compactizarea semifabricatului, dotarea cu aparatură de măsură și monitorizare a tuturor parametrilor de lucru, implementarea de programe de conducere a procesului de turnare și asigurarea calității.

Domeniile vitezelor de turnare, luate în considerare la calculul capacității de producție de către firme, sunt diferite și variază între minim 1.7m/min firma Manesmann și 3.8m/min la firma Danieli. Coeficientul mediu de scoatere de la lichid la țagă este cuprins între 92% la turnarea șarjă în cazul firmei Uek-Rokop și 99.4% la turnarea unei secvențe de 10 șarje în cazul firmei Danieli.

Toate realizările tehnice urmăresc să asigure controlul calității suprafeței, structurii interne a semifabricatului, precum și a toleranțelor dimensionale în limite foarte strânse. În aceste condiții o mașină de turnat continuu trebuie să demonstreze că prin alimentarea cu oțel lichid din fabricația curentă a oțelăriei, echipamentele sale componente sunt tehnic și funcțional adecvate, aparatura de măsură și control este sensibilă, iar programul de conducere automată este performant, asigurând obținerea de semifabricate de foarte bună calitate.

Cercetarea pe plan mondial în domeniu a urmărit atingerea acestor deziderate ajungându-se la concluzia că sunt necesare unele modificări în cea ce privește distribuitoarele. S-au realizat experiențe model ale fenomenului fluxului în diferite distribuitoare. Pentru a îmbunătăți productivitatea au fost dezvoltate tehnologii de mărire a vitezei de turnare, care vizau micșorarea defectelor de tipul: segregarea axei centrale, fisuri interne și de suprafață, precum și incluziunile nemetalice. Creșterea vitezei de turnare s-a obținut prin realizarea unor cristalizoare cu construcție mai specială (mai lungi și cu o mare viteză de răcire: Danam-Danieli, Fast-Cast-Rokop, Convex-Concast.

1.8.2. Perspectiva creșterii ponderii oțelului turnat continuu și tendințe de evoluție a producției mondiale de oțel

Pentru următorii 10-12 ani se previzionează o creștere anuală a producției de oțel de cca. 0.9% la cca. 1.8% pe an. Examinarea detaliată a scenariilor de evoluție a producției de oțel în diferite forme de pe glob, reflectând următoarele:

1.8. – Preocupări privitoare la cercetarea procesului de turnare continuă a 33
oțelului

► **Europa** va deveni un autofurnizor pentru piața de desfacere, aflată în extindere a produselor de oțel de calitate superioară. Tendința de export a produselor fabricate în Europa este în scădere.

► **America de Nord** este caracterizată de promovarea funcționării "mini-mills"-urilor care sunt alimentate cu fier vechi.

► **Regiunea Asia-Pacific** se caracterizează prin cea mai dinamică creștere a consumului și a producției de oțel pe următorii 10-12 ani.

► **Țările din Europa de Est și din CIS;** evoluția producției în aceste zone nu poate fi prevăzută. Majoritatea experților consideră că au încetat tendințele negative de evoluție a consumurilor specifice și a producțiilor de oțel. Se speră ca cererea internă a țărilor est-europene va limita exporturile de fontă brută și de produse din oțel pe termen lung.

Producția de oțel pe toate aceste zone este direct dependentă de adoptarea noilor tehnologii, de asigurarea structurii optime a încărcăturii metalice și de creșterea în continuare a producerii oțelului turnat continuu care asigură o valoare superioară a scoaterii.(Tabelul 1.6.)

Tabelul 1.6. Producția de oțel pe zone

Zona	Producția de oțel		Consumul de oțel*		Asig. cererii din producția internă	
	1995	2005	1995	2005	1995	2005
Europa de Vest*	169	167	158	158	11	9
Europa de Est & URSS**	112	119	70	76	42	43
America de Nord	123	132	136	136	-13	-4
America de Sud	35	48	24	37	11	11
Africa	14	19	15	17	-1	2
N&M Est	8	13	14	15	-6	-2
Japonia	102	96	98	92	4	4
China	93	125	110	140	-17	-15
Coreea	37	52	35	45	2	7
Taiwan	12	23	25	34	13	-2
India	20	34	22	37	-2	-13
Țările ASEAN	12	27	38	63	-26	-36
Ate țări din Asia	7	8	14	15	-7	-7
Oceania	9	9	7	7	2	2
TOTAL	753	872	766	872	-13	0

* Aprovizionare internă+importuri-exporturi. Surse:IISI, Euroconsult.

** Fostele țări aparținătoare URSS.

În prezent dezvoltarea lor s-a încetinit din următoarele motive:

- posibilitățile de absorbire a producției pe piață;
- o eventuală criză în aprovizionarea cu fier vechi de înaltă calitate.

Dacă până în anul 2010, producția de oțel va crește de la 750 mil tone, vor fi necesare surse de energie în plus față de cele existente (în principal cărbune cocsificabil, gaz natural și energie electrică). Dacă în 1975, încărcătura metalică a cuptoarelor electrice a fost asigurată doar de fierul vechi, aceste cuptoare electrice cu arc necesită fier vechi de înaltă calitate, iar aprovizionarea cu fier vechi se poate amplifica doar prin mărirea vitezei de colectare a acestuia, luându-se în considerare

rezerva tot mai mică a celui provenit din procesul de laminare (extinderea turnării continue).

Cea mai mare parte a necesarului de încărcătură metalică va trebui asigurată în continuare de fonta produsă în furnale, care va rămâne metoda de bază până în anul 2010, o creștere importantă fiind puțin probabilă din următoarele motive:

- investiții mari de capital și capacitățile mari de producție ale oțelărilor integrate;
- impactul cu mediul înconjurător al cocseriilor și al instalațiilor de sinterizare;
- deficiențele de coordonare a instalațiilor complete de elaborare și laminare.

Se prefigurează o criză de încărcătură metalică pentru viitor (în ceea ce privește fierul vechi) ceea ce înseamnă o necesitate stringentă de studiere a posibilităților de optimizare a structurii încărcăturii și găsirea de alternative care să contracarează deficitul care se prefigurează.

Se are în vedere creșterea producției de înlocuitori de fier vechi, rezultată din instalațiile de reducere directă și așa-numitul "înlocuitor de fontă" produs de instalații de topire reducătoare (în principal COREX).

Industria metalurgică din România a fost restructurată în mod eșalonat pentru a asigura necesarul solicitat de ramurile economice, dar și pentru a participa la schimburile internaționale de produse din oțel în vederea compensării importului de materii prime. Capacitățile instalate în siderurgia noastră pot realiza produse cu valori ridicate, unele din acestea fiind și la export.

1.9. Concluzii

Turnarea continuă a oțelului a preocupat în ultimii 60-70 de ani, atât specialiștii cât și marile firme producătoare de oțel, aceste preocupări fiind motivate în primul rând, de performanțele economice ale acestui procedeu.

Crizele energetice mondiale, pretențiile asupra calității impuse de consumatori, necesitatea adaptării prețurilor la cererea pieții, au fost principalii factori care au stimulat dezvoltarea și generalizarea procesului tehnologic de turnare continuă.

Analizând datele prezentate în acest capitol, se observă un progres extrem de rapid al turnării continue a oțelului atât din punct de vedere metalurgic cât și în ceea ce privește construcția instalațiilor de turnare continuă.

În acest context, se observă o acțiune continuă de modernizare a industriei siderurgice, acțiune care se desfășoară la nivel mondial și care, are în vedere introducerea și extinderea unor tehnologii mai eficiente și pe cât posibil nepoluante, sau cu un grad de emisii nocive cât mai mic în mediul înconjurător, un astfel de procedeu fiind și procesul tehnologic de turnare continuă.

Tendința actuală a cercetătorilor din acest domeniu, constă în studierea influenței parametrilor tehnologici asupra calității semifabricatelor turnate continuu prin utilizarea modelelor științifice care reproduc procedeul cercetat cu ajutorul unor relații funcționale și care să permită găsirea unor soluții optime de acțiune într-un timp scurt, cu costuri reduse.

În concluzie, procesul tehnologic de turnare continuă a oțelului, atât sub aspect tehnologic cât și a celui referitor la instalația de turnare continuă, a fost și reprezintă în continuare o preocupare de bază a cercetărilor din domeniul siderurgic.

2. STUDIUL PARAMETRILOR TEHNOLOGICI AI PROCESULUI DE TURNARE CONTINUĂ ȘI INFLUENȚA LOR ASUPRA PROCESULUI DE SOLIDIFICARE

2.1. Factori de influență la turnarea continuă

La turnarea continuă a oțelului, formarea semifabricatului este condiționată de aceleași legi fundamentale ca și formarea lingoului care se obține în urma solidificării oțelului într-o lingotieră clasică. Totuși, la turnare continuă, factorii tehnologici au o influență considerabilă și sunt mult mai numeroși decât la turnarea clasică.

Pentru funcționarea practică este necesar să se cunoască cum progresează solidificarea oțelului lichid, de exemplu când și unde se solidifică complet un fir. Decizii cu privire la viteza de turnare, de exemplu, sau ale debitului apei de pulverizare se pot lua doar cunoscând progresul solidificării. 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.

Instalația de turnare continuă a oțelului. 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(figura 2.1.)

În continuare, să ne reamintim câteva noțiuni teoretice privind părțile componente principale ale instalației de turnare continuă, subliniind deasemenea, funcțiile tehnologice ale acestora, în cadrul funcționării practice a instalației.

Oala de turnare reprezintă elementul de legătură între cuptorul de elaborare a oțelului și mașina de turnare continuă și îndeplinește o serie de funcții tehnologice precum: 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.

Deasemenea, oala de turnare trebuie să prezinte o siguranță cât mai mare în exploatare și o durabilitate avansată a căptușelii refractare.

Distribuitorul urmează să distribuie oțel tuturor cristalizoarelor, fără pierderi majore de căldură, să permită impurităților grosiere să se ridice la suprafața băii de metal, să permită controlul fluxului de oțel în cristalizoare și trebuie să ofere suficientă capacitate de stocare pentru schimbarea oalei în cazul turnării secvențiale.

Capacitatea distribuitorului poate fi de 12 - 35tone, funcție de viteza de turnare și numărul de fire turnate, iar înălțimea distribuitorului trebuie calculată astfel încât, să asigure o adâncime suficientă a băii de oțel, iar atunci când oalele sunt schimbate, 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 distribuitor controlate cu dispozitive de oprire [7,8].

Materialele refractare utilizate pentru căptușirea distribuitorului trebuie să

fie de calitate superioară, să permită o funcționare cât mai lungă, fără întreruperi.

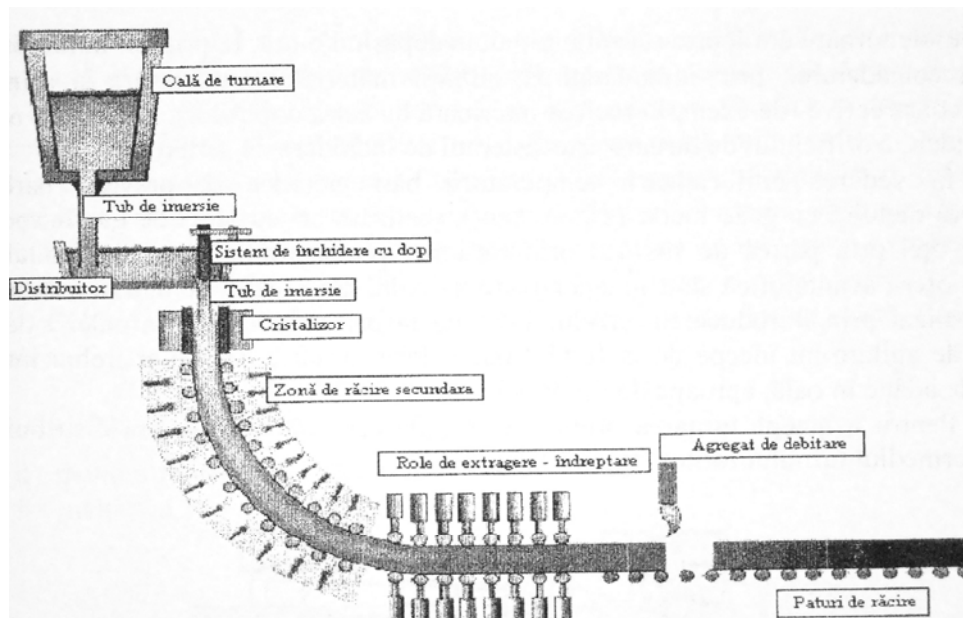


Figura 2.1. Instalația de turnare continuă. Părți componente.

Tuburile de imersie sunt țevi refractare, care montate în continuarea orificiului de turnare a distribuitorului și până sub nivelul metalului în cristalizor, au rolul de a conduce oțelul prin zgura de turnare, care plutește pe partea superioară a oțelului în cristalizor, astfel încât nici o particulă de zgură să nu fie antrenată în oțel.

Tuburile de imersie mai au rolul de a proteja oțelul lichid împotriva oxidării de către oxigenul din aer, din mediul înconjurător în drumul său de la distribuitor la cristalizor.

Cristalizoarele reprezintă partea cea mai importantă a mașinilor de turnare continuă, construcția lor, conductibilitatea termică, precizia de prelucrare și asamblare jucând un rol important pentru obținerea unei productivități maxime și a unei calități superioare a semifabricatelor. Cristalizorul determină forma secțiunii transversale a unui produs turnat continuu; 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.

Zona de răcire secundară, amenajată pentru finalizarea solidificării și ghidarea în condiții bune a firului, se realizează prin stropire directă cu apă, prin duze, asigurând contactul continuu și permanent apă-metal.

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. Decizii cu privire la viteza de turnare, de exemplu, sau ale debitului apei de pulverizare se pot lua doar cunoscând procesul solidificării. Fenomenele solidificării oțelului la turnarea continuă sunt mult mai complexe iar metodele de calcul analitice sunt prea

complicate și greu de aplicat în practica curentă. Ca urmare, în practica curentă, se folosesc formule simplificate, iar datorită faptului că în aceste formule nu sunt luați în calcul o serie de factori cu o influență mai mult sau mai puțin considerabilă, există posibilitatea apariției unor erori.

La începerea turnării continue, oțelul este turnat până în momentul în care cristalizorul este umplut (figura 2.2.), după care, fără a se opri turnarea oțelului, bara falsă montată anterior la fundul cristalizorului, împreună cu semifabricatul deja format iese din cristalizor și își continuă traseul în instalația de turnare continuă până la zona de răcire secundară și de acolo mai departe, prin rolele de tragere și îndreptare, spre instalația de debitare și patul de răcire.

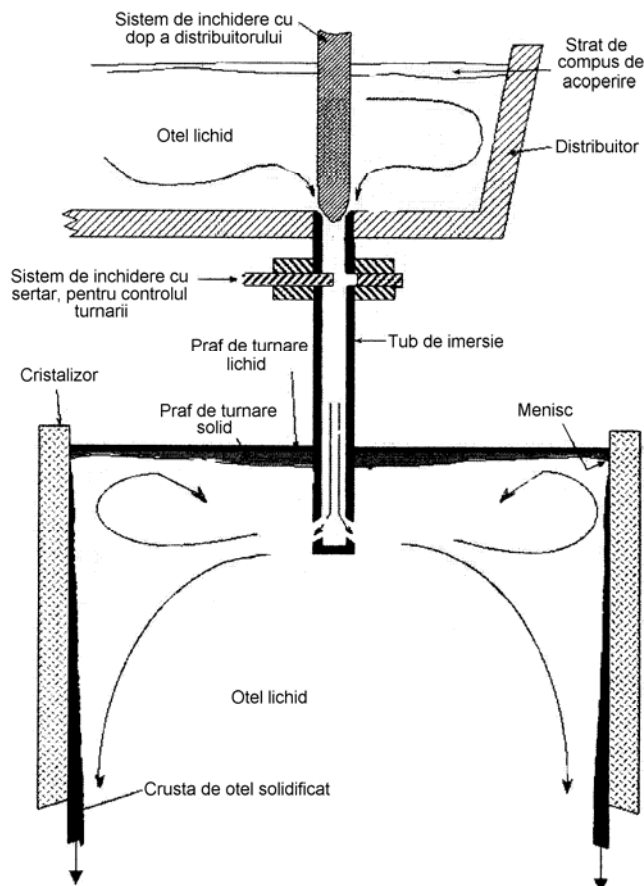


Figura 2.2. Turnarea oțelului din distribuitor în cristalizor

Înainte ca semifabricatul să părăsească cristalizorul are loc un schimb intens de căldură între suprafața exterioară a semifabricatului și pereții interiori ai cristalizorului, pereți care sunt puternic răciți cu apă. Răcirea care are loc în cristalizor ca urmare a schimbului de căldură, trebuie să asigure formarea unei cruste de oțel suficient de groasă, care trebuie să reziste în primul rând la eforturile

de tracțiune longitudinală (la deplasarea semifabricatului în raport cu pereții cristalizorului) și după ieșirea semifabricatului din cristalizor, crusta trebuie să reziste și la eforturile de tracțiune transversală (produsă de presiunea din interiorul oțelului).[5]

Solidificarea semifabricatului turnat continuu nu diferă prea mult de cea a oțelului turnat sub formă de lingouri. Însă, datorită faptului că în primul caz, lungimea semifabricatului turnat continuu este foarte mare comparativ cu cea a unui lingou, condițiile de formare a zonei axiale sunt schimbate (zona de oțel lichid, respectiv conul de solidificare se întinde pe o lungime mult mai mare).

Principalii factori de influență la turnarea continuă îi constituie temperatura, timpul și viteza de turnare.

2.1.1. Temperatura de turnare

Soluția ideală ar fi ca metalul lichid să ajungă la cristalizor la o temperatură constantă în timp, puțin superioară temperaturii de solidificare a oțelului respectiv. Acest lucru nu se poate realiza integral, deoarece pierderile termice în timpul turnării ating valori importante, ceea ce impune o supraîncălzire a oțelului la topire, asigurându-se astfel o temperatură suficientă pe întreaga perioadă a turnării continue. Ținând seama de specificul procesului tehnologic, temperatura metalului la sfârșitul elaborării este mai ridicată decât în cazul turnării în lingouri.

Temperatura oțelului în diverse faze ale procesului tehnologic depinde de următorii factori: calitatea oțelului (temperatura liquidus și solidus), mărimea șarjei și condițiile de amplasare a halei de turnare continuă în fluxul tehnologic (care determină pierderile de căldură a metalului din oala de turnare, până la poziționarea acesteia deasupra instalației de turnare continuă).

Influența variației temperaturii oțelului lichid

Pierderile de căldură (viteza de răcire) a oțelului lichid pe durata turnării continue trebuie să se încadreze în mod obligatoriu, în limitele permise de relația de calcul empirică, dependența lor determinându-se pe baza bilanțului termic.

În mod practic, compoziția chimică a oțelului, sistemul de răcire utilizat și secțiunea semifabricatelor, determină cantitatea de căldură posibilă de evacuat din oțelul lichid și deci, viteza maximă de solidificare, respectiv, viteza de deplasare a firului, adică viteza de turnare.[31]

Teoretic, fenomenul care determină procesul de solidificare are la bază legile transmisiei căldurii pe direcția lichid - perete cristalizor. În primă fază a solidificării crusta de oțel solidificat se află în contact cu peretele cristalizorului, după care se desprinde, lăsând un strat de aer subțire, care separă crusta de peretele cristalizorului.

Transmiterea căldurii în procesul de solidificare are loc astfel:

- prin conductibilitate, în crusta solidificată;
- prin conductibilitate, în peretele cristalizorului;
- prin convecție, în cristalizor și apă de răcire.

Totodată, în zona de desprindere are loc și transferul simultan de căldură prin radiație, conductibilitate și convecție în interstițiul de aer.

Ecuatia de transfer termic în zona de contact poate fi exprimată astfel:

$$\lambda_m \cdot \frac{\delta \theta_m}{\delta x} = \frac{\lambda_c}{\delta_c} (\theta_{sc1} - \theta_{sc2}) = a_{ca} (\theta_{sc2} - \theta_a), \quad \frac{J}{cm^2 \cdot s} \quad (2.1.)$$

unde: sc – suprafața de contact;

λ_m – conductibilitatea termică a metalului solidificat, $W/cm \cdot s^{\circ}C$;

θ_m – temperatura metalului solidificat, $^{\circ}C$;

λ_c – conductibilitatea termică a peretelui cristalizorului;

δ_c – grosimea peretelui cristalizorului, cm ;

α_{ca} – coeficientul de convecție de cristalizor – apă, $J/cm^2 \cdot s^{\circ}C$.

Pentru zona de desprindere ecuația devine:

$$\lambda_m \cdot \frac{\delta \theta_m}{\delta x} = E \sigma_x [(\theta_{sm} + 273)^4 - (\theta_{sc1} + 273)^4] = K(\theta_{sm} - \theta_{sc1}), \quad J/cm^2 \cdot sK \quad (2.2.)$$

unde: E – emisivitatea în interstițiu, $J/cm^2 \cdot sK$;

σ – constanta Stefan-Boltzmann;

K – coeficientul global de schimb de căldură, $J/cm^2 \cdot s^{\circ}C$.

Căldura transmisă prin conductibilitate în oțel se calculează cu ajutorul relației Fourier:

$$\rho_m \cdot \frac{\delta H}{\delta x} = \lambda_m \cdot \left(\frac{\delta^2 \theta_m}{\delta x^2} + \frac{1}{x} \cdot \frac{\delta \theta}{\delta x} \right), \quad J/cm^2 \cdot s \quad (2.3.)$$

unde: ρ_m – densitatea oțelului solidificat, g/cm^3 ;

H – entalpia oțelului solidificat, $J/cm^3 \cdot s$.

De regulă, rezolvarea unei astfel de ecuații diferențiale se realizează prin metoda diferențelor finite, astfel:

$$\rho_m (H_j^{i+1} - H_j^i) = \frac{\lambda_m}{\delta x^2} \left[\left(1 - \frac{\Delta x}{2x} \right) \theta_{j+1}^i + \left(1 + \frac{\Delta x}{2x} \right) \theta_{j-1}^i - 2\theta_j^i \right], \quad J/cm^2 \cdot s \quad (2.4.)$$

unde: t – timpul, s ;

i – timpul incremental;

j – spațiul incremental.

În acest mod, prin calcule succesive se determină din aproape, valoarea θ_m . Această valoare influențează calitatea suprafeței semifabricatului obținut și este dependentă în principiu, de temperatura oțelului lichid, pentru anumite condiții de funcționare a instalației de turnare continuă. Pe de altă parte, structura internă a semifabricatelor, ca rezultat al evoluției procesului de solidificare, depinde pentru majoritatea lor, de temperatura oțelului în distribuitorul instalației de turnare continuă.[12]

Reglarea temperaturii oțelului pe traseul distribuitor – cristalizor

Scăderea temperaturii oțelului turnat continuu se poate face și pe traseul distribuitor-cristalizor și chiar, în cristalizor ca urmare a răcirii miezului lichid al semifabricatului. În acest caz, se utilizează cristalizoare intermediare sau schimbătoare de căldură. Schimbătorul de căldură constă dintr-o placă de cupru răcită cu apă care se amplasează înclinat între distribuitor și cristalizor. Jetul de oțel din distribuitor cade pe placa de cupru, oțelul se solidifică parțial și intră în cristalizor. Pentru asigurarea coborârii neîntrerupte a crustei care se formează, odată cu oțelul lichid se transmit vibrații schimbătorului de căldură intermediar, prin intermediul unui vibrator.

Examinarea structurii semifabricatelor obținute a arătat că utilizarea cristalizoarelor intermediare conduce la mărirea de 2-3 ori a zonei cristalelor echiace, la dispersarea porozității axiale la micșorarea diametrului porilor. Structura semifabricatului obținut se caracterizează printr-o segregare negativă mai puțin pronunțată și practic, prin absența completă a segregăției pozitive în zona axială. Absența protecției oțelului față de oxidarea secundară este unul din principalele

neajunsuri ale schimbătoarelor de căldură.

Crustele metalice formate cu ajutorul schimbătoarelor de căldură dau naștere la centre suplimentare de cristalizare. Dacă aceste plăci nu se topesc în totalitate în miezul semifabricatului, în momentul atingerii de cristalizare, ele pot constitui o piedică în calea apariției cristalelor, acest fapt reprezentând un alt dezavantaj al procedeului.[13] Aceste dezavantaje pot fi eliminate prin utilizarea tehnologiei firmei ARBED, care constă în montarea unui tub refractar între schimbătorul de căldură și cristalizor. Metoda conduce la scăderea neomogenității axiale, ameliorarea structurii interne, creșterea densității centrale a semifabricatului, reducerea supraîncălzirii remanente, dar nu poate elimina complet efectul negativ al prezenței crustelor în procesul de germinare și creștere a cristalelor.

Reglarea temperaturii oțelului în cristalizor

Principala metodă pentru reducerea supraîncălzirii oțelului în cristalizor constă în introducerea răcitorilor consumabili, care pot fi exteriori (pregătiți în afara sistemului și introduși în cristalizor) și interiori (constituiți din cruste de oțel, formate nemijlocit în miezul semifabricatului, pe suprafețe speciale răcite cu apă).

Răcitorii exteriori sunt introduși în oțelul lichid sub diferite forme: alice, granule sau particule sub formă de bandă, tije, sârmă, tub cu umplutură formate din pulbere metalică. Un procedeu cu mare eficiență privind reglarea temperaturii oțelului în cristalizor, concomitent cu protejarea oxidării secundare a oțelului este FAST – SPAG (Stream Protection With Argon Gas).

Principalul avantaj al procedeului îl constituie protejarea jetului de oțel la intrarea în cristalizor cu ajutorul argonului, concomitent cu introducerea răcitorilor pulverulenți din pilitură metalică. Utilizarea procedeului conduce la creșterea zonei cristalelor echiace, scăderea gradului de supraîncălzire, reducerea porozității axiale și poate fi aplicat și la tunarea continuă a oțelurilor microaliate cu Al, Pb, B, S, etc., precum și a celor cu o anumită compoziție chimică prescrisă.

Temperatura oțelului la începutul turnării din cuptorul de elaborare poate varia în limite largi (1600 – 1700°C), în funcție de factorii menționați anterior; la majoritatea instalațiilor moderne, această temperatură este însă cuprinsă între 1620 – 1650 °C. Viteza de răcire a metalului în oala de turnare depinde de mărimea șarjei, respectiv de capacitatea oalei de turnare.[45]

În tabelul 2.1. am prezentat câteva valori ale vitezei de răcire. Temperatura din oala de turnare a metalului în timpul turnării continue trebuie să fie pe toată perioada cu 30 – 60°C peste temperatura de topire, fiind cuprinsă în general între 1570 și 1620°C.

Tabelul 2.1. Viteza de răcire a metalului funcție de capacitatea oalei de turnare

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

Temperatura din distribuitor trebuie să fie cu 15 – 40°C deasupra temperaturii de topire, fiind în general cuprinsă între 1550 – 1580°C.

Viteza de răcire în distribuitor variază la instalațiile de mare capacitate între 2 și 5 °C/min, timpul de staționare fiind de câteva minute, scăderea temperaturii în distribuitor este mică (10 – 20°C).

Pentru o funcționare corectă a instalației de turnare continuă, trebuie asigurat un control riguros asupra temperaturii oțelului. Precizia necesară față de temperatura prescrisă la intrarea în cristalizor trebuie să fie de $\pm 5...10^{\circ}\text{C}$. [14]

Dacă temperatura de turnare este prea ridicată, este necesară micșorarea sensibilă a vitezei de turnare și o răcire secundară foarte intensă, având ca și consecință defecte interne și de suprafață, datorate tensiunilor termice; de asemenea, temperatura prea înaltă a oțelului mărește pericolul străpungerii sub cristalizor. O temperatură de turnare prea scăzută poate duce la astuparea orificiilor de turnare ale distribuitorului, în special în cazul sleburilor subțiri sau a țagelilor de secțiune mică, precum și la defecte de suprafață.

2.1.2. Timpul de turnare

Timpul de turnare a unei șarje rezultă din capacitatea oalei și viteza de turnare. Timpul maxim de turnare depinde în primul rând de scăderea maxim admisă de temperatură, deoarece, după cum s-a arătat anterior, considerente metalurgice impun menținerea temperaturii de turnare între limite precise, în scopul obținerii unei calități corespunzătoare a produselor și al unei funcționări sigure a instalației.

De asemenea, tot un factor limitativ pentru timpul maxim de turnare al unei șarje îl constituie și durabilitatea materialelor refractare, în special pentru orificiile și dopurile de turnare.

În ultimul timp s-au făcut progrese importante în ceea ce privește durabilitatea, iar sisteme noi (cum ar fi sisteme de închidere cu clapă, răcirea cu aer a dopurilor, etc), permit perioade lungi de turnare fără întreruperi (turnare secvențială).

În practica curentă se urmărește turnarea cu viteză maxim admisă de calitate a oțelului și dimensiunile semifabricatului, ceea ce impune siguranță în exploatare (în special evitarea străpungerilor), respectarea distanței rezultată din proiectare dintre cristalizor și dispozitivul de tăiere, ținând seama că tăierea nu se poate efectua numai după solidificarea completă.

Limitarea dictată de capacitatea oalei de turnare provine de la faptul că la instalațiile moderne se preferă turnarea întregii șarje provenită de la un cuptor de elaborare într-o singură oală și timpul de golire a oalei nu poate depăși o anumită valoare maximă fără ca temperatura să scadă sub limita minim admisă.

Ținând seama de cele arătate mai sus, timpul maxim de turnare depinde de calitatea oțelului, metodele adoptate pentru micșorarea pierderilor de căldură în oală, capacitatea oalei și domeniul admis de temperatură pentru o funcționare sigură și o calitate bună a semifabricatelor.

Schoeffmann R. indică următoarea relație pentru determinarea timpului maxim admis de turnare în funcție de capacitatea și calitatea oțelului:

$$t = f \frac{\log G - 0,2}{0,3}, \quad [\text{min}] \quad (2.5.)$$

în care : G – reprezintă capacitatea oalei de turnare, t;

f – coeficient ce depinde de calitatea oțelului;

f = 10 pentru oțelurile cele mai pretențioase

f = 16 pentru oțelurile obișnuite. [42]

Pe baza acestei relații, timpul maxim de turnare este de 50 – 80 min pentru oale de 100 t și 60 – 100 min pentru cele de 300 t. În practică, deseori se consideră că pentru majoritatea sortimentelor uzuale de oțeluri și oale de capacitate mai mare de 100 t, se poate adopta un timp maxim de turnare de 60 min.

De exemplu, la mașina de turnare continuă țagle de la Huta Katowice, s-au obținut următorii timpi de turnare, din oală de 330 t (tabelul 2.2.).

Tabelul 2.2. Timpul de turnare din oală, funcție de mărimea semifabricatului

Mărimea formatului, [mm]	Timp de turnare din oala de 330t, [min]
□ 105	125
□ 140	96
□ 160	88
190 x 220	78

Se poate observa din figura 2.3. că timpul de turnare scade odată cu creșterea secțiunii semifabricatului turnat continuu.

Se menționează însă că pentru oțelurile calmate cu aluminiu, prelungirea timpului de turnare peste o anumită limită duce la micșorarea inadmisibilă a conținutului de aluminiu astfel, pentru oțelurile calmate cu aluminiu pentru ambutisare adâncă, timpul de turnare nu trebuie să depășească 40 min.

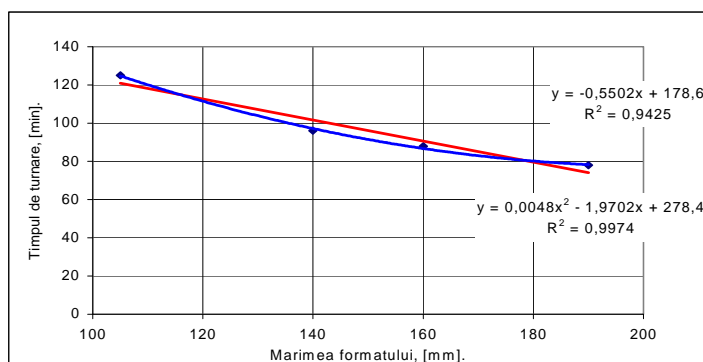


Figura 2.3. Variația timpului de turnare în funcție de mărimea formatului turnat continuu

2.1.3. Viteza de turnare

Viteza de turnare este factorul determinant pentru dimensionarea instalației de turnare continuă, deoarece influențează sensibil productivitatea, numărul necesar de fire (pentru a putea goli în timpul maxim admisibil oala de turnare de o anumită capacitate la turnarea unui semifabricat de secțiune dată) și secțiunea minimă a semifabricatului turnat.

În practică se alege viteza maximă admisă de turnare, în funcție de calitatea oțelului, secțiunea semifabricatului (și în special raportul dintre suprafața de cedare a căldurii și volum), timpul de solidificare și distanța dintre cristalizor și dispozitivul de debitare. O valoare prea mare a vitezei de turnare conduce la formarea unei cruste prea subțiri în cristalizor, fără o rezistență suficientă la presiunea ferostatică a miezului lichid, ceea ce are ca efect pericolul străpungerilor. De asemenea, viteza

prea mare mărește porozitatea axială, facilitează formarea fisurilor longitudinale și necesită o înălțime mare a instalației datorita creșterii adâncimii zonei lichide, respectiv a lungimii metalurgice.

O valoare prea mică a vitezei de turnare influențează negativ structura semifabricatului, produce suduri reci și alte defecte de suprafață, poate duce la răcirea excesivă a oțelului în oala de turnare și limitează debitul de metal care la rândul lui determină productivitatea instalației. De asemenea, vitezele mici de turnare limitează capacitatea oalei de turnare sau secțiunea minimă a semifabricatului și necesită un număr mărit de fire.[15]

Vitezele de turnare cele mai mari se aplică la oțelurile carbon calmate. Oțelurile necalmate se toarnă cu viteze considerabil mai reduse, pentru a permite completarea fierberii oțelului în cristalizor și degajarea gazelor.

De asemenea, oțelurile aliate trebuie turnate cu viteze mai scăzute din cauza sensibilității mai ridicate la porozitate centrală și la formarea fisurilor.

Datorită progreselor realizate în timp, vitezele de turnare au fost considerabil mărite la instalațiile noi, în special la instalațiile de turnare continuă a sleburilor. Astfel, dacă la primele instalații de turnare a sleburilor mari, viteza de turnare era în general de 0,5 m/min și nu depășea 0,7 m/min, la instalațiile mai recente, vitezele de turnare pentru sleburile de aceeași grosime sunt de circa 2,0 – 2,5 m/min, cu tendința de a se mărire și mai mult.

În acest sens, tot pentru mașina de turnare continuă de la Huta Katowice, s-au obținut și viteze de turnare mult superioare celor amintite anterior.

Se poate observa în figura 2.4. că și viteza de turnare scade odată cu creșterea mărimii formatului pentru semifabricatul turnat continuu (tabelul 2.3.).

Tabelul 2.3. Viteza de turnare funcție de mărimea semifabricatului

Mărimea formatului, [mm]	□ 105	□ 140	□ 160	190 x 220
Viteza de turnare, [m/min]	5,2	3,8	3,2	2,2

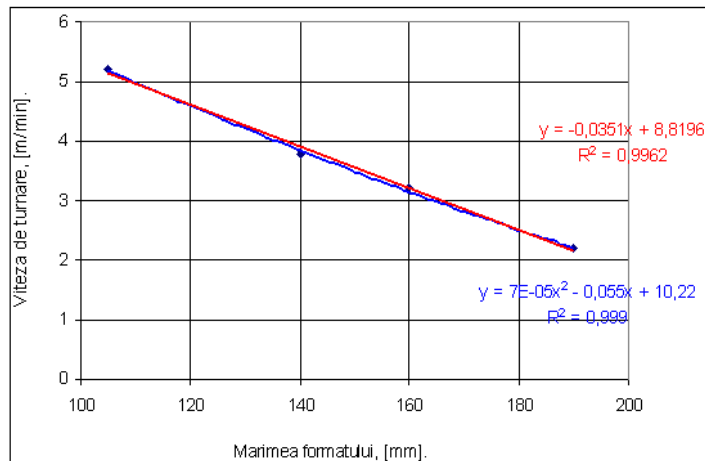


Figura 2.4. Variația vitezei de turnare în funcție de mărimea formatului semifabricatului turnat continuu

2.2. Solidificarea oțelului

Problema centrală a turnării continue este solidificarea oțelului, adică posibilitatea realizării condițiilor de răcire (directă și indirectă) pentru a se asigura degajarea căldurii conținute în metalul topit. Cercetarea și cunoașterea condițiilor de solidificare constituie baza teoretică a turnării continue, determinând condițiile de răcire în funcție de secțiunea și compoziția chimică a materialului, precum și unii dintre parametrii tehnologici constructivi ai instalației (viteza de turnare, numărul de fire, înălțimea și raza de curbare a instalației etc).

Particularitățile principale ale oțelului care influențează în mare măsură turnarea lui continuă sunt: temperatura înaltă de turnare, conținutul mare de căldură al oțelului lichid, conductibilitatea termică scăzută, difuzibilitatea termică joasă, viteza mare de cedare a căldurii prin radiație în stare lichidă, viteza mare de solidificare, etc.

Solidificarea metalului începe în cristalizor, la primul contact dintre metalul lichid și pereții cristalizorului, intens răciți cu apă și se consideră că s-a terminat doar înaintea rolor de extragere.

Cercetările efectuate în stadiul inițial au stabilit că pentru turnare continuă a oțelului este suficient să se formeze o crustă solidă relativ subțire în interiorul cristalizorului, iar solidificarea completă se poate efectua în afara cristalizorului, prin răcire directă.

Grosimea necesară a crustei solidificate la ieșirea semifabricatului din cristalizor depinde în primul rând de secțiunea produsului. [16]

Pentru țagălele mici este suficientă o crustă subțire, în timp ce secțiunile mari necesită o crustă mai groasă și mai rezistentă din cauza presiunii ferostatice mărite care acționează asupra semifabricatului la ieșirea din cristalizor. Din acest motiv, viteza de turnare scade pe măsura măririi secțiunii transversale a semifabricatului.

Semifabricatul ieșit din cristalizor, în curs de solidificare, este deci format dintr-o crustă solidă, având grosimea crescândă de sus în jos și dintr-un miez lichid, în formă de V.

Solidificarea acestui miez se realizează prin răcire directă cu apă (figura 2.5.).

Ținând seama de cele arătate, în principiu, procesul de solidificare la turnare continuă se compune din următoarele patru etape:

- Formarea rapidă a unei cruste subțiri în partea superioară a cristalizorului; grosimea crustei crește brusc datorită contactului direct cu pereții cristalizorului răciți cu apă.
- La o distanță mică de meniscul lichid, crusta solidificată este suficient de răcită pentru a se contracta, ceea ce face să dispară contactul dintre metal și cristalizor. Datorită interstițiului de aer dintre metal și cristalizor, condițiile schimbului de căldură se înrăutățesc, iar viteza de solidificare scade.
- Solidificarea miezului, sub efectul răcirii secundare cu apă provoacă o mare diferență de temperatură între suprafața și centrul semifabricatului turnat continuu.
- Egalizarea temperaturii pe secțiunea semifabricatului complet solidificată datorită răcirii în aer după zona de răcire secundară și transmiterea căldurii de la miez spre exterior și în continuare, răcirea întregii secțiuni în contact cu aerul.

Parametrul de bază al solidificării unui metal este viteza de formare a crustei solide, denumită și viteză de solidificare, care exprimă legătura dintre grosimea crustei și timp, și poate fi exprimată matematic printr-o lege parabolică de forma:

$$g = k\sqrt{t}, \text{ [mm]} \quad (2.6.)$$

în care: g reprezintă grosimea crustei solidificate;
 k – constantă denumită și coeficient de solidificare, mm/min ;
 t – timpul de la începutul turnării, min.[5]

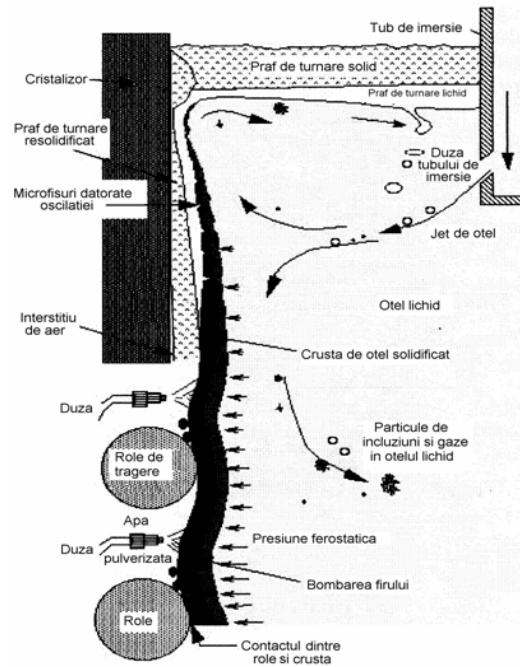


Figura 2.5. Schema solidificării primare și secundare la turnarea continuă

Din această relație rezultă că viteza de solidificare nu este constantă, ci scade în cursul procesului, datorită scăderii intensității solidificării pe măsura creșterii grosimii crustei.

Formula simplificată a legii solidificării a fost completată prin introducerea altor constante determinate empiric.

De exemplu Chipman propune pentru turnarea clasică formula:

$$g = -0,12 + 0,9\sqrt{t}, \text{ [mm]} \quad (2.7.)$$

După Lewis și Savage [6] pentru începutul solidificării este valabilă relația:

$$g = 0,12 (3 + 4t), \text{ [mm]} \quad (2.8.)$$

cea ce corespunde unei creșteri aproape liniare a crustei solidificate.

K.G. Speith și A. Bungeroth au calculat timpul de solidificare după formula:

$$t = D^2 - 33 \times 10^{-5}, \text{ [min]} \quad (2.9.)$$

sau după formulele simplificate a lui Klein :

$$t = \left(\frac{D + 52}{74,5} \right)^2 - \text{pentru secțiuni rotunde;} \quad (2.10.)$$

$$t = \left(\frac{D + 46}{6,6} \right)^2 - \text{pentru secțiuni pătrate,} \quad (2.11.)$$

în care t reprezintă timpul de solidificare [min];

D – diametrul sau latura secțiunii pătrate a semifabricatului turnat continuu.

Pentru solidificarea oțelului la turnarea continuă, sunt valabile în principiu aceleași legi ca și la turnarea în lingou, diferind însă valorile factorilor de influență (diferențele de temperatură dintre oțel și cristalizor, respectiv cristalizor și mediul ambiant sau mediul de răcire, conductibilitatea termică a cristalizorului, etc). [43]

Diferența esențială între turnarea în lingouri și turnarea continuă constă în faptul că în timp ce la primul procedeu materialul rămâne în lingotieră până la sfârșitul solidificării, astfel încât condițiile sunt aceleași pentru întreaga perioadă, la turnarea continuă, materialul după ce părăsește cristalizorul din cupru trece în zona de răcire secundară unde constanta de solidificare se mărește datorită contactului direct cu apa de răcire, păstrându-se însă tendința de scădere a vitezei de solidificare pe baza legii parabolice.

Datorită acestui fapt timpii totali de solidificare sunt mai mici cu circa 50% în cazul turnării continue decât la turnarea în lingouri, după cum rezultă din tabelul 2.4. Coeficientul de solidificare exprimă de fapt cantitatea de căldură evacuată din metalul turnat în unitatea de timp și depinde de caracteristicile instalației de turnare continuă (materialul și dimensiunile cristalizorului, debitul, viteza, presiunea apei de răcire în cristalizor și în zona de răcire secundară, viteza de turnare) și ale materialului turnat (calitatea oțelului, dimensiunile secțiunii transversale, supraîncălzirea oțelului). Însă, factorul determinant este eficacitatea răcirii în cristalizor și în zona de răcire secundară.

Datorită vitezei mici de solidificare a oțelului, sub nivelul de turnare din cristalizor se formează un con de câțiva metri de metal lichid (miezul sau zona lichidă).

Tabelul 2.4. Timpii de solidificare la turnarea în lingouri și la turnarea continuă

Secțiunea transversală a semifabricatului, [mm]	Timpul de solidificare, [min]	
	Turnare în lingouri	Turnare continuă
100 x 100	6	3
160 x 160	16	7,5
280 x 280	49	23

Necesitatea de a turna într-un timp relativ scurt cantități mari de oțel impune viteze ridicate de turnare, care asociate cu viteza scăzută de solidificare a oțelului conduc la adâncimi mari ale miezului lichid. Această adâncime crește pe măsura măririi secțiunii transversale a semifabricatului.

La aceeași intensitate de răcire secundară, miezul lichid se mărește în cazul secțiunilor dreptunghiulare față de cele pătrate de aceeași grosime, deoarece raportul dintre suprafața răcită și volum devine mai mic.

Lungimea miezului lichid este direct proporțională cu viteza de turnare și cu timpul de solidificare (sau invers proporțională cu viteza de solidificare) și rezultă din relația simplificată:

$$l = t_S \cdot v_t, [m] \quad (2.1)$$

în care: l – lungimea miezului lichid, [m];

t_s – timpul de solidificare completă, [min];

v_t – viteza de turnare, m/min.

Timpul de solidificare este o funcție directă a coeficientului de solidificare, care depinde de mai mulți factori. Un calcul teoretic mai precis al timpului de solidificare este foarte dificil și datorită faptului că coeficientul de solidificare are diferite valori în diversele etape ale procesului (prima perioadă după turnare, când există contact direct cu cristalizorul, după formarea interstițiului dintre metal și cristalizor, la răcirea directă prin stropire cu apă în zona de răcire secundară).[44]

În practică se calculează timpii de solidificare pe baza diferitelor relații și se alege valoarea maximă rezultată pentru a avea siguranță la proiectarea instalației; adâncimea miezului lichid este factorul hotărâtor pentru determinarea înălțimii, respectiv lungimii desfășurate a instalației, deoarece tăierea semifabricatului se poate efectua numai după solidificarea completă a acestuia.

Din cele prezentate anterior, se poate concluziona că, la turnarea continuă, o importanță mult mai mare o au problemele legate de formarea crustei de oțel solidificat, de rezistența acesteia la solicitările la care este supusă, condițiile de formare a zonei axiale, durata totală a solidificării. [17]

De asemenea, se pun probleme legate de natura și mărimea forțelor de frecare între crusta semifabricatului turnat continuu și peretele cristalizorului, de deformările crustei de oțel și implicit, de defectele care pot apărea; mai pot ridica probleme forma și materialele din care se confecționează cristalizatoarele etc.

2.2.1. Formarea crustei de oțel și înaintarea frontului de solidificare

Pentru determinarea zonei solidificate și deci pentru a putea determina forma și dimensiunile conului de solidificare, în literatura de specialitate sunt menționate o serie de metode experimentale, dintre care menționez: vărsarea părții nesolidificate a semifabricatului turnat continuu, introducerea unor indicatori radioactivi (metoda radiografică) și determinarea temperaturii în interiorul semifabricatului prin folosirea unor cuple termoelectrice. Astfel, metoda radiografică constă în introducerea în firul turnat continuu, la sfârșitul turnării, a unui izotop radioactiv de fosfor (P^{32}) sau de sulf (S^{35}), însoțită de turnarea de plumb lichid.

După solidificare, din semifabricat s-au tăiat probe longitudinale și transversale, care, după ce au fost lustruite, au fost radiografiate. Radiografiile obținute au pus în evidență forma și poziția conului de solidificare, după poziția plumbului din structura semifabricatului (figura 2.6).

În ceea ce privește a treia metodă, aceasta a fost realizată folosindu-se cuple termoelectrice Pt-Pt-Rh, care au fost așezate pe marginea cristalizorului.

Sudura cuplurilor a fost protejată, iar indicațiile cuplelor a fost înregistrată cu ajutorul unui aparat special, după care, în funcție de curba de variație a temperaturii în funcție de timp, s-a determinat timpul de solidificare completă a oțelului din semifabricatul turnat continuu.

Din analiza diagramelor care se obțin, (figura 2.7), se poate trage concluzia că frontul de solidificare nu reprezintă o suprafață uniformă, curbă sau rectilinie, constatându-se ridicături și adâncituri, datorate neuniformității răcirii semifabricatului în cristalizor, viteza de creștere diferită a cristalelor primare, etc.

Mai ales la oțelurile inoxidabile, variația grosimii crustei de oțel solidificat este foarte neuniformă.

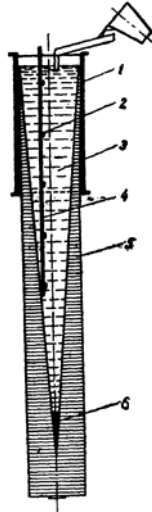


Figura 2.6. Determinarea adâncimii și forme concavității cu metal lichid prin introducerea în semifabricat a plumbului și a izotopului radioactiv de fosfor
 1 - cristalizor; 2 - izotop de fosfor; 3 - oțel lichid;
 4 - tijă de oțel; 5 - crustă solidă; 6 - plumb

Trebuie precizat că solidificarea oțelului se realizează într-un anumit interval de temperatură (solidus - liquidus). Astfel, în semifabricatul în curs de solidificare se găsesc simultan trei zone distincte și anume: o zonă solidă, o zonă bifazică solid - lichid și o zonă de oțel lichid. Zona bifazică reprezintă un schelet de dendrite, între ramificațiile cărora se află metal cu o compoziție asemănătoare cu a oțelului lichid din interiorul conului de solidificare.

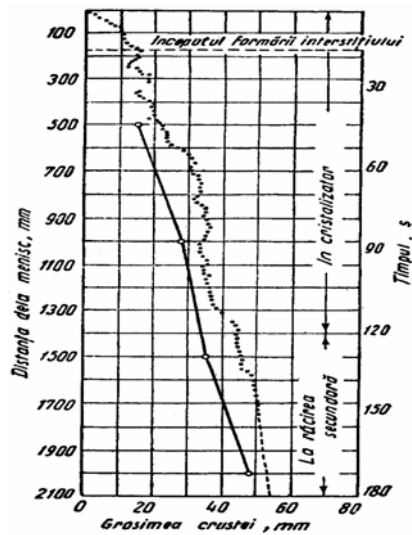


Figura 2.7. Variația grosimii crustei pe înălțimea unui semifabricat cu secțiunea de 150 x 475 mm, turnat cu o viteză de 700 mm/min
 ---- pe fețele late; — pe fețele înguste

Dacă se folosește pentru măsurarea crustei de oțel solidificat (și implicit adâncimea și forma conului de solidificare) metoda cu deversarea oțelului rămas lichid, trebuie să se țină seama și de prezența zonei bifazice. Prin folosirea metodei cu izotopi radioactivi, se poate delimita numai zona bifazică de cea lichidă (indicatorul radioactiv nu pătrunde din lichid prin ramificațiile dintre dendritele formate).[18]

Pentru a realiza un calcul aproximativ a înaintării frontului de solidificare, trebuie să se admită o serie de ipoteze simplificatoare; cea mai importantă dintre acestea este aproximarea că temperatura la care are loc solidificarea metalului este constantă. Astfel, la analiza unei diagrame de temperaturi pentru un semifabricat turnat continuu, se poate spune că distribuția temperaturilor în regiunea din semifabricat aflată în curs de solidificare, este liniară.

De asemenea, considerând că solidificarea are loc doar în intervalul $T_1 - T_s$ (temperatura lichidus – temperatura solidus), se obțin următoarele expresii pentru lățimea zonelor solidă și bifazică, în funcție de lățimea totală a crustei:

$$x_1 = x_3 \cdot \frac{T_s - T_{suprafata}}{T_1 - T_{suprafata}}; \quad [\text{mm}] \quad (2.13)$$

$$x_2 = x_3 \cdot \frac{T_1 - T_s}{T_1 - T_{suprafata}}; \quad [\text{mm}] \quad (2.14)$$

$$x_1 = x_2 \cdot \frac{T_s - T_{suprafata}}{T_1 - T_s}; \quad [\text{mm}] \quad (2.15)$$

unde: x_1 reprezintă grosimea părții complet solidificate a crustei, mm;
 x_2 – grosimea părții bifazice a crustei, mm;
 x_3 – grosimea totală a crustei, mm;
 T_1 – temperatura punctului lichidus, °C;
 T_s – temperatura punctului solidus, °C;
 $T_{suprafata}$ – temperatura suprafeței, °C.

Se poate determina de asemenea durata solidificării complete, ca sumă a intervalului de timp măsurat de la începutul solidificării și până în momentul când zonele bifazice se unesc și a timpului solidificării complete a așa-numitului "dop" bifazic.

Diametrul sau lățimea dopului bifazic, care se formează în momentul în care cele două zone bifazice se unesc pe axa semifabricatului se pot determina pe baza unor formule sau diagrame. Astfel, în literatura de specialitate se găsesc astfel de formule, pentru semifabricate turnate continuu de diverse secțiuni: circulară, pătrată, dreptunghiulară:

- pentru semifabricatele de secțiune circulară:

$$z_1 = \frac{v_t}{n \cdot \gamma \cdot k_1^2}; \quad [\text{m}] \quad (2.16)$$

$$z_2 = \frac{v_t}{n \cdot \gamma \cdot k_2^2}; \quad [\text{m}] \quad (2.17)$$

- pentru semifabricatele de secțiune pătrată:

$$z_1 = \frac{v_t}{4 \cdot \gamma \cdot k_1^2}; \quad [\text{m}] \quad (2.18)$$

$$z_2 = \frac{v_t}{4 \cdot \gamma \cdot k_2^2};$$

- pentru semifabricatele de secțiune dreptunghiulară:

$$z_1 = \frac{v_t}{4 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot k_{11}^2}; [\text{m}] \quad (2.19)$$

$$z_2 = \frac{v_t}{4 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot k_{22}^2} [\text{m}] \quad (2.20)$$

unde: z_1 reprezintă distanța ocupată de zona lichidă, [m];
 z_2 - distanța ocupată de zona bifazică, [m];
 v_t - viteza de turnare, [m/min];
 β - raportul dintre latura mare și latura mică a dreptunghiului;
 k_1, k_{11} - coeficienții pentru determinarea momentului când zonele bifazice se unesc;
 k_2, k_{22} - coeficienții pentru determinarea momentului solidificării complete.

2.2.2. Rezistența mecanică a crustei de oțel formată în cristalizor

Rezistența mecanică a crustei nou formate precum și mărimea forțelor de frecare între peretele interior al cristalizorului și această crustă, reprezintă factorii determinanți în alegerea condițiilor ce asigură formarea crustei.

Pentru determinarea practică a crustei, în literatura de specialitate sunt prezentate o serie de metode, în urma cărora s-a determinat că rezistența crustei abia formate depinde în mare măsură de diferența de temperatură pe grosimea ei.

Creșterea acestei diferențe, respectiv micșorarea temperaturii suprafeței semifabricatului are influență atât asupra măririi rezistenței părții complet solidificate a crustei cât și asupra modificării raportului dintre lățimea zonei bifazice și lățimea totală a crustei care are loc în aceste condiții. Astfel, este normal să se mărească la maxim intensitatea de răcire a semifabricatului din perioada în care acesta alunecă de-a lungul pereților cristalizorului.

Alunecarea sau frânarea și ruperea crustei depind de raportul dintre valorile forțelor de frecare F_f și valorile forțelor care rup crusta F_r . Alunecarea este posibilă în cazul în care $F_f < F_r$. Dacă însă $F_f > F_r$, crusta nou formată se va rupe.

Dacă

$$F_f = \mu N S_{fr} \cos \alpha, [\text{N}] \quad (2.21)$$

$$F_r = R_m S_{cr}, [\text{N}] \quad (2.22)$$

unde: μ reprezintă coeficientul de frecare;
 N - presiunea specifică;
 α - unghiul format de crustă cu peretele cristalizorului;
 R_m - rezistența la rupere la tracțiune a crustei;
 S_{fr} - suprafața de alunecare (de frecare);
 S_{cr} - secțiunea crustei la locul ruperii.

Înlocuind expresiile celor două forțe în condiția de rupere a crustei nou formate a semifabricatului turnat continuu, se obține pentru coeficientul de frecare expresia:

$$f \geq \frac{R_m \cdot S_{cr}}{N \cdot S_{fr} \cdot \cos \alpha} \quad (2.23.)$$

Din analiza acestei inegalități și prin înlocuirea valorilor pentru mărimile prezente, rezultă o valoare foarte mare pentru coeficientul de frecare (valoare aproximativ egală cu 10). Această valoare poate fi explicată prin faptul că, în timpul mișcării de alunecare a crustei pe pereții cristalizorului, au acționat asupra ei forțe de aderență, observându-se lipirea crustei prin puncte de pereții cristalizorului. În vederea micșorării acestor forțe de aderență, s-a încercat găsirea unor mijloace prin care să nu aibă loc lipirea crustei la pereții cristalizorului. În acest scop, inițial s-au utilizat diferite unsori aplicate pe peretele interior al cristalizorului. Au fost folosite astfel, pe post de unsori grafit, gudron îmbunătățit cu ulei de ricin și grafit, etc.

Cercetările în vederea găsirii unor prafuri sau a unor substanțe unguente au evoluat mult în ultimii ani, fiecare firmă metalurgică preocupându-se pentru găsirea unui compus care, pe lângă micșorarea frecării dintre semifabricat și cristalizor, și deci obținerea unui coeficient de frecare cât mai mic, trebuie să împiedice aderența crustei la pereții cristalizorului, prin formarea unei pelicule fine între semifabricat și cristalizor. [19]

Trebuie însă avut în vedere faptul că, în timpul alunecării crustei, acest compus nu trebuie să se descompună sau să ducă la formarea unor reziduuri care să mărească coeficientul de frecare.

2.2.3. Formarea zonei axiale a semifabricatului

Intensitatea și durata răcirii secundare depind de viteza de turnare și pot fi determinate pentru fiecare dimensiune concretă a semifabricatului, în funcție de viteza de extragere a acestuia, de distanța până la zona de răcire secundară și de gradientul de temperatură prescris.

De exemplu, pentru o secțiune de 240 x 270 mm, extrasă cu o viteză de cca 1 m/min, zona de răcire secundară trebuie să aibă o lungime de minim 1 m. Alegerea exactă a regimului răcirii secundare are o importanță deosebită, deoarece în cazul răcirii secundare incorecte, pot apare în semifabricat o serie de defecte. Practica arată că dacă se creează o răcire secundară foarte intensă, fețele semifabricatului devin concave, iar dacă răcirea secundară este insuficientă, acestea se bombează. Nu se poate trece peste faptul că abaterea formei semifabricatului de la cea prescrisă, duce la provocarea de rupturi pe suprafața deformată a crustei.

Dacă curbura fețelor este foarte mică, în funcție de compoziția chimică a oțelului solidificat și de distanța rupturii de la suprafața semifabricatului, aceste rupturi se pot prezenta sub forma unor porțiuni filiforme subțiri, cu sensibilitate mărită la atacul chimic; dacă curbura fețelor este foarte mare, rupturile pot avea aspectul unor fisuri de lățime și lungime variabilă. Poziția acestor rupturi depinde de sensul în care se curbează crusta și de momentul în care se produce curbarea.

Dacă curbura crustei se produce sub acțiunea unei răcirii de scurtă durată, însă prea intensă, imediat după ieșirea din cristalizor, atunci sensul ei va fi spre interior, iar rupturile vor fi situate nu prea departe de suprafața exterioară a semifabricatului (figura 2.8.).

Lungimea fiecărei rupturi va depinde de durata răcirii excesiv de intense. La o asemenea deformare, rupturile vor fi dispuse în evantai și fiecare dintre ele are direcție perpendiculară pe fața deformată. Dacă însă asemenea fisuri pot lua naștere în urma unei bombări a semifabricatului din cauza răcirii insuficiente a suprafeței acestuia, atunci fisurile sunt situate în apropierea colțurilor.

În concluzie, răcirea secundară poate constitui o cauză de defecte ale semifabricatului turnat continuu; de aceea, se impune o alegere corectă a regimului de răcire secundară.

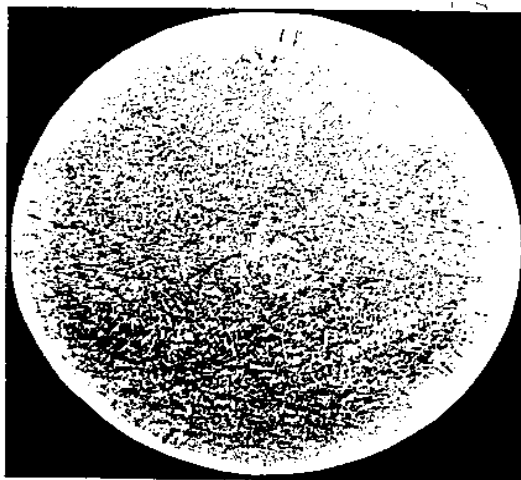


Figura 2.8. Fisuri longitudinale interne scurte, foarte aproape de suprafață

La alegerea regimurilor de răcire secundară, trebuie astfel procedat astfel încât gradientul de temperatură în crustă să nu provoace curbarea acesteia.

Această condiție este îndeplinită dacă gradientul de temperatură din crustă nu va depăși valoarea:

$$\Delta t = k \frac{T_l - T_s}{x} \cong 100^\circ\text{C} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.24.)$$

în care: k reprezintă coeficient; $k=1,2$

x – grosimea crustei solidificate, mm;

T_l, T_s – temperatura oțelului lichid, respectiv a crustei solidificate $^\circ\text{C}$;

Mărimea zonei de solidificare a semifabricatelor turnate continuu influențează condițiile de formare ale zonei axiale a acestora. Spre deosebire de lingourile clasice de oțel, la semifabricatele turnate continuu conicitatea naturală, respectiv unghiul sub care se întâlnesc fronturile de solidificare ce înaintează din părți opuse ale semifabricatului, este foarte mică. În aceste condiții, este îngreunată alimentarea porțiunilor axiale ale semifabricatului și crește considerabil viteza de deplasare a metalului lichid în raport cu limitele zonelor bifazice pe cale de a ajunge în contact.

Mărirea vitezei de turnare a semifabricatelor turnate continuu, indiferent de forma secțiunii lor, duce de asemenea la creșterea vitezei de deplasare a metalului lichid de-a lungul axei semifabricatului și la micșorarea conicității naturale.

Toate acestea conduc la o neomogenitate axială a semifabricatului. Însă, deși gradul de neomogenitate axială care rezultă în aceste condiții nu variază în afara limitelor admise și nu constituie o cauză de rebutare a oțelului turnat continuu, acest fapt trebuie luat în considerare la stabilirea regimurilor de turnare continuă.[20]

În literatura de specialitate, pe baza unor experimentări mai speciale, s-a ajuns la concluzia că vitezele optime de turnare, atât pentru semifabricatele de secțiune pătrată cât și pentru cele de secțiune dreptunghiulară, sunt cele apropiate de valoarea 1 m/min.

2.3. Cristalizorul, oscilatorul și lubrifierea în cristalizor

Lubrifierea în cristalizor are un rol determinant asupra transferului de căldură între crusta solidificată și cristalizor, cu efecte benefice asupra calității suprafeței semifabricatului de oțel turnat continuu. În practica industrială se aplică două metode de lubrifiere în cristalizor:

- lubrifierea cu ulei ;
- lubrifierea cu flux sintetic.

În instalații pilot există și încercări de lubrifiere în cristalizor cu ultrasunete, dar neaplicate industrial.

Lubrifierea cu ulei

În practica turnării continue a țaglelor, utilizarea uleiului pentru lubrifiere este tehnologia cea mai răspândită. Acest aspect se datorează considerentelor practice, deoarece este dificil de utilizat tuburi imersate la turnarea semifabricatelor cu secțiuni mici.

În plus, în cazul turnării continue a țaglelor suprafața meniscului fiind mică și viteza de turnare mare, consumul de flux sintetic ar fi foarte mare.

Mecanismul de lubrifiere este diferit în cazul utilizării uleiului, față de cel în care se folosește flux sintetic. Astfel, o peliculă de ulei care este introdusă în cristalizor (pe pereții acestuia), în zona de deasupra meniscului (zona rece) se descompune și formează o perdea de gaze care preîntâmpină lipirea crustei de pereții cristalizorului.

Transferul de căldură dintre crusta solidificată și peretele cristalizorului este de regulă cu 15 ... 20 % mai mare în cazul utilizării uleiului decât în cazul utilizării fluxului de lubrifiere, deoarece conductibilitatea termică a gazelor formate prin descompunerea uleiului este mai mare decât a stratului de flux sintetic topit.

Uleiul de lubrifiere trebuie să prezinte anumite calități și să îndeplinească anumite roluri.

Astfel :

- întrucât este distribuit la partea superioară a cristalizorului, ele trebuie să aibă următoarele proprietăți :

- vâscozitate cinematică, de 30 ... 35 cSt la 50 °C și 400 ... 600 cSt la 0 °C ;

- punctul de solidificare cuprins între -20 °C ... -40 °C ;

- să nu sedimenteze la temperaturi scăzute.

- pentru o bună stabilitate a transferului termic, crustă – cristalizor, uleiul trebuie să prezinte o bună stabilitate termică. Această stabilitate termică permite obținerea unui consum optim de ulei, (de regulă, între 0.1 și 0.6 L/m·min), precum și minimizarea pericolului de formare a suflurilor ;

- pentru asigurarea unor condiții bune de lucru pentru operator, respectiv pentru o bună vizibilitate a meniscului, uleiul de lubrifiere trebuie să îndeplinească următoarele condiții :

- la descompunerea sa, să se formeze o cantitate cât mai mică de gaz toxic ;

- să nu se descompună cu formare excesivă de scântei sau împrășcări ;

- la descompunere, uleiul nu trebuie să formeze reziduri care se pot depune pe pereții cristalizorului.[15]

În general, cel mai utilizat ulei pentru lubrifiere în cristalizor este uleiul de rapiță. În ultimii ani, au fost testate și alte uleiuri minerale sau sintetice, cu

rezultate benefice asupra îmbunătățirii calității semifabricatului. Totuși în practica industrială uleiul de rapiță rămâne cel mai utilizat datorită costului scăzut.

Lubrifierea cu fluxuri sintetice

Cel mai important element de reglare a fluxului termic din cristalizor este filmul de zgură format între crustă și cristalizor. Fluxul sintetic adăugat în cristalizor trebuie să îndeplinească următoarele funcții:

- să protejeze meniscul de oțel din cristalizor împotriva reoxidării ;
- să absoarbă și să capteze incluziunile oxidice care flotează la nivelul meniscului;
- să formeze un film de zgură care să permită un schimb uniform de căldură între crustă și peretele cristalizorului ;
- să formeze un film lubrifiant de zgură care să permită alunecarea mai ușoară a crustei fragile în cristalizor.

Aceste funcții pot fi asigurate prin alegerea corectă a materialelor din componența fluxului de lubrifiere, cu anumite proprietăți fizice și chimice.

Principalele proprietăți ale fluxurilor de lubrifiere sunt :

- intervalul de topire și viteza de topire ;
- vâscozitatea ;
- temperatura de cristalizare.

În tabelul 2.5. voi prezenta principalele caracteristici ale unor fluxuri de lubrifiere, frecvent utilizate în practica tehnologică.

Tabelul 2.5. Compoziția chimică și principalele caracteristici ale unor fluxuri de lubrifiere utilizate industrial

Domeniu de utilizare	Sleburii			Blumuri		Țagle
	%	%	%	%	%	%
CaO	38.7	37.05	32.3	31.6	21.6	26.0
SiO ₂	29.2	33.0	25.5	31.6	25.8	30.5
Al ₂ O ₃	4.2	6.5	7.8	7.6	11.8	5.6
TiO ₂	0.2	-	0.2	0.2	0.5	0.2
MgO	0.2	0.5	0.7	0.6	-	3.1
Na ₂ O	6.2	7.5	10.7	4.4	4.1	3.4
K ₂ O	0.6	0.5	0.8	0.6	2.0	0.4
Fe ₂ O ₃	2.5	1.0	2.4	2.3	4.4	1.0
MnO	0.1	-	6.4	0.7	-	0.04
F	6.0	7.0	6.0	4.7	4.9	4.3
C	3.5	4.0	5.4	8.5	20.0	22.7
Temperatura, °C						
De înmuiere	1100	1120	1045	1110	1170	1200
De topire	1175	1140	1120	1135	1245	1250
De curgere	1185	1170	1135	1165	1265	1255
Vâscozitatea la 1300 °C, (Pa·s)	0.159	0.36	0.12	0.4	1.5	0.7
Bazicitatea	1.32	1.15	1.27	1.0	0.84	0.85

Intervalul de topire al fluxului sintetic este de dorit să fie cât mai mare, deoarece în acest mod, filmul de zgură infiltrat între crustă și cristalizor rămâne lichid și asigură o lubrifiere mai bună.

Eficiența lubrifierii este strict dependentă de vâscozitatea zgurii. Atât timp cât zgura rămâne lichidă și omogenă, proprietățile de curgere ale acesteia sunt determinate de cuba de vâscozitate.

O bazicitate ridicată a fluxurilor sintetice utilizate favorizează capacitatea de absorbție a incluziunilor nemetalice, incluziuni care modifică totodată și vâscozitatea acesteia.

Majoritatea fluxurilor de lubrifiere prezintă o cădere bruscă a vâscozității în anumite intervale de temperatură, aflate în strânsă corelație cu bazicitatea zgurii. Această cădere, cunoscută sub numele de "punct de rupere", este cauzată de apariția în procesul de răcire a zgurii a unor cristale de solidificare.

Pentru un proces de turnare stabil, viteza de topire a fluxului trebuie să fie egală cu consumul de flux. În același timp, pentru o bună protecție termică a meniscului, un strat de flux netopit trebuie să acopere uniform baia de zgură topită.

Viteza de topire a fluxului poate fi controlată prin amestecarea acestuia cu un material cu un punct de înmuiere ridicat. Cele mai utilizate materiale în acest scop sunt praful de cocs și praful de grafit. Viteza de topire a fluxurilor sintetice depinde de asemenea, foarte mult, de tipul, proporția și granulația acestor materiale în fluxul de lubrifiere.

Pentru alegerea fluxului de lubrifiere optim, trebuie luați în considerare mai mulți parametri operaționali. Dintre aceștia, se pot menționa: stabilitatea meniscului, conținutul de incluziuni nemetalice în oțel, compoziția chimică a oțelului, supraîncălzirea oțelului. Pentru oțelurile inoxidabile și alte categorii de oțeluri cu conținut scăzut de carbon au fost realizate fluxuri cu conținuturi mici de carbon[21].

Analizând procesul de lubrifiere în cristalizor rezultă următoarele concluzii :

- în practica industrială se aplică două metode de lubrifiere în cristalizor :
 - cu ulei ;
 - cu flux de zgură sintetică ;
- din punct de vedere tehnologic este de dorit ca lubrifierea să aibe loc cu flux de zgură sintetică ;
- pentru instalațiile de turnare continuă a blumurilor și țagelilor, aceste

fluxuri de zguri sintetice trebuie să aibă $\frac{CaO}{SiO_2} = 0.9 - 1.1$

În cristalizor are loc răcirea primară și solidificarea crustei marginale. Desfășurarea proceselor fizico-chimice în această zonă are o influență directă asupra calității suprafeței și a stratului subcutanat.

Modul de direcționare a jetului de oțel în cristalizor influențează formarea crustei prin curenții de convecție pe care îi generează. De asemenea, modul de curgere a oțelului în cristalizor poate favoriza sau împiedica flotarea incluziunilor nemetalice. Adâncimea de imersie, diametrul și orientarea orificiului imersat depinde de formatul cristalizorului și de viteza de turnare.

Descentrarea tubului imersat față de axa longitudinală a cristalizorului conduce la formarea unei cruste neuniforme în secțiunea transversală a semifabricatului, mărinnd astfel posibilitatea deformării ei sub acțiunea presiunii ferostatice, ceea ce poate provoca fisuri sau chiar, în situații extreme, perforarea firului. Din acest motiv, este necesar ca la montarea orificiilor de evacuare ale distribuitorului să se monteze un șablon care să țină cont de poziția axelor verticale ale cristalizoarelor ale mașinii de turnare continua.

Conicitatea cristalizorului se stabilește funcție de contracția cruste marginale și de pierderea de căldură în cristalizor în funcție de dimensiunile semifabricatului la ieșirea din aceasta, conform relației:

$$L_{ieș} = L_{int}(1 + a \cdot \Delta T) \quad [\text{mm}] \quad (2.25)$$

unde: $L_{ieș}$ – dimensiunea laturii la ieșirea din cristalizor, mm;
 L_{int} – dimensiunea laturii la intrarea în cristalizor, mm;
 a - coeficientul de contracție a oțelului;
 ΔT - pierderea de temperatură în cristalizor, °C.

De regulă, conicitatea cristalizorului trebuie să fie continuă, fără contrapante locale. Totuși, în cazul unor cristalizoare tubulare, profilul conicității poate prezenta mai multe pante sau poate fi parabolic.

Pentru obținerea unei calități constante și corespunzătoare a cruste marginale este necesar controlul permanent al conicității cristalizorului și a stării suprafeței lui interioare. Uzura cristalizorului influențează probabilitatea de apariție a fisurilor superficiale.

Cristalizorul mașinii de turnare continuă este confecționat din cupru sau aliaje ale cuprului cu conductibilitate termică mare. Durabilitatea cristalizorului nu este mare, uzura sa fiind cauza formării fisurilor stelare observate pe suprafața produselor turnate continuu.[21]

Pentru a măări durabilitatea cristalizorului și pentru a preveni apariția fisurilor stelare, în mod obișnuit, cristalizorul este acoperit cu un strat de crom sau nichel.

La Sumitomo Metal Industries s-a dezvoltat o nouă tehnologie de acoperire a cristalizorului, constând din depunerea succesivă a trei straturi protectoare:

- primul strat – nichel electrolitic;
- doilea strat – polinită (aliaj pe bază de nichel);
- al treilea strat – crom electrolitic.

Stratul de nichel are un coeficient de dilatare apropiat de cel al cuprului (tabelul 2.6.) și se depune pentru a ușura aplicarea stratului de polinită.

Tabelul 2.6. Coeficienți de dilatare pentru diferite elemente

Materialul	Cu	Cr	Ni
Coeficientul de dilatare	$17.1 \cdot 10^{-6}$	$6.6 \cdot 10^{-6}$	$13,3 \cdot 10^{-6}$

Oscilația cristalizorului contribuie la creșterea eficienței lubrifierii cristalizorului, prin aceasta micșorându-se frecarea dintre suprafața semifabricatului care se solidifică și peretele de cupru, concomitent cu îmbunătățirea calității suprafeței semifabricatului turnat continuu.

Odată cu perfecționarea instalației de turnare continuă s-au realizat și modificări importante ale sistemelor de oscilație a cristalizorului.

Oscilarea sinusoidală a cristalizorului are o răspândire largă datorită simplității realizării acesteia. Creșterea frecvenței oscilațiilor și micșorarea duratei de "contracție negativă" în cadrul oscilației sinusoidale au permis micșorarea adâncimii urmelor de oscilație pe suprafața semifabricatelor turnate continuu.

Pentru studierea frecării la oscilația cristalizorului cu acționare mecanică au fost utilizate extensometre, dinamometre sau indicatoare de accelerație și chiar intensitatea curentului din bobina motorului de acționare excentrică.

Analiza procesului de lubrifiere în cristalizor se face pe baza măsurătorilor tehnologice ale forțelor necesare pentru mersul înapoi al cristalizorului atât în cazul folosirii arcurilor, cât și în cazul comenzii acționării hidraulice.

Forțele de frecare în cristalizor la turnarea sleburilor reprezintă doar circa 5% din forțele de inerție, suficiente pentru o avansare vizibilă a semifabricatului în sus și în jos, în special, atunci când forța de tragere este sincronizată cu ciclul de oscilație.

Cu ajutorul valorilor obținute prin măsurarea forței de frecare în cristalizor se poate determina coeficientul de frecare, acesta variind între 0,1 și 0,3 la turnarea sleburilor la care se utilizează ca lubrifianți prafurile de lubrifiere (sau zgura sintetică). Totuși, acesta poate avea și valori mult mai ridicate, de 0,4...0,7 în cazul utilizării cristalizorului staționar și al lubrifierii cu ulei. Pe parcursul unui ciclu de oscilație, frecarea depinde de parametrii de oscilație și viteza relativă de deplasare a cristalizorului și semifabricatului.

Urmele de oscilație se definesc ca adâncituri caracteristice, repetate periodic, pe suprafața semifabricatelor turnate continuu și apărute ca urmare a oscilației cristalizorului, zone în care defectele de suprafață ale semifabricatului de oțel sunt mai favorizate.

Apariția lor se datorează faptului că suprafața concavă a meniscului continuă să se deformeze în timpul procesului de "contractare negativă", după care, la deplasarea cristalizorului în sus, are loc revenirea acesteia. Rezultă că, adâncimea urmei se poate stabili, în general prin mărirea presiunii hidrodinamice exercitate de lubrifianți pe suprafața meniscului, fapt confirmat de cercetările pe modele fizico-matematice.

Pe baza acestora, este explicabilă apariția unui număr mai mic de urme, cu adâncime mai mică, în cazul lubrifierii cu ulei, comparativ cu lubrifierea cu zgură, pentru cazul oscilațiilor de joasă frecvență ale cristalizorului. În practica tehnologică, adâncimea urmelor se stabilește în funcție de următorii factori: durata de "contractare negativă", frecvența și amplitudinea oscilațiilor, pasul urmelor de oscilație, viteza de turnare, compoziția chimică a oțelului, etc.

Există o mare varietate de mecanisme de oscilație. Printre acestea, o largă răspândire a căpătat-o mecanismul de oscilare a cristalizorului cu o *pârghie scurtă*, pus la punct de către firma Concast (Elveția). În vederea amortizării forțelor apărute în timpul funcționării mecanismului, acesta este fixat pe o fundație masivă din beton.

O variantă mai complexă a acestui mecanism utilizează reglarea de la distanță a amplitudinii oscilării cristalizorului cu ajutorul unui dispozitiv de acționare excentric.

În general, modul de oscilare a cristalizorului este sinusoidal, dar există și tendințe pentru realizarea oscilării nesinusoidale, neaplicate încă industrial.

Alegerea parametrilor de oscilare a cristalizorului se face în funcție de viteza de turnare, conform relației:

$$\frac{v_t}{n \cdot A \cdot f} = \cos(n \cdot \beta) \quad (2.26)$$

unde: v_t – viteza de turnare, m/s;

A – amplitudinea de oscilare, m;

f – frecvența de oscilare, Hz;

β – stripajul negativ, $\beta = T_c/T$;

T – perioada oscilației, s;

T_c – timpul de cicatrizare (timpul pentru care viteza în sensul descendent a cristalizorului este mai mare decât a firului), s.

Această relație poate conjugată cu cea care impune limitarea adâncimii mărcilor de oscilație prin mărirea numărului lor:

$$T_C = \left[\arccos\left(\frac{d}{nA}\right) \right] / n \cdot f \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.27)$$

unde: d – distanța dintre două mărci de oscilație consecutive, mm, adică:

$$d = v_t / f \quad [\text{mm}] \quad (2.28)$$

Astfel, prin adoptarea unui mod de oscilare cu frecvență ridicată și amplitudine mică se realizează o calitate mai bună a suprafeței.[11]

Formarea crustei începe chiar de la nivelul meniscului. Frația de solid la acest nivel depinde de intensitatea schimbului de căldură. Cu cât schimbul de căldură între oțel și cristalizor este mai intens, cu atât crusta rezistă mai bine la presiune ferostatică. Acest mecanism joacă rol decisiv în privința calității suprafeței.

Astfel:

- contracția crustei reduce aria suprafeței de contact dintre suprafața semifabricatului turnat continuu și pereții cristalizorului, conducând la o creștere inegală a crustei și la o structură de solidificare neregulată, generatoare de fisuri de suprafață și subcutanate;

- în urma contracției la nivelul meniscului, crește probabilitatea antrenării și înglobării bulelor de gaz și a macroincluziunilor care flotează în această zonă.

Ca atare, pentru optimizarea procesului tehnologic este necesară reducerea fluxului de căldură la nivelul meniscului și favorizarea unui contact mai bun între semifabricatul turnat continuu și cristalizor. Acest obiectiv este important în special, pentru oțelurile cu un conținut de carbon de circa 0,12 %, oțeluri caracterizate prin desfășurarea reacției peritectice la sfârșitul solidificării.

În aceste condiții, pentru astfel de oțeluri, microsegregațiile elementelor reziduale de tipul P și S sunt diminuate, aspect favorabil calitativ.[22]

Ca urmare a transformării $\delta \Rightarrow \gamma$, manifestată prin micșorare de volum, are loc o creștere a contracției. Din acest motiv, mai ales la turnarea acestor oțeluri, este importantă reducerea fluxului de căldură în zona meniscului, în scopul întârzierii solidificării inițiale și a contracției crustei la nivelul meniscului.

Întârzierea formării crustei inițiale se poate realiza prin:

- mărirea supraîncălzirii, dar cu consecințe asupra probabilității de perforare a firului;

- adoptarea unui anumit mod de curgere a oțelului, care să asigure acest deziderat, prin corelarea unghiului de ieșire a orificiilor tubului imersat cu adâncimea de imersare.

Uniformitatea creșterii crustei este influențată pozitiv de creșterea schimbului de căldură prin convecție. În acest sens se recomandă utilizarea agitării electromagnetice.

Totuși, cel mai important regulator al fluxului termic este filmul de zgură format între semifabricatul turnat continuu și peretele cristalizorului, care are totodată și rol de lubrifiant. Fluxul de căldură și forța de frecare dintre semifabricat și cristalizor depind, după o lege parabolică, de produsul $\eta \cdot v_t^2$:

unde: η - vâscozitatea cinematică a zgurii la 1300 $^{\circ}\text{C}$, poise;

v_t - viteza de turnare, m / s.

Fluxul de căldură și forța de frecare prezintă un minim la aproximativ 5 poise·m²/min². De aici, rezultă că ideală ar fi utilizarea unor fluxuri specifice pentru fiecare marcă de oțel și secțiune transversală, ceea ce este imposibil de realizat din punct de vedere practic. Din această cauză, se introduc în fluxurile de turnare

modificări ai vâscozității, cum ar fi de exemplu: Na_2O , LiO_2 , CaF_2 . Din punct de vedere al compoziției, fluxurile sunt realizate, de regulă, în sistemul de bază $\text{SiO}_2 - \text{CaO}$, având raportul $\text{CaO} / \text{SiO}_2 = 0,9 - 1,2$.

Pe de altă parte, variațiile temperaturii în cristalizor în timpul turnării continue sunt minime pentru $\eta \cdot v_t = 1,8 - 2,2$ poise·m/min, ceea ce indică o infiltrare uniformă a zgurii între fir și cristalizor și deci, o lubrifiere corectă, necesară reducerii probabilității apariției fisurilor superficiale sau chiar perforării firului turnat continuu.

Stabilirea judicioasă a compoziției fluxului pentru turnarea continuă are o influență hotărâtoare asupra calității suprafeței deoarece în cazul utilizării unor anumite zguri poate să se producă fenomenul oxidării aluminiului din oțel

Datorită acestui fapt, pentru oțelurile dezoxidate cu Al, cu conținut redus de oxigen, s-au creat fluxuri fără SiO_2 .

Ca urmare a derulării reacției are loc o creștere a vâscozității zgurii prin îmbogățirea acesteia cu Al_2O_3 , fenomenul putând cauza antrenări de zgură pe suprafața semifabricatului turnat continuu.

De asemenea, poate avea loc și micșorarea conținutului de elemente de aliere (mai ales Ti, B) din oțel, atunci când sunt îndeplinite condițiile termodinamice. Din acest motiv, se utilizează fluxuri cu conținuturi de TiO_2 sau BN, care au rol de a micșora gradientul de concentrație între fluxul topit și oțel și deci, de a realiza un raport de repartiție cât mai apropiat de echilibru.

Concomitent cu rolul de prevenire al nitrurării borului, nitrura de bor are și rol de a regla comportamentul de topire al fluxului, în sensul că, adaosul de BN are efect micșorarea grosimii băii de zgură, cu implicații benefice asupra grosimii filmului de lubrifiant și deci asupra forțelor de frecare. Forța de frecare în cristalizor crește cu creșterea vâscozității fluxului topit și scade cu creșterea grosimii filmului dintre cristalizor și semifabricat turnat continuu.

Totuși, chiar în cazul în care fluxul pentru cristalizor este corect ales, pot apărea defecte pe suprafața firului turnat continuu, datorită variației nivelului meniscului de oțel. Componentele fluxurilor pentru turnarea continuă nu se topesc totdeauna uniform din cauza punctelor de topire diferite.

O tendință recentă constă în utilizarea ca bază a așa numitului "stoc pretopit", care este obținut prin topirea concomitentă a principalelor componente, urmată de pulverizarea acestora până la dimensiunea dorită, după care se realizează adaosurile necesare pentru modificarea compoziției.

Utilizarea uleiurilor de rapiță pentru lubrifierea cristalizorului permite generarea unor mărci de oscilație mai mici, dar prezintă inconvenientul că fluxul de căldură din cristalizor este mai ridicat decât în cazul utilizării fluxului sintetic.

Mărirea fluxului de căldură provoacă o creștere neuniformă a crustei și apariția unor denivelări ("depresiuni") în cazul oțelurilor cu contracție pronunțată, ceea ce poate conduce la apariția fisurilor superficiale.

Reglarea nivelului meniscului în cristalizor presupune existența unei bucle de automatizare în care nivelul măsurat al elementului primar este comparat cu nivelul prescris și, în funcție de rezultatul obținut, se acționează elementul de obturare al orificiului de evacuare din distribuitor.

Elementul primar care realizează detectarea nivelului meniscului poate fi:

- sursă radioactivă ($\text{Co } 60$);
- sursă electromagnetică;
- sursă optică (laser sau infraroșu);
- sursă combinată (electromagnetică + optică).

Primele detectoare ale nivelului meniscului realizate au fost cele cu sursă radioactivă dar, din cauza creșterii restricțiilor privind mediul de lucru, s-au dezvoltat celelalte sisteme.

În prezent cele mai performante sisteme realizează controlul nivelului în domeniul ± 2 mm, eforturile pentru încadrarea într-un domeniu mai strâns nu sunt întotdeauna justificate.[23]. Un alt avantaj al reglării automate a nivelului meniscului este acela că procedeul constituie premisa introducerii alimentării automate cu flux de lubrifiere și ca urmare, diminuarea influenței factorului uman, diminuarea influenței factorului uman în zona cristalizorului, precum și creșterea calității suprafeței și a stratului subcutanat.

O îmbunătățire adusă cristalizorului în scopul mărimii vitezei de turnare în condiții de siguranță o constituie sistemele de detectare a lipiturilor și perforărilor, care au la bază măsurarea temperaturii în peretele cristalizorului.

Rezistența la rupere a crustei este dependentă de compoziția oțelului, de temperatura suprafeței semifabricatului, de grosimea crustei etc.

2.4. Concluzii

În contextul unei concurențe acerbe pe piața oțelului, cunoașterea modalităților de influențare a factorilor tehnologici asupra calității semifabricatelor turnate continuu este de foarte mare importanță. Așadar, parametrii procesului de turnare continuă a oțelului reprezintă factorul definitoriu al conceptului, influențând întreaga tehnologie de lucru și având repercursiuni nemijlocite asupra calității semifabricatelor și asupra indicatorilor tehnico-economici.

Conform studiilor de cercetare efectuate pe plan mondial, a tuturor experimentărilor industriale precum și a opiniilor avizate de către specialiști, calitatea semifabricatelor turnate continuu din oțel este influențată în mod deosebit de doi parametri de turnare, și anume, temperatura oțelului lichid și răcirea secundară a barei de metal.

Prin urmare, 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 lichidus, deoarece, orice abatere de la această valoare, favorizează apariția defectelor de material..

O temperatură de turnare prea scăzută poate conduce la obturarea orificiilor de turnare ale distribuitorului, în special în cazul semifabricatelor turnate continuu cu secțiune mică, precum și la apariția defectelor de suprafață.

Dacă temperatura de turnare este prea ridicată, este necesară micșorarea sensibilă a vitezei de turnare și un proces de răcire secundară foarte intens, având drept consecințe apariția defectelor interne și de suprafață, datorate tensiunilor termice; de asemenea, o temperatură mai mare de turnare a oțelului mărește pericolul străpungerii crustei de oțel, sub cristalizor, rezistența la rupere a crustei fiind dependentă de compoziția chimică a oțelului și de temperatura suprafeței semifabricatului.

La ieșirea din cristalizor crusta trebuie să aibă o grosime suficient de mare încât să reziste la eforturile generate de presiunea ferostatică și de solicitările mecanice de tracțiune. Pe de altă parte, realizarea unei cruste foarte groasă

necesită un timp mare de turnare continuă, procedeu neeconomic din punct de vedere al productivității instalației.

Din cele prezentate anterior, se poate concluziona că, la turnarea continuă, o importanță deosebită prezintă problemele legate de formarea crustei de oțel solidificat, de rezistența acesteia la solicitările la care este supusă, condițiile de formare a zonei axiale, durata totală a solidificării.

De asemenea, se pun probleme legate de natura și mărimea forțelor de frecare între crusta semifabricatului turnat continuu și peretele cristalizorului, de deformările crustei de oțel și implicit, de defectele care pot apărea.

3. ANALIZA INFLUENȚEI PROCESULUI DE SOLIDIFICARE ASUPRA CALITĂȚII OȚELULUI

Proprietățile semifabricatelor turnate continuu, mai ales starea suprafeței, sunt puternic influențate de procesele fizico-chimice-metalurgice ce au loc la interfețele cristalizor-zgură-oțel lichid. O importanță deosebită, în acest sens, prezintă și cercetarea și cunoașterea condițiilor de solidificare în vederea determinării condițiilor de răcire a semifabricatelor turnate continuu, precum și a unora dintre parametrii tehnologici constructivi ai instalației (viteza de turnare, numărul de fire, înălțimea și raza de curbare a instalației etc.)

Pentru buna funcționare a instalației de turnare continuă precum și pentru obținerea unor semifabricate turnate continuu de calitate corespunzătoare, este necesar a se cunoaște modul de avansare a frontului de solidificare a oțelului lichid.

Cercetarea evoluției fazei solide la turnarea continuă prezintă importanță din cel puțin două puncte de vedere:

- determinarea grosimii stratului solidificat la ieșirea din cristalizor;
- determinarea lungimii firului unde se termină solidificarea sau adâncimea conului de solidificare.

Determinarea grosimii stratului solidificat la ieșirea din cristalizor este importantă deoarece, dacă grosimea este prea mică există riscul ruperii acesteia, iar depășirea unei anumite valori presupune sau vitează de turnare prea mică sau lungimi prea mari ale cristalizorului.

Datele existente în literatura de specialitate recomandă ca grosimea crustei la ieșirea din cristalizor să fie cuprinsă între 10-30 mm pentru a evita ruperea acesteia. Această grosime depinde de compoziția oțelului, de secțiunea și forma semifabricatului, de materialul și lungimea cristalizorului etc. Dacă semifabricatul are secțiune mare, grosimea stratului solidificat va trebui să fie mai mare, întrucât efortul de rupere este de asemenea mai mare. Aceasta presupune adoptarea unei viteze de turnare mai reduse și o lungime a cristalizorului mai mare.

Se observă că se intercondiționează cel puțin trei factori: mărimea secțiunii semifabricatului, viteza de turnare și lungimea cristalizorului. Cel puțin din aceste considerente este necesară studierea evoluției fazei solide în cristalizor. De aceasta depind construcția cristalizorului, productivitatea și apariția unor defecte.

Lungimea firului pe care are loc solidificarea după ieșirea din cristalizor prezintă importanță, întrucât determină dimensionarea sistemului de răcire secundară și influențează apariția unor defecte. Dacă viteza de răcire a semifabricatului, după ieșirea din cristalizor este prea mare și lungimea firului până la terminarea solidificării prea mică, are loc o tensionare puternică a stratului de suprafață, ceea ce poate conduce la apariția fisurilor. O răcire lentă a semifabricatului după ieșirea din cristalizor conduce la lungirea firului până la solidificare, fenomen ce va favoriza o segregare mai puternică a materialului și o supradimensionare a instalației.

Este important așadar, calculul geometriei stratului solidificat în zona cristalizorului de cupru (zona de răcire primară) în zona pulverizatoarelor (zona de răcire secundară) calcul ce poate fi efectuat rezolvând ecuația conducției de căldură în condiții de echilibru și ținând seama de condițiile la limită specifice.

În figura 3.1. se prezintă schematic variația temperaturii în zona de răcire primară pentru sistemul: oțel turnat-cristalizer-apă de răcire.

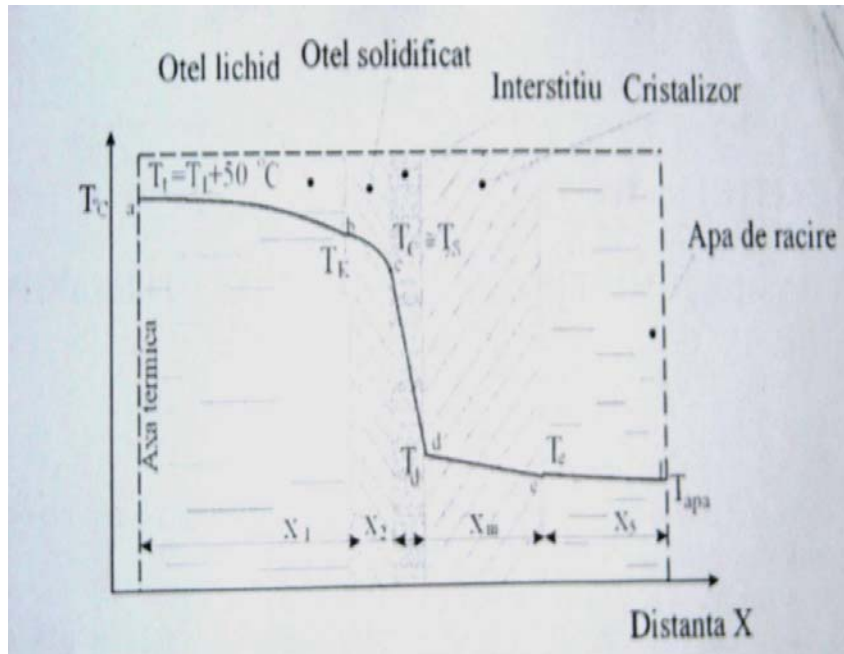


Figura 3.1. Reprezentarea schematică a variației temperaturii în zona cristalizorului la turnarea continuă

Conform acestei reprezentări, în zona de răcire primară pentru sistemul oțel-cristalizer-apă de răcire au loc următoarele căderi de temperatură:

- între axa termică și frontul de solidificare:

$$\Delta T_1 = T_a - T_k = (T_L + 50^\circ\text{C}) - T_k \quad (3.1.)$$

unde: T_k – temperatura de cristalizare;

- între frontul de solidificare și suprafața exterioară a crustei de oțel solidificat:

$$\Delta T_2 = T_k - T_c \cong T_k - T_s \quad (3.2.)$$

Căderea de temperatură pe grosimea crustei solidificate fiind foarte mică, se poate considera că T_c este aproximativ egală cu temperatura solidus.

- între suprafața exterioară a crustei solidificate și suprafața peretelui cristalizorului (grosimea interstițiului x_3);

$$\Delta T_3 = T_s - T_d \quad (3.3.)$$

aceasta fiind cea mai mare cădere de temperatură;

- între suprafața interioară și cea exterioară a cristalizorului:

$$\Delta T_4 = T_d - T_e \quad (3.4.)$$

$T_e \cong$ cu temperatura apei de răcire la ieșirea din circuitul de răcire.

- între suprafața exterioară a peretelui cristalizorului și apa de răcire:

$$\Delta T_5 = T_e - T_{apă}, \quad T_{apă} = 20-40^\circ\text{C} \quad (3.5.)$$

Căderea de temperatură în diverse secțiuni ale sistemului pe înălțimea cristalizorului este un proces dinamic, iar dacă în partea superioară a cristalizorului, la 10 mm sub menisc nu avem bază solidă ($x_1=x_L$), lichidul este în contact direct cu materialul din interstițiu.

Căderea de temperatură $\Delta T_2=0$, după formarea crustei solide x_1 scade x_2 crește progresiv, până la valorile atinse la părăsirea cristalizorului. Având în vedere că frontul de solidificare este constituit dintr-o zona bifazică, temperatura luată în calcul la acest front este așa numita temperatură de cristalizare T_k .

Grosimea crustei solidificate variază la zero la o valoare care este în general destul de mică față de grosimea totală a semifabricatului turnat, în consecință căderea de temperatură ΔT_2 este mică.[5]

Forma și înălțimea conului format de crusta solidificată pot fi determinate în baza următorului raționament prelucrat după:

- volumul aliajului din cristalizor se împarte în volume elementare, delimitate de mai multe secțiuni transversale pe direcția de înaintare a oțelului în cristalizor, de grosime dz ;

- volumul elementelor de oțel este $dv=a \cdot b \cdot dz$, în care a și b sunt dimensiunile cristalizorului în plan orizontal și dz -înălțimea elementului de volum pe direcția de înaintare a oțelului z . Înălțimea volumului elementar dz poate fi luată oricât de mică, astfel, dacă $dz \rightarrow 0$, fiecare elemente de volum se transformă într-o secțiune aparte;

- oțelul se deplasează în cristalizor cu o viteză constantă, în consecință și volumele elementare se vor deplasa pe direcția z cu viteză constantă ($w=\text{constant}$);

- se neglijează transmiterea de căldură pe direcția z de la un element de volum la altul întrucât viteza de turnare este mare (peste 3 m/s) și deci transmiterea prin conducție pe direcția lui z este foarte mică, ea putând fi neglijată;

- se ia considerare numai transmiterea căldurii de la elementele de volum (oțel-perete cristalizor-apă de răcire) pe direcție perpendiculară pe axa z ;

- transmiterea căldurii de la oțel la apa de răcire se admite că are loc prin conductivitatea termică;

- se admite că, modificările de temperatură ce au loc în axa termică a sistemului nu influențează coeficienții termici ai aliajului și a cristalizorului, întrucât aceasta se modifică nesemnificativ pe înălțimea cristalizorului;

- coeficienții schimbului de căldură sunt considerați constanți în intervalul de timp cât oțelul să găsește în cristalizor;

- se consideră că între crusta solidificată și peretele cristalizorului se menține contactul prin intermediul interstițiului de lubrifiere, care nu-și schimbă consistența și grosimea;

- se consideră că solidificarea oțelului are loc la temperatură constantă T_k ;

- căldura latentă de cristalizare la solidificarea volumului elementar fiind foarte mică se neglijează;

- transmiterea căldurii de la volumul elementar de oțel se face prin conductivitate termică da la oțel la pereții cristalizorului și translație datorită deplasării volumului elementar în direcția z ;

- căldura transmisă prin conductivitate termică de la volumul elementar de oțel (element de volum aflat imediat sub cota $z=0$) poate fi calculată plecând de la legea lui Fourier:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right); \quad (3.6.)$$

Fluxul de căldură ce trece de la elementul de volum prin suprafața dF la cristalizor în timpul dt este:

$$\frac{dQ}{dt} = K \cdot \Delta T \cdot dF \quad (3.7.)$$

în care: K – coeficientul schimbului de căldură între elementul de volum al semifabricatului și apa de răcire din cristalizor:

$$k = \frac{1}{\frac{x_1}{\lambda_{ab}} + \frac{x_2}{\lambda_{bc}} + \frac{x_3}{\lambda_3} + \frac{x_m}{\lambda_m} + \frac{1}{\alpha_3}}, [W / m^2 \cdot K] \quad (3.8.)$$

în care:

$\frac{x_1}{\lambda_{ab}}$ - rezistența termică a oțelului lichid de grosime x_1 , care are

conductivitatea termică λ_{ab} , în $m^2 \cdot K / W$, λ_{ab} în $W / m \cdot K$;

$\frac{x_2}{\lambda_{bc}}$ - rezistența termică a crustei solidificate de oțel, având grosimea x_2 și

conductivitatea termică λ_{bc} ;

$\frac{x_3}{\lambda_3}$ - rezistența termică a interstițiului lubrifiant, având grosimea x_3 și

conductivitatea termică λ_3 (a materialului din interstițiu);

$\frac{x_m}{\lambda_m}$ - rezistența termică a peretelui cristalizorului, având grosimea x_m și

conductivitatea termică λ_m ;

α_3 – coeficientul de schimb de căldură între peretele cristalizorului și apa de răcire, care se determină cu relația:

$$\alpha_3 = \frac{Av^{0,8}}{d^{0,3}} [W / m^2 \cdot K] \quad (3.9.)$$

în care:

A – constanta funcție de temperatura medie a apei de răcire;

v – viteza de mișcare a apei în canalul sistemului de răcire din cristalizor, în m/s;

d – diametrul canalului prin care curge apa de răcire, în m;

$$d = \frac{4F}{S} [m] \quad (3.10.)$$

F este suprafața de contact (aria secțiunii transversale a canalului) în m^2 ;

S – perimetrul udat al canalului, în m.

Cantitatea de căldură cedată de către elementul de volum considerat, prin suprafața laterală dF, în timpul dt este [6]:

$$dQ_c = K \cdot \Delta T \cdot dF \cdot dt = K(T_1 - T_2) dF \cdot dt [J] \quad (3.11.)$$

în care: T_1 – temperatura oțelului din volumul elementar;

T_2 – temperatura peretelui cristalizorului.

Cantitatea de căldură transmisă prin conductibilitate termică de la elementul de volum considerat la elementele de volum învecinate este:

$$dQ_z = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta z} \cdot A \cdot dt \quad [J] \text{ sau } [W \cdot s] \quad (3.12.)$$

în care: λ - conductivitatea termică a oțelului, în W / m·K;

$\frac{\Delta T}{\Delta z}$ - gradientul de temperatură în lungul semifabricatului (în direcția z), în

K/m;

A - aria secțiunii transversale a semifabricatului, în m²;

dt - o perioadă de timp aleasă convențional pentru studiul procesului, în s;

Cantitatea de căldură transmisă prin translație în intervalul de timp dt, poate fi calculată cu relația:

$$dQ_{tr} = m \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad [J] \quad (3.13.)$$

în care: m - masa de aliaj trecut în intervalul dt;

$$m = \rho \cdot A \cdot dz = \rho \cdot A \cdot w \cdot dt, \quad [kg] \quad (3.14.)$$

ρ - densitatea oțelului, în kg/m³;

w - viteza de înaintare a semifabricatului, m/s.

Dând valori reale termenilor din ultimele două relații din literatura de specialitate rezultă:

$$dQ_{tr} \gg dQ_z \quad (3.15.)$$

Inegalitatea ne permite să acceptăm că, transmiterea căldurii prin conductivitate termică pe direcția z poate fi neglijată, fără să se comită practic o eroare sensibilă.

În momentul în care oțelul din elementul de volum în contact cu interstițiul lubrifianț atinge temperatura T_k începe solidificarea (formarea crustei solide).[24]

Elementul de volum respectiv, se deplasează în timpul dt cu distanța dz. El pierde o cantitate de căldură cedată prin conductivitate spre cristalizor dQ_{tr} , fapt ce determină creșterea grosimii stratului solidificat x_2 .

Cantitate de căldură poate fi exprimată și astfel:

$$dQ_c = -m \cdot c_p \cdot d\Delta T = -dV \cdot \rho \cdot c_p \cdot d(T_1 - T_2) \quad (3.16.)$$

Egalând expresiile (1.7) și (1.12) obținem:

$$K(T_1 - T_2) \cdot dF \cdot dt = dV \cdot \rho \cdot c_p \cdot d(T_1 - T_2) \quad (3.17.)$$

Regrupând termenii avem:

$$dt = \frac{dV}{dF} \cdot \frac{\rho \cdot c_p}{K} \cdot \frac{d(T_1 - T_2)}{T_1 - T_2} \quad (3.18.)$$

$\frac{dV}{dF} = R_{ech}$ - raportul dintre volum și suprafață este raza echivalentă sau

dimensiunea redusă a piesei.

Exemplu: pentru semifabricat cilindric:

$$R_{ech} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot dz}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot dz} = \frac{R}{2} \quad (3.19.)$$

R - raza semifabricatului.

Aplicând condițiile la limită ($t=0$ și $T=T_t$) integrăm relația (3.18) și înlocuind timpul cu z/w din legea spațiului se obține înălțimea zonei dintre menisc și secțiunea în care începe solidificarea:

$$z_1 = \frac{T_t - T_1}{T_t - T_2} \cdot \frac{R_{ech} \cdot \rho \cdot c_p \cdot w}{K} \quad (3.20.)$$

Înlocuind temperatura oțelului T_1 cu T_K se poate considera că $T_1 - T_K$ este temperatura de supraîncălzire a oțelului turnat continuu și ecuația (3.20.) devine:

$$z_1 = \frac{\Delta T_{\text{supraînc}}}{T_t - T_2} \cdot \frac{R_{ech} \cdot \rho \cdot c_p \cdot W}{K} \quad (3.21.)$$

Având înălțimea cristalizorului din care scădem înălțimea z_1 și ținând cont de înălțimea de la menisc până la partea superioară a cristalizorului, rezultă lungimea crustei solidificată în cristalizor. Determinarea ei este de importanță mai mică, în această zonă prezentând însemnătate calculul grosimea crustei solidificate la ieșirea din cristalizor. Pe baza unui raționament asemănător, se poate determina înălțimea care corespunde solidificării complete a semifabricatului, cu observația că în această zonă dispăre rezistența termică a interstițiului lubrifiant și a peretelui cristalizorului, iar schimbul de căldură este mai intens, semifabricatul intrând în contact direct cu apa de răcire.[26]

Pentru intensități foarte mari ale schimbului de căldură, cum este cazul la răcirea cu jet de apă direct pe semifabricat W . Roth oferă următoarea relație:

$$z_2 = \frac{R \cdot \rho \cdot W \cdot \left[L + \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot (T_K - T_{1s}) \right]}{K \cdot \lambda_1 \cdot (T_K - T_{1s})} \quad (3.22.)$$

în care :

R – raza semifabricatului cilindric; \hat{a}

L – căldura specifică masică de cristalizare;

T_{1s} – temperatura suprafeței semifabricatului în zona de răcire cu apă.

După W . Roth conductivitatea termică are valorile $K=9$ pentru semifabricate cilindrice și $K=2$ pentru semifabricate plane; iar V.I. Dobatkin dă $K=4$ pentru semifabricate cilindrice. Aceste valori destul de diferite sunt cauzate de mai mulți factori, între care: mărirea secțiunii semifabricatului, viteza de turnare, compoziția chimică a oțelului.

Temperatura T_{1s} este dificil de apreciat și de măsurat, de aceea în cazul dat se consideră aproximativ egală cu temperatura medie a apei de răcire proiectată pe suprafața semifabricatului. Adâncimea conului de solidificare se obține prin însumarea lungimii crustei din cristalizor cu z_2 .

$$z = z_{crt} + z_2 \quad (3.23.)$$

Această metodă de calcul a adâncimii conului de solidificare nu ia în considerare căldura latentă de solidificare din zona cristalizorului, deci introduce o anumită eroare. Având însă în vedere, cantitatea de fază solidificată în cristalizor, care este destul de redusă față de cantitatea totală de fază solidificată, neglijarea căldurii latente de solidificare în cristalizor nu introduce erori prea mari referitor la calculul înălțimii conului de solidificare.

O metodă simplificată de calcul a grosimii pojghiței solidificate este dată ținând seama de următoarele condiții:

- metalul topit este omogen din punct de vedere termic ca atare în acesta nu apar gradienti termici;

- transferul de căldură prin conductibilitatea termică în materialul solidificat este neglijabil în direcția mișcării adică, conductibilitatea termică s-ar produce numai direcția normală la suprafața formei, adică pe direcția x ;

- coeficientul de transfer termic dintre suprafața exterioară a stratului solidificat și cristalizor este constant cu distanța z în direcția mișcării.[25]

Pe baza acestor ipoteze transferul de căldură prin conductibilitate termică în stratul de metal solidificat se exprimă prin ecuația:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = \frac{\partial T_s}{\partial z} \cdot w \quad \text{pentru } 0 \leq x \leq x(z) \quad (3.24.)$$

în care: w – viteza de turnare;

$x(z)$ – grosimea stratului solidificat care este funcție de z de la meniscul metalului în formă.

Condițiile la limită corespunzătoare sunt:

$$T_s = T_{top} \quad \text{la } x = x(z) \quad (3.25.)$$

Din bilanțul termic la interfața solid-lichid obținem:

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = \rho \cdot \Delta H_T \cdot \frac{dx(z)}{dz}; a \quad x = x(z) \quad (3.26.)$$

în care ΔH_T este suma dintre căldura latentă de solidificare și căldură de supraîncălzire, adică:

$$\Delta H_T = \Delta H + c_p(T_{top} - T_{li}) \quad (3.27.)$$

în care: ΔH – suma dintre căldura latentă de solidificare;

T_{li} – temperatura inițială a metalului lichid;

c_p – căldura specifică la presiunea constantă a metalului lichid.

De asemenea, din bilanțul termic la limita cristalizor-metal, când $x=0$, rezultă:

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = h_f(T_s - T_f) \quad \text{la } x=0 \quad (3.28.)$$

în care: h_s este coeficientul efectiv de transfer termic între suprafața stratului solidificat și formă;

T_f – temperatura suprafeței cristalizorului.

Soluțiile acestor ecuații au fost obținute de Hills, funcție de următoarele variabile:

- distanța adimensională în direcția de mișcare z :

$$\xi = \frac{z \cdot h^2}{w \cdot \rho \cdot c_p \cdot \lambda} \quad (3.29.)$$

- grosimea adimensională a stratului solidificat:

$$\bar{x} = \frac{h \cdot x(z)}{\lambda} \quad (3.30.)$$

- căldura latentă plus supraîncălzirea adimensională:

$$\overline{\Delta H_T} = \frac{\Delta H_T}{c_p \cdot T_{top}} \quad (3.31.)$$

3.1. Concluzii

Solidificarea oțelului începe în cristalizor, la primul contact dintre faza lichidă și pereții răciți cu apă și se consideră terminată, doar înaintea rolor de tragere. Semifabricatul ieșit din cristalizor, în curs de solidificare, este deci format dintr-o crustă solidă, având grosimea crescândă, și dintr-un miez lichid, în formă de „V”.

Parametrul de bază al solidificării unui metal este viteza de formare a crustei solide, denumită și viteză de solidificare, care exprimă legătura dintre grosimea crustei și timp. În practica industrială se urmărește realizarea unei grosimi optime a

crustei, valoare pentru care să se asigure, atât buna funcționare a instalației de turnare continuă cât și o suprafață corespunzătoare a semifabricatului.

Pornind de la recomandările existente în literatura de specialitate, referitoare la grosimea crustei la ieșirea din cristalizor(trebuie să fie cuprinsă între 10-30 mm), în acest capitol s-a abordat o variantă de calcul a grosimii stratului solidificat atât în zona cristalizorului (zona de răcire primară) cât și în zona pulverizatoarelor (zona de răcire secundară) prin rezolvarea ecuației conducției de căldură în condiții de echilibru și ținând seama de condițiile limită specifice.

Determinarea grosimii stratului solidificat la ieșirea din cristalizor este importantă deoarece, dacă grosimea este prea mică există riscul ruperii acesteia, iar depășirea unei anumite valori presupune sau o viteză de turnare prea mică sau lungimi prea mari ale cristalizorului. Din aceste considerente este necesară studierea evoluției fazei solide în cristalizor, de aceasta depinzând construcția cristalizorului, productivitatea instalației de turnare continua precum si calitatea produselor(apariția unor defecte).

Rezistența mecanică a crustei solidificate trebuie să fie suficient de mare astfel încât să nu permită perforarea sau ruperea firului sub acțiunea diferitelor forțe care acționează asupra ei. În scopul reducerii acțiunii acestor forțe, în practica industrială, se adoptă o serie de măsuri tehnologice, care, pe lângă asigurarea unei bune corelări între parametrii de răcire, primară și secundară, cu viteza, temperatura și timpul de turnare recomandă și utilizarea diferitelor prafuri unguente în cristalizor cu scopul de a reduce frecarea dintre crustă și cristalizor.

Lungimea firului pe care are loc solidificarea după ieșirea din cristalizor prezintă importanță, întrucât determină dimensionarea sistemului de răcire secundară și influențează apariția unor defecte. Dacă viteza de răcire după ieșirea din cristalizor este prea mare, lungimea firului până la terminarea solidificării va fi mică, determinând o reîncălzire puternică a stratului de suprafață, ceea ce poate duce la apariția unor fisuri.

O răcire lentă duce la lungirea firului până la solidificare, ceea ce favorizează o segregatie mai puternică și supradimensionarea instalației în zona rolor.

Din cele prezentate anterior, se poate concluziona că, la turnarea continuă, o importanță deosebită prezintă problemele legate de formarea crustei de oțel solidificat, de rezistența acesteia la solicitările la care este supusă, condițiile de formare a zonei axiale, durata totală a solidificării.

4. ANALIZA PRIVIND INFLUENȚA PRAFURILOR DE TURNARE ASUPRA PROCESULUI DE TURNARE CONTINUĂ

4.1. Introducere

Soluția modernă de turnare a oțelului este aceea a turnării continue, motiv pentru care această procedură ocupă o arie de răspândire din ce în ce mai largă, asigurând utilizatorilor produse superioare din punct de vedere calitativ .

Conform studiilor de cercetare efectuate, a experimentelor industriale, precum și a opiniilor avizate ale specialiștilor, proprietățile semifabricatelor turnate continuu din oțel, mai ales starea suprafeței, sunt puternic influențate de procesele ce au loc în cristalizor, de modul și direcția în care are loc transferul de căldură.

Pe lângă transferul de căldură în peretele cristalizorului, pentru formarea zgurii de turnare, la fel de importante sunt fluxurile de masă și căldură în direcția axei cristalizorului; zgura de turnare rezultată din topirea prafurilor de turnare ajută la ungerea firului și contribuie la uniformizarea transferului de căldură dinspre semifabricat spre cristalizor.

Așadar, calitatea suprafeței semifabricatelor turnate continuu este influențată, pe lângă o serie de factori tehnologici și compoziția chimică a oțelului și de caracteristicile prafurilor de turnare.

Prafurile de turnare utilizate la turnarea continuă a oțelurilor, au un rol complex, ele trebuind să asigure:

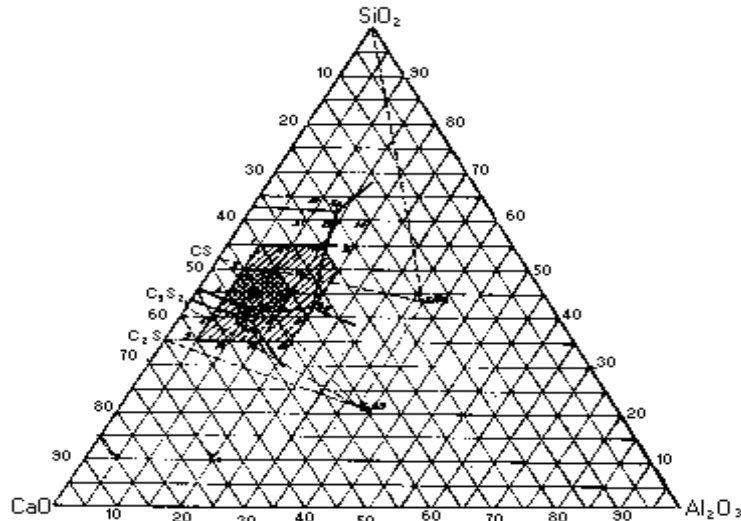
- prevenirea oxidării oțelului la turnarea continuă;
- captarea și reținerea incluziunilor nemetalice din oțelul lichid în distribuitor;
- asigurarea transferului termic;
- lubrifierea între crusta de oțel solidificată și peretele cristalizorului.

Pentru a răspunde acestor cerințe, prafurile de turnare trebuie analizate, având în vedere următoarele caracteristici: fuzibilitatea, fluiditatea vâscozitatea, tensiunea superficială și interfazică, 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 zgurei de praf de turnare.[18]

Deși comportarea reală a prafului de turnare reprezintă rezultanta acțiunii tuturor acestor caracteristici, este necesar ca ele să fie studiate fiecare în parte și abia apoi interferențele dintre ele.

4.2. Compoziția chimică și mineralogică

Din punct de vedere al compoziției chimice prafurile sau mai exact zgurele de praf de turnare continuă, fac parte din domeniul zgurelor metalurgice reducătoare, adică din sistemul $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$. În acest sistem s-a stabilit că domeniul hașurat prezentat în figura 4.1. este cel optim din punct de vedere al variației compoziției chimice pentru prafurile de turnare continuă.

Figura 4.1. Sistemul $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$

În afara celor trei oxizi de bază, prafurile de turnare continuă mai conțin MgO , Na_2O , CaF_2 , C , MnO , Fe_2O_3 , B_2O_3 , etc. Prezența acestor componenți modifică caracteristicile rezultate din sistemul $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$, ei influențând fiecare în alt mod celelalte proprietăți ale zgurei rezultate din topirea prafului.[45]

Compoziția mineralogică a zgurei precum și caracteristicile acesteia se modifică în funcție de adaosul de oxizi și de temperatură.

4.3. Fuzibilitatea

Fuzibilitatea este proprietatea care permite unui praf de turnare să se topească la o anumită temperatură să se formeze un strat lichid de zgură, asigurându-i acestuia o anumită fluiditate.

Nu este suficient determinarea unei temperaturi optime de topire, ci trebuie stabilit și un interval optim de topire – solidificare. Acest interval se stabilește în funcție de mărirea suprafeței băii de oțel din cristalizor, fiind deci funcție de viteza de turnare a oțelului.

Literatura de specialitate recomandă ca temperaturi optime de topire a prafulor pentru turnarea continuă a oțelului, pe cele cuprinse în intervalul 1100 și 1300°C.

În sistemul $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{CaO}$, se găsesc patru eutectice (figura 4.2), cu temperaturile de topire, precum și compoziția chimică date în tabelul 4.1.

Se observă însă din poziția punctelor din sistem că E1 nu poate fi luat în considerare, fiind situat în afara domeniului optim; E2 se află de asemenea la limita domeniului optim, conținutul de Al_2O_3 fiind ridicat, al treilea eutectic se află puțin peste limita superioară a domeniului de temperatură, iar E4 nu corespunde nici din punct de vedere al temperaturii și nici al compoziției chimice.[31]

Din motivele prezentate, rezultă că este necesară utilizarea în practică a diversilor fondanți, pentru încadrarea caracteristicilor în domeniul optim de compoziție chimică.[29]

Tabelul 4.1. Compoziția chimică și temperatura de topire a eutecticelor

Punctul în sistem	Compoziția procentuală	Temperatura de topire
E 1	62% SiO ₂ , 23,25% CaO, 14,75% Al ₂ O ₃	1165°C
E 2	42% SiO ₂ , 38% CaO, 20% Al ₂ O ₃	1265°C
E 3	41,2% SiO ₂ , 47,8% CaO, 11% Al ₂ O ₃	1310°C
E 4	32% SiO ₂ , 29,5% CaO, 38,5% Al ₂ O ₃	1500°C

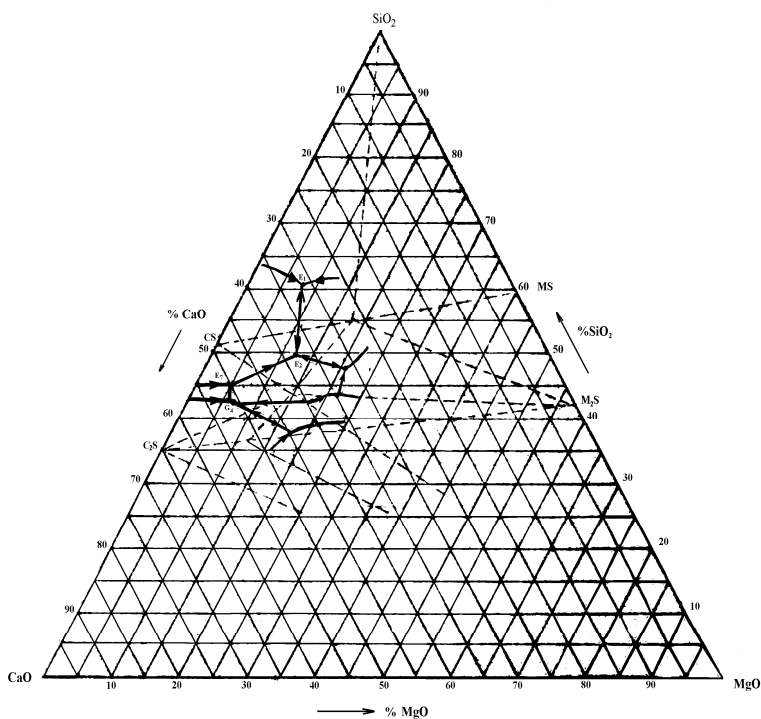


Figura 4.2. Diagrama de echilibru termic CaO - SiO₂ - Al₂O₃.

Oxidul de magneziu. Deși în sistemul SiO₂ - CaO - MgO eutecticele se topesc la temperaturi de peste 1300 °C, cele mai scăzute fiind E1 - 1320 °C; E2 - 1350 °C; E7 - 1350 °C și peritecticul G 4 -1379 °C (figura 4.3), introducerea MgO în sistemul SiO₂ - CaO - Al₂O₃ duce la realizarea unor compuși cu temperaturi mai scăzute de topire. Din sistemul cuaternar SiO₂ - Al₂O₃ - CaO - MgO se prezintă domeniul Al₂O₃ cu 5 până la 15%, corespunzător domeniului hașurat în sistemul SiO₂ - Al₂O₃ - CaO. Astfel la un conținut de 5% Al₂O₃ se observă că se formează compușii CaOSiO₂, 3CaOSiO₂, melilite (serie izomorfă continuă între 2CaO2SiO₂MgO - akermanit și 2CaOAl₂O₃SiO₂ - gehlenit (figura 4.4).

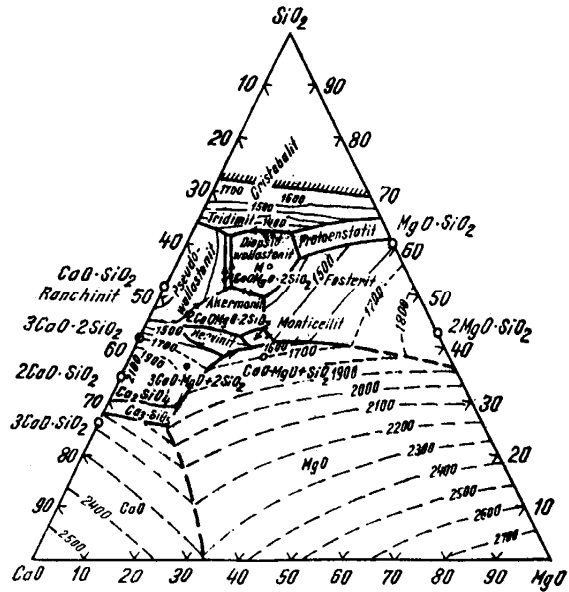


Figura 4.3. Sistemul SiO₂ - CaO - MgO. a - eutectice; b - izoterme

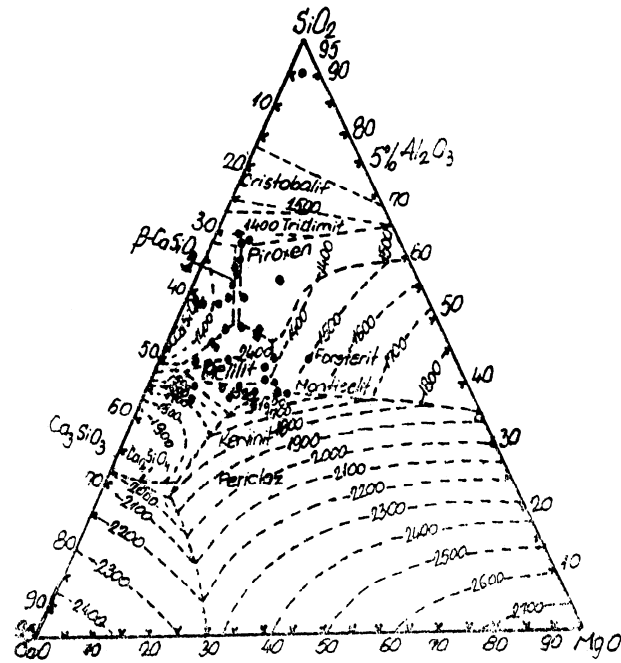


Figura 4.4. Diagrama de echilibru a sistemului SiO₂ - CaO - MgO, pentru 5% Al₂O₃

Acești compuși au însă temperaturi de topire ridicate, cea mai mică fiind 1380°C. [46]

La un conținut de 10% Al_2O_3 , crește cantitatea de melilite și apar piroxenii (soluții solide în sistemul $MgOSiO_2 - CaOMgOSiO_2$ - figura 4.5).

La un conținut de 15% Al_2O_3 apare anortitul - $CaOAl_2O_32SiO_2$, care va coexista alături de piroxen și melilite (figura 4.6).

De menționat că se formează o serie de eutectice ternare cu puncte de topire scăzute între 1222 - 1260°C.[31]

Din toate acestea rezultă că efectul fondant al MgO nu este spectacular și se manifestă când MgO se află în proporție de 4 - 8%, peste această valoare ridicând refractaritatea aluminatului de calciu.

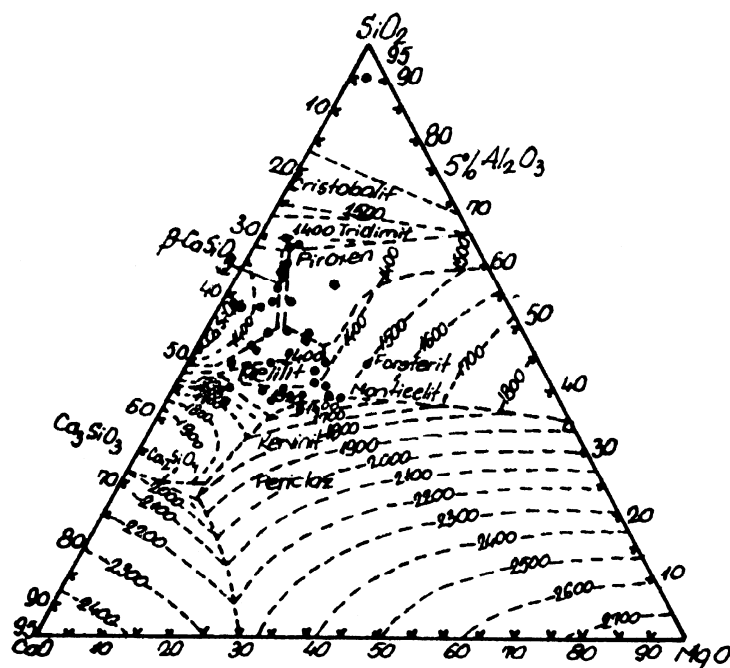


Figura 4.5. Diagrama de echilibru a sistemului $SiO_2 - CaO - MgO$, pentru 10% Al_2O_3

Oxidul de sodiu. Sistemul $SiO_2 - CaO - Na_2O$ prezintă eutectice și peritectice cu temperaturi de topire foarte scăzute și anume: E4 - 725 °C; G3 - 740 °C; G5 - 1035 °C; G6 - 1030 °C, după cum reiese și din figura 4.7.

Introducerea fondantului Na_2O în sistemul cuaternar $SiO_2 - Al_2O_3 - CaO - MgO$ determină deplasarea eutecticelor spre temperaturi mai scăzute, cuprinse în intervalul 1045 - 1270°C .

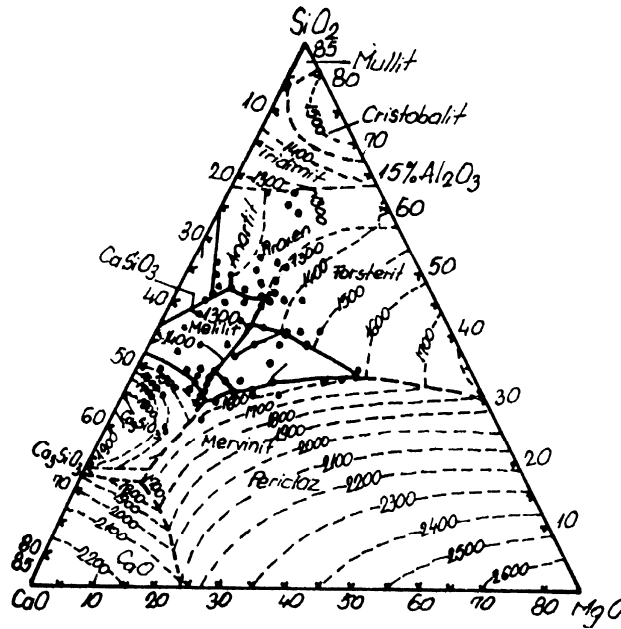


Figura 4.6. Diagrama de echilibru a sistemului SiO₂ - CaO - MgO, pentru 15% Al₂O₃

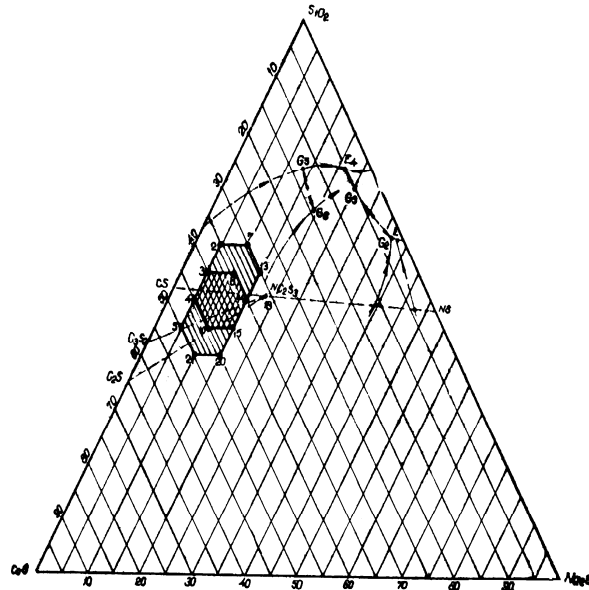


Figura 4.7. Diagrama de echilibru a sistemului SiO₂ - CaO - Na₂O

Fluorul. Introducerea fluorului se realizează prin utilizarea fluorurii de calciu, CaF₂ sau a criolitului Na₃AlF₆.

Eutecticul $Al_2O_3 - CaF_2$ se topește la $1270^\circ C$, iar eutecticul $Al_2O_3 - Na_3AlF_6$, la $940^\circ C$.

Acțiunea mai energic fondantă a criolitului se datorează prezenței ionului de Na^+ , care își manifestă și el capacitatea fondantă. Asupra silicaților de calciu, fluorura de calciu are influențe diferite. Astfel, metasilicatul de calciu, CaF_2 îi scade temperatura de topire cu peste $400^\circ C$, în timp ce ortosilicatul, cu aproape $900^\circ C$, ceea ce justifică foarte bine efectul de fluidizare a zgurii ca urmare a adaosului acestui component.[71]

Trioxidul de bor. Efectul fondant al acestui oxid se datorează faptului că el substituie SiO_2 în combinațiile silicaților, structurile lor spațiale fiind similare.

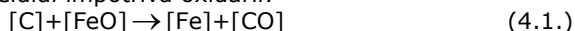
Caracterul fondant provine din mai slaba legătură a borului față de oxigen decât a siliciului, aceasta datorându-se diferenței dintre razele lor ionice: pentru $B^{3+} = 0,20 \text{ \AA}$, iar pentru $Si^{4+} = 0,39 \text{ \AA}$. Substituirea SiO_2 cu B_2O_3 în sistemul $SiO_2 - Na_2O$ are ca efect coborârea temperaturii de topire a eutecticelor cu aproximativ $200^\circ C$, iar în sistemul $SiO_2 - CaO$ cu aproximativ $500^\circ C$.

Oxizii de mangan și fier prezintă efecte fondante de același ordin de mărime, ambii formând cu SiO_2 eutectice cu temperaturi de topire sub $1200^\circ C$.

Ei se deosebesc prin aceea că MnO se reduce mai greu decât FeO și mărește substanțial efectul fondant al oxizilor alcalini și alcalino-pământoși.

Carbonul. Prezența lui este deosebit de favorabilă datorită structurii spațiale pe care o creează, asigurând o acoperire mai bună a suprafeței oțelului și menținerea materialului în strat afânat, în vederea realizării stratului izolator termic.[29]

Totodată prezența carbonului duce la realizarea unei atmosfere reducătoare necesare în vederea protejării oțelului împotriva oxidării:



4.4. Vâscozitatea

Conform definiției, vâscozitatea reprezintă forța care acționează pe unitatea de suprafață, astfel încât să mențină un gradient de viteză $\frac{dv}{dt}$ între două straturi din interiorul zgurei, iar după Arhenius, vâscozitatea este funcție și de temperatură, și anume: $\log \eta = \frac{E}{KT} + B$, unde $K = 1$, în cazul în care grupele structurale tetraedrice sunt libere. Cu alte cuvinte, în topiturile de silicat vâscozitatea va scădea cu cât anionii (grupele structurale), sunt mai puțin complecși, deci cu cât sunt mai mobili.

Din această cauză, o zgură puternic acidă cu o structură (SiO_4^{4-}) nu poate fi utilizată la turnarea continuă a oțelului. Mai mulți autori consideră că pentru turnarea continuă a oțelului, cea mai indicată este zgura cu raportul $\frac{CaO}{SiO_2} = 0,7 - 1,1$, caz în care vâscozitatea se poate determina cu relația:

$$\eta = A \cdot T \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad [N \cdot s / m^2] \quad (4.2.)$$

unde: $\ln A = -19,81 + 35,75N_{Al_2O_3} + 1,73N_{CaO} + 5,82N_{CaF_2} + 7,02N_{Na_2O}$, în $N \cdot s / m^2 \cdot K$;

$B = 31140 + 68833N_{Al_2O_3} - 23896N_{CaO} - 46351N_{CaF_2} - 39519N_{Na_2O}$, în K .

Acestă zgură va prezenta o structură de wollastonit CaSiO_2 , în care lanțurile dintre cationii de siliciu și anionii de oxigen sunt întrerupte de cationii de calciu micșorându-se astfel întinderea lanțurilor silicaticice.[12]

În diagrama prezentată după relația lui Arhenius (figura 4.8.) nu se ține seama de formarea elementelor structurale și de dilatările ce apar la formarea fazei lichide.

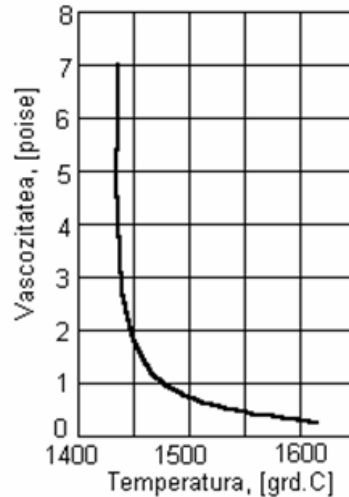


Figura 4.8. Diagrama vâscozității după relația lui Arhenius

Practic, nu s-a putut stabili o relație directă între vâscozitate și temperatură.

Sunt cunoscute amestecuri cu temperaturi ridicate de topire și vâscozitate mai scăzută decât alte amestecuri cu temperaturi de topire mai scăzute. Astfel în sistemul $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ amestecurile din zona E_{13} , mai bazice, au o vâscozitate mai scăzută decât cele din zona E_{11} , mai acide, cu toate că acestea din urmă au temperaturile de topire mai mici cu circa 100°C . [72]

Dar, ca regulă generală, creșterea temperaturii conduce la o scădere a vâscozității (ex. izocomele din sistemul $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ la 1400 , 1500 și 1600°C prezentate în figura 4.9. a, b, c, prezintă linii aproximativ paralele, cele mai mici valori situându-se la 1600°C . Oxizii utilizați influențează în mod diferit vâscozitatea unei zguri silico-calcice [29].

Oxidul de aluminiu. Din datele prezentate în literatura de specialitate rezultă că la introducerea Al_2O_3 în zguri se produce o creștere a vâscozității (figura 4.10, a,b,c,d), Al_2O_3 fiind un "formator de rețea". Pentru stabilirea unei corelații mai precise între temperatură și conținutul de Al_2O_3 din zguri, am prelucrat o serie de date din literatură în programele de calcul EXCEL și MATLAB, o serie de date din literatura de specialitate precum și proprii obținute în cadrul unor experimentări industriale (Oțelăria Electrică 2 - ARCELOR MITTAL STEEL Hunedoara) ceea ce mi-a permis stabilirea unor dependențe reprezentate atât grafic cât și analitic în figura 4.10, a,b,c.

Corelația multiplă permite alegerea valorilor optime pentru temperatură și Al_2O_3 care să determine obținerea unei vâscozități într-un anumit domeniu (figura 4.10,d). În plan orizontal sunt prezentate subdomeniile de variație a vâscozității.

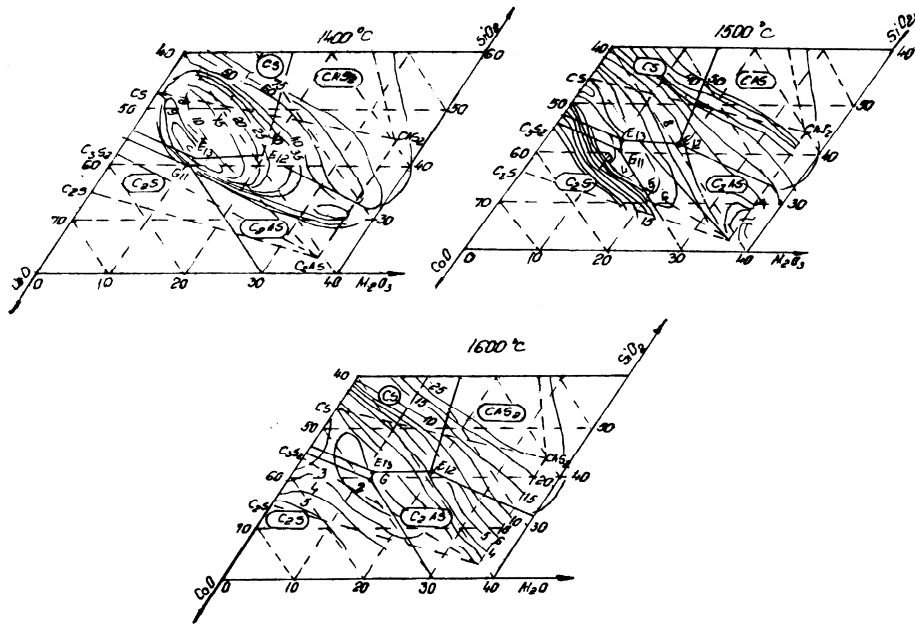


Figura 4.9. Reprezentarea izocomelor sistemului $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ la temperaturile de a. 1400, b. 1500 și c. 1600°C

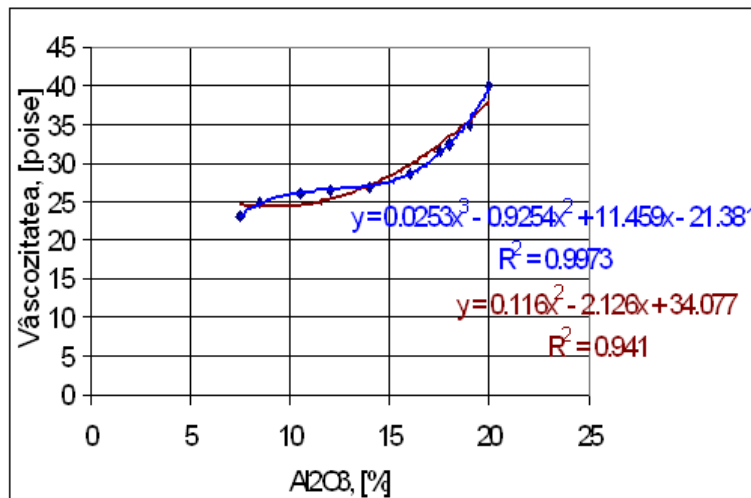


Figura 4.10 a. Vâscozitatea zgurei de turnare continuă în funcție de conținutul de Al_2O_3 la temperatura de 1300 °C

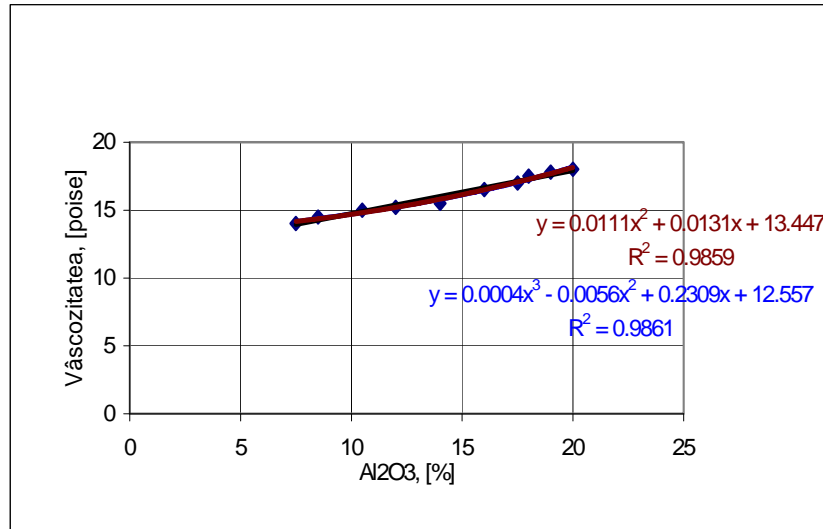


Figura 4.10 b. Vâscozitatea zgurei de turnare continuă în funcție de conținutul de Al₂O₃ la temperatura de 1350 °C

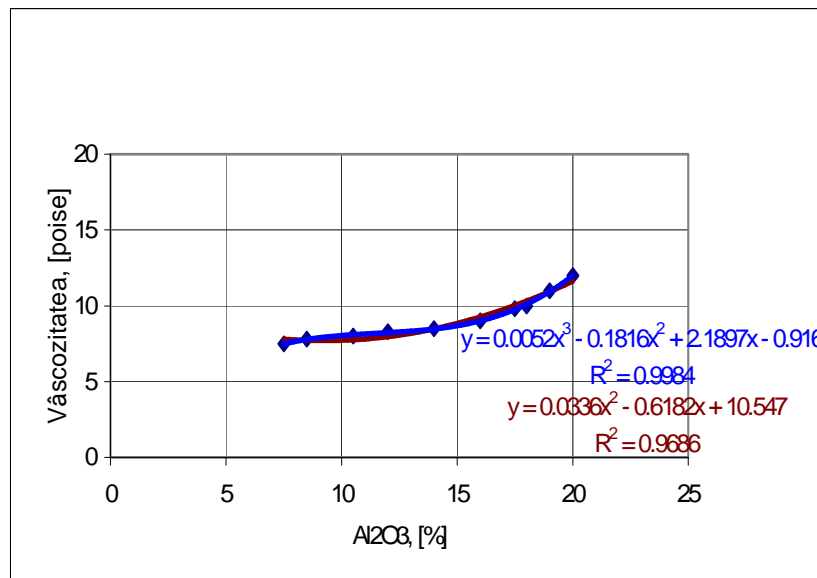


Figura 4.10 c. Vâscozitatea zgurei de turnare continuă în funcție de conținutul de Al₂O₃ la temperatura de 1400 °C

Din datele practice s-a constatat că vâscozitatea este influențată nu numai de cantitatea totală de Al₂O₃ introdusă ci și de raportul lui cu ceilalți oxizi, cel mai reprezentativ fiind raportul $\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$. Aceste dependențe sunt obținute prin

prelucrarea datelor în programele de calcul EXCEL și MATLAB. Astfel, în figura 4.11. sunt prezentate influențele raportului $\frac{Al_2O_3}{SiO_2}$ asupra vâscozității, la un conținut de 0%MgO.[73]

Pentru obținerea unei dependențe exprimată și sub formă analitică între vâscozitate și %CaO din zgură, pentru 0%MgO și diferite valori ale raportului Al_2O_3/SiO_2 , prezentăm rezultatele obținute în figura 4.12, a, b, c, d, e.

De asemenea, în figura 4.13, 4.14 și 4.15 am prezentat aceeași variație, dar la conținuturi diferite de MgO, după cum urmează: figura 4.13 pentru 5%MgO, figura 4.14 pentru 10%MgO și figura 4.15 pentru 15%MgO. Se poate observa astfel că odată cu creșterea procentului de MgO în componența zgurei, are loc o scădere a valorilor pentru vâscozitate, cu încadrare în limite din ce în ce mai restrânse. [31]

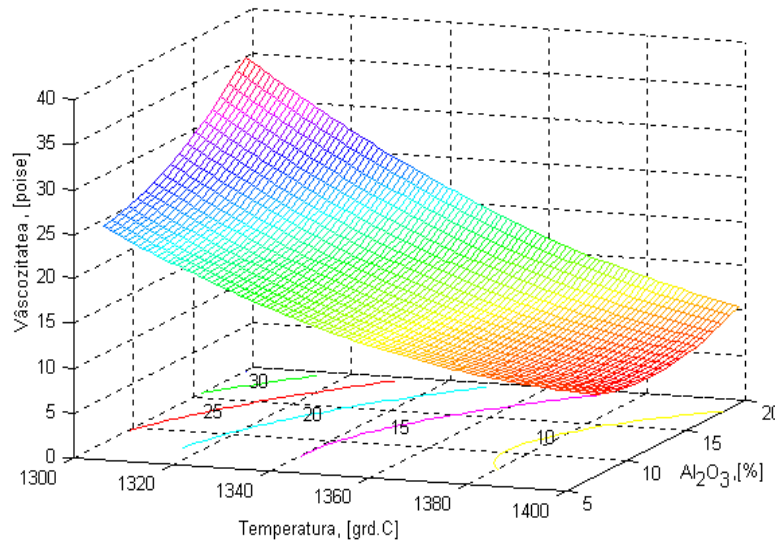


Figura 4.10 d. Vâscozitatea zgurei de turnare continuă în funcție de temperatura și de conținutul de Al_2O_3

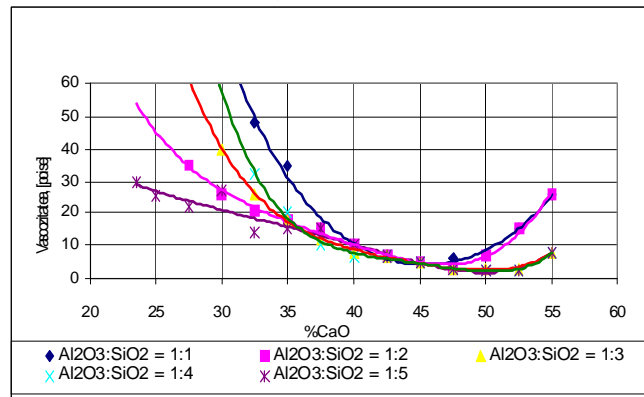
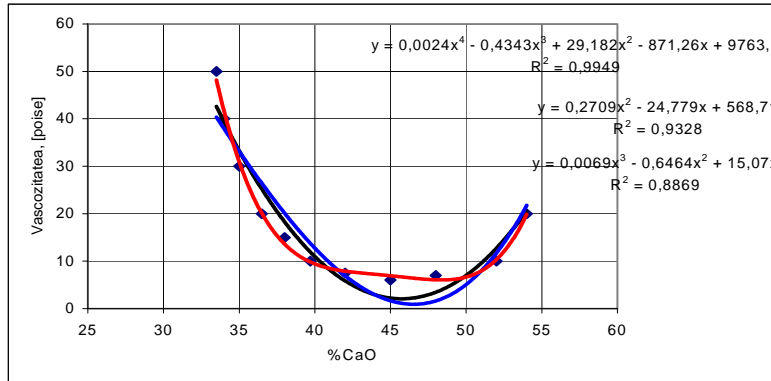
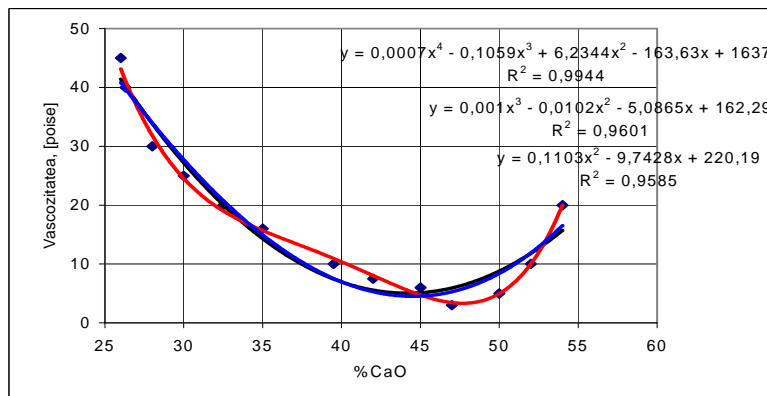
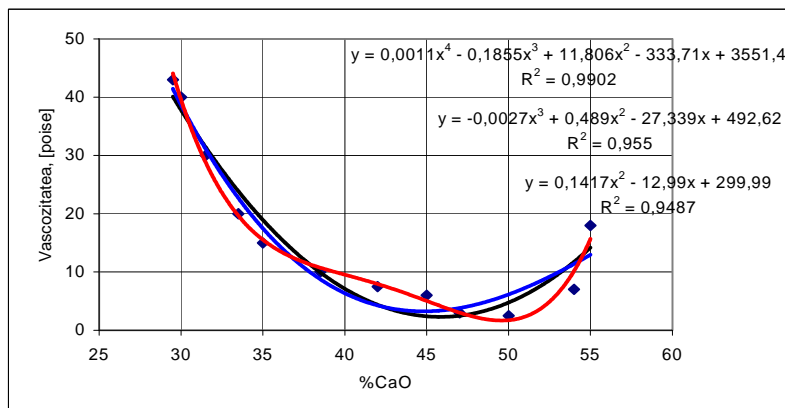


Figura 4.11. Influența raportului Al_2O_3/SiO_2 asupra vâscozității

Figura 4.12 a. Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/1$ Figura 4.12, b. Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/2$ Figura 4.12 c. Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/3$

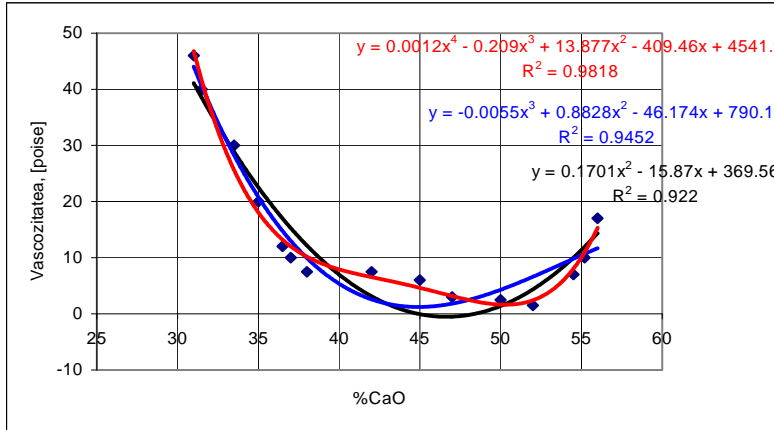


Figura 4.12 d . Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/4$

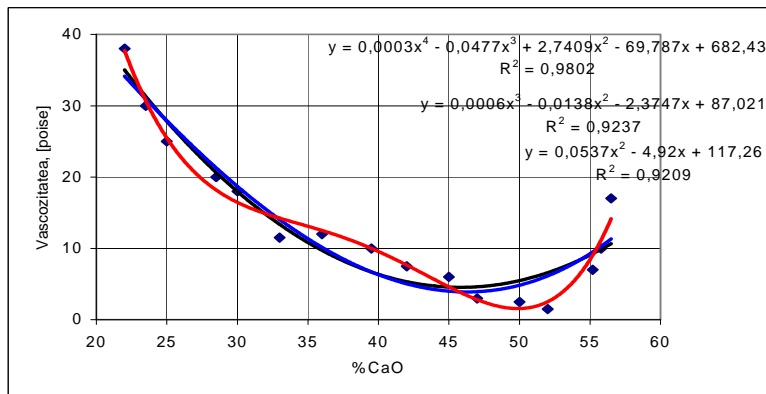


Figura 4.12 e. Raportul $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2 = 1/5$

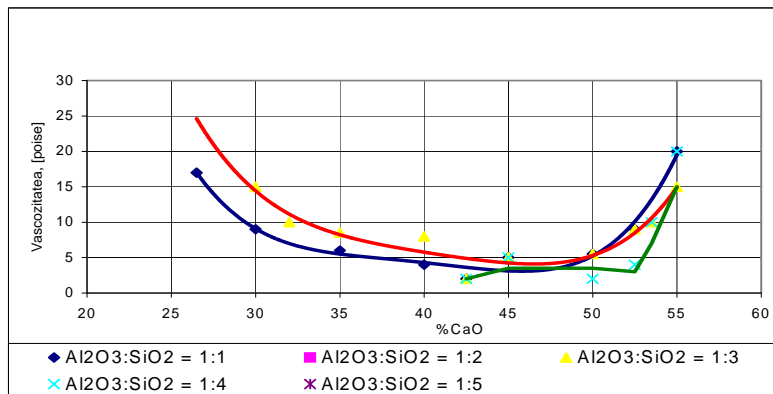
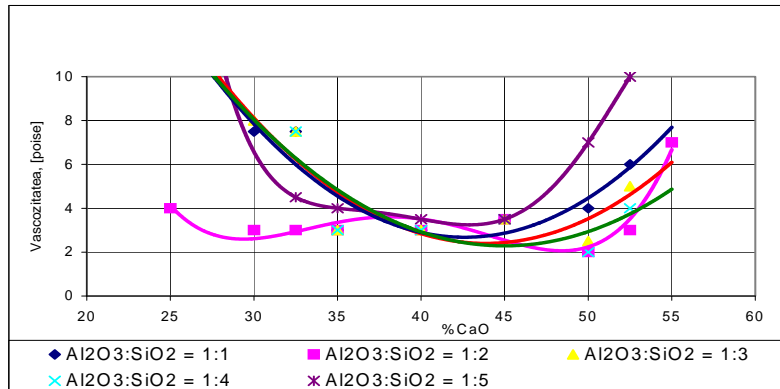
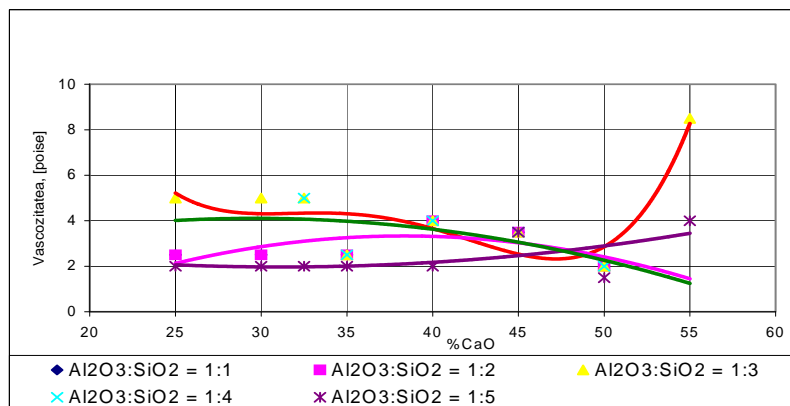


Figura 4.13. Influența raportului $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ asupra vâscozității, la 5%MgO

Figura 4.14. Influența raportului Al_2O_3/SiO_2 asupra vâscozității, la 10%MgOFigura 4.15. Influența raportului Al_2O_3/SiO_2 asupra vâscozității, la 15%MgO

A. Wyckaert de la "Dinkirk Works" - Franța a ajuns la concluzia că, conținutul inițial de Al_2O_3 în zgură nu este decisiv pentru zgura de turnare continuă, ea devenind saturată în jurul a 20% Al_2O_3 , dar curgerea continuă a zgurei de praf face ca în mod obișnuit să nu se atingă această valoare.

Creșterea vâscozității la introducerea Al_2O_3 se datorează faptului că acest oxid formează octaedre (AlO_6^{9-}) în loc de tetraedre (AlO_4^{5-}), legând capetele libere ale lanțurilor silicatică sau cele care au ultimul oxigen legat de Ca^{2+} .

Oxidul de magneziu. Influența MgO asupra vâscozității sistemului $SiO_2 - CaO - Al_2O_3$ diferă atât în funcție de concentrația oxidului, cât și de raportul celorlalți oxizi.

Astfel unii autori au ajuns la concluzia că la un raport $\frac{CaO}{SiO_2} = 0,7 - 1,1$ la

creșterea procentului de MgO până la 25% se înregistrează o scădere a vâscozității dar, în afara limitelor acestui raport, cantități mici de MgO duc la creșterea vâscozității.

Faptul că la același conținut de MgO creșterea conținutului de Al_2O_3 duce la creșterea vâscozității, se poate urmări pe diagrama din figura 4.16., care reprezintă diagrama din sistemul $SiO_2 - Al_2O_3 - CaO - MgO$ la secțiunea 10% MgO.

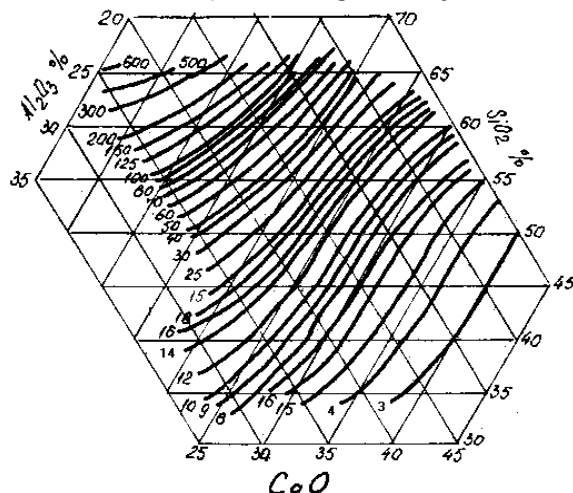


Figura 4.16. Izocome în sistemul $SiO_2-Al_2O_3-CaO-MgO$ la 10% MgO

S-a constatat însă că deși în general MgO duce la reducerea vâscozității, la zgurile cu raportul $\frac{CaO}{SiO_2}$ sub 0,70, conținut de Al_2O_3 sub 5%, introducerea MgO determină creșterea vâscozității.

Introducerea MgO în limitele amintite are și alte avantaje; astfel se poate observa buna lui influență asupra stabilității topiturilor silicatică, compoziția putând varia în limite largi, fără ca vâscozitatea să se modifice considerabil.[46]

Oxizii de fier și mangan. FeO și MnO influențează în aceeași manieră vâscozitatea. S-a constatat însă că cu cât zgurile sunt mai bazice, vâscozitatea este mai puțin influențată de prezența acestor oxizi. Se pare totuși că MnO are o acțiune de fluidificare mai accentuată, efectul maxim fiind la un conținut de 2 - 3% MnO.

Alcalii. Ele influențează puternic zgurile. La un conținut de 2 - 3 % R_2O , efectul este mai intens asupra zgurilor acide, apoi cu trecerea spre zgură neutră este necesar să crească și conținutul de alcalii.

Fluorul. Introducerea fluorului este deosebit de favorabilă pentru reducerea vâscozității zgurei. Acesta se datorează faptului că ionii de oxigen și fluor au raze atomice apropiate: $O^{2-} = 1,40 \text{ \AA}$ și $F^- = 1,36 \text{ \AA}$ și deci ionul de fluor poate înlocui oxigenul terminal al lanțurilor silicate.

A. Wyckaert a ajuns la concluzia că pentru o zgură utilizată la viteze medii de turnare, vâscozitatea trebuie să fie în jur de $0,2 \text{ Ns/m}^2$ (2P) la 1500°C .(figura 4.17).

Alți autori consideră indicată o vâscozitate de 10P la 1400°C , vâscozitate care să nu crească rapid cu scăderea temperaturii, iar alții preferă să unescă într-o diagramă vâscozitatea cu temperatura și vitezele de turnare.

În concluzie vâscozitatea zgurilor este influențată în cea mai mare parte de doi factori: temperatura și compoziția chimică. Vâscozitatea, în condițiile concrete din practică, poate fi mai puțin influențată prin intermediul temperaturii, deoarece

aceasta trebuie să se încadreze în anumite limite impuse, atât de calitatea oțelului cât și de tehnologia de elaborare.

În mod frecvent, în practică, vâscozitatea este modificată prin intermediul compoziției chimice, preferând să menținem temperatura în limitele tehnologice.

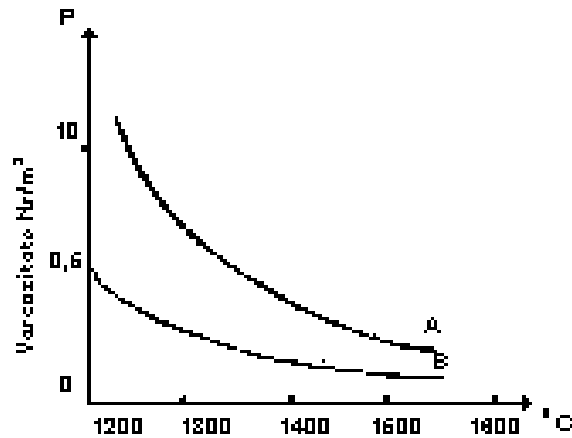


Figura 4.17. Variația vâscozității în funcție de temperatură

Pentru a obține o serie de date mai complete privind influența compoziției chimice asupra vâscozității, am extins prelucrarea datelor în programul MATLAB cu scopul obținerii nu numai a unor corelații duble ci și triple, prezentate atât sub formă analitică cât și grafică, cu anumite valori impuse.

Dacă în cazul unor corelații simple se poate obține un "poligon de marcă", considerăm că este logic să denumim, în cazul reprezentării în spațiul tridimensional "volumul de variație". Acest "volum de variație" este cuprins între două suprafețe de corelație situate la cota $\pm u$ față de suprafața obținută pentru $z = z_{med}$.

Curbele de nivel din planul orizontal permit corelarea valorilor pentru cei doi parametri, astfel încât să se poată obține o vâscozitate dorită. Suprafața de corelație poate prezenta punct extrem (de maxim sau de minim) - în cazul unui paraboloid sau un punct staționar (punct șea) - în cazul unei suprafețe tip șea, nu întotdeauna situat în domeniul de variație tehnologic.

Foarte interesant este modul în care se prezintă "volumul de variație", nu întotdeauna fiind un anumit paralelism între cele două suprafețe, ba dimpotrivă existând și situații când se intersectează.[45]

Menționez că am avut în vedere aceste rezultate obținute în urma prelucrării datelor în programele EXCEL și MATLAB la obținerea prafurilor după cele patru rețete.

4.5. Tensiunea interfazică

Datorită acestei proprietăți se poate obține un oțel care să nu fie impurificat cu diferite incluziuni și se evită lipirea zgurei de cristalizor. Pe suprafața oțelului plutesc incluziuni metalice și nemetalice pe care zgura topită trebuie să le absoarbă.

Apar două cazuri (figura 4.18).

În cazul A particula este udată de oțel și deci nu poate fi absorbită de zgură, iar particula B nu este umectată de oțel și poate fi absorbită de zgură. Din punct de vedere al zgurei de turnare, interesează cazul B.

Din figura 4.18., rezultă că o incluziune pentru a putea fi absorbită de zgură trebuie să fie umectată de aceasta. Deoarece incluziunile aluminoase sunt cele mai nefavorabile, se analizează acest caz.

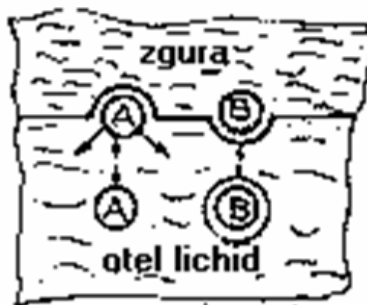


Figura 4.18. Comportarea unei particule la zona de separare oțel - zgură

Se știe că alumina pură are tensiunea superficială în jurul valorii de 640 mJ/m^2 , iar oțelul între 1000 și 1400 mJ/m^2 , este deci necesar ca zgura să aibă o tensiune superficială mai mică decât aceste valori pentru a putea absorbi incluziunile aluminoase, dar și pentru a nu fi ea însăși absorbită de oțel, și să formeze incluziuni nemetalice.

Tensiunea interfacială depinde de tensiunea superficială a zgurei, a oțelului și de unghiul de umectare dintre zgură și oțel: $\sigma_{M-Z} = \sigma_M - \sigma_Z \cdot \cos\theta_{M-Z}$ acesta în cazul în care nu au loc reacții chimice la suprafața de contact.[27]

Tensiunea superficială a zgurei este dependentă de compoziția chimică și de temperatură. S-a constatat că prezența silicei (SiO_2) determină scăderea tensiunii superficiale, iar a aluminei (Al_2O_3) duce la creșterea acesteia. Introducerea Na_2O , sub diferite combinații, determină scăderea tensiunii superficiale și creșterea capacității de absorbție a incluziunilor aluminoase. Astfel, la introducerea Na_2O în proporție de 5 - 15% s-a constatat o reducere a tensiunii superficiale de la 346 la 285 mJ/m^2 .

Referitor la influența fluorului, aceasta necesită încă cercetări. Astfel, unii autori o consideră a fi deosebit de favorabilă, în timp ce alții arată că raportat la sistemul $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$, ionii de F^- provoacă creșterea tensiunii interfaciale. De asemenea trebuie avut în vedere că există și autori care consideră că elementele care nu se dizolvă decât în una din fazele lichide în contact, nu au aproape nici un efect.

Introducerea oxizilor de calciu și magneziu (CaO , MgO) în topituri silicatiche determină creșterea tensiunii superficiale a zgurei. Această creștere se datorează faptului că lanțul tetraedric de (SiO_4^{4-}) se comportă ca un anion de dimensiuni mari, de care este atras cationul bivalent, astfel că la introducerea acestora în topitură crește numărul de legături efective.

Referitor la oxizii de mangan și de fier (MnO , FeO) sunt componente nedorite, deoarece ambele prezintă proprietăți tensioactive, ceea ce are ca efect o

scădere apreciabilă a tensiunii interfazice, determinând pătrunderea zgurii în straturile superficiale de oțel.

Experimental s-au găsit pentru tensiunea superficială a zgurei valori variind între 289 și 440 nJ/m².

Temperatura. Influența temperaturii este în general cunoscută creșterea temperaturii duce la intensificarea agitației termice și reducerea energiei de legătură, deci, implicit, la scăderea tensiunii superficiale.

Compoziția oțelului. Elementele din compoziția oțelului influențează și ele tensiunea interfazică

Astfel, elemente ca O₂, N₂, S, C au o influență considerabilă, chiar la conținuturi mici.

La O₂, N₂, S s-a găsit că la un conț de 0,01% coborârea tensiunii superficiale a Fe lichid este de aproximativ 10%, iar la un conținut de 0,1% devine 30%.

Carbonul se pare că nu influențează în nici un fel tensiunea interfazică.

Unghiul de umectare. Un alt factor de care depinde tensiunea interfazică în reprezintă unghiul de umectare dintre cele două lichide, mai exact cosinusul acestui unghi. La turnarea continuă zgurele prezintă unghiuri de umectare sub 90°, adică $0 \leq \cos\theta \leq 1$. Acesta înseamnă că aceste zgure vor uda totdeauna suprafața oțelului. Referitor la tensiunea interfazică înseamnă că aceasta este, ca valoare, întotdeauna mai mică decât tensiunea superficială a oțelului.[31]

4.6. Finețea de măcinare

Datorită faptului că praful este reîmprospătat continuu pe suprafața oțelului, pe măsură ce consumă, reacțiile chimice care au loc în praf trebuie să se desfășoare cu o anumită viteză.

Pentru a favoriza acest lucru, finețea de măcinare trebuie să fie înaintată considerându-se optim ca praful de turnare să aibă particulele sub 60 microni. Această finețe înaintată permite totodată o mai bună împrăștiere pe baia de oțel.

4.7. Umiditatea

Umiditatea fizică a prafului trebuie să fie sub 0,5% și acesta din două motive: pe de o parte la contactul prafului umed cu oțelul topit se produce evaporarea apei, vaporii sparg membrana de oțel și formează în bramă sufluri; pe de altă parte, pentru evaporarea apei este nevoie de căldură, determinând astfel creșterea transferului termic de la oțel spre praf, în loc să-l reducă.

Un alt dezavantaj al prezenței umidității în praf îl reprezintă faptul că atunci când umiditatea este peste 1%, praful nu se mai împrășteie pe suprafața oțelului, ci formează aglomerări, lăsând oglinda de metal descoperită.

Umiditatea chimică (apa de constituție) nu există în general la aceste tipuri de prafuri, deoarece în majoritatea lor materiile prime sunt oxizi sau, dacă nu, sunt calcinate la 900°C.[33]

În concluzie, din cele arătate anterior și datorită cererii de semifabricate de o calitate superioară, care presupune un grad ridicat de puritate și puține sau chiar deloc fisuri de suprafață, poate fi îndeplinită cu rezultate bune când se utilizează praful de turnare în combinație cu un tub de imersie.

Tubul de imersie servește scopului dublu și anume:

- de alimentare cu oțel a cristalizorului prin praful de turnare fără antrenarea acestuia sau a particulelor de zgură în fir;

- protejarea jetului de oțel împotriva reoxidării.[12]

Respectând caracteristicile prezentate anterior, prafurile de turnare utilizate în cristalizor vor corespunde cerințelor din practică și anume:

- bună corelație între viteza de zgurificare a prafului și cea de consum a zgurii, astfel încât în permanență în cristalizor, la suprafața băii de oțel, rămâne tot timpul aceeași cantitate de zgură topită;
- stratul protector de zgură lichidă care se formează la suprafața oțelului previne orice reacție de reoxidare a acestuia cu oxigenul din atmosferă;
- influența asupra profilului meniscului oțelului evidențiată prin faptul că urmele de oscilație sunt produse fără nici o suprapunere sau fisură, evitându-se apariția incluziunilor de zgură și a fisurilor transversale;
- formarea unei pelicule uniforme între crusta de oțel și peretele cristalizorului, care garantează transferul controlat la căldurii și lubrefierea firului;
- nu impurifică oțelul cu zgură topită sau solidificată;
- reținerea incluziunilor care decantează din baia de oțel;
- reducerea pierderilor de căldură prin radiație și prevenirea solidificării parțiale a oțelului la nivelul băii metalice.[28]

4.8. Comportarea prafului de turnare în cristalizor

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.

Procesele fizico-chimice care au loc în sistemul praf de turnare – zgură lichidă – meniscul de oțel lichid în curs de solidificare – peretele cristalizorului sunt foarte complicate și nu sunt încă complet investigate și elucidate.

Datorită însă acestor procese o anumită cantitate de zgură lichidă curge peste menisc în spațiul dintre crusta firului și peretele cristalizorului și formează o peliculă, constituită din mai multe faze, de la lichid (pe crusta firului) până la solid (pe peretele cristalizorului). Această peliculă (film) servește pe de o parte ca un lubrefiant și pe de altă parte ca un izolator între crusta firului și peretele cristalizorului. Această izolare termică este foarte importantă, deoarece atât în cazul unei izolări excesive cât și a uneia insuficiente, există posibilitatea producerii unor defecte de fabricație cât și a unor deranjamente în funcționarea instalației.

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.

4.9. Specificația și încercarea prafului de turnare

Factorii care influențează proprietățile și comportarea prafurilor de turnare

sunt deseori atât de mult interconectați încât cercetarea separată și încercările nu dat întotdeauna rezultate reprezentative.

În general se aplică următoarele criterii de determinare a proprietăților prafurilor prezentate în tabelul 4.2.

Tot în acest scop am efectuat o serie de prelucrări în programele EXCEL și MATLAB, rezultând următoarele:

- vâscozitatea fluxului de zgură sintetică este influențată de temperatură și compoziția chimică ;
- temperatura de topire poate fi influențată prin intermediul compoziției chimice;
- corelația simplă ne dă posibilitatea de a cunoaște influența unui anumit component din zgură sau a unui raport a temperaturii asupra vâscozității;
- corelația multiplă ne dă posibilitatea să observăm influența cumulată a doi sau trei factori independenți asupra vâscozității, precum și cea a stabilirii unor domenii optime de compoziție chimică.[13]

Tabelul 4.2. Criterii de determinare a prafurilor

Criterii	Proprietatea prafului
Marca de oțel sau temperatura lichidus	Cu cât este mai scăzută temperatura lichidus a oțelului, cu atât trebuie să se topească mai repede praful, acesta înseamnă o viteză înaltă de topire și temperatură scăzută de topire
Viteza de topire și timpul în cristalizor	Cu cât este mai mare viteza de turnare, cu atât trebuie să se topească mai repede praful

4.10. Concluzii

Din literatura de specialitate rezultă că, în principal, calitatea suprafeței semifabricatelor turnate continuu este influențată, pe lângă o serie de factori tehnologici și de caracteristicile prafurilor de turnare.

În studiul efectuat privind influența prafurilor asupra procesului de turnare continuă, s-au evidențiat factorii ce determină caracteristicile acestor prafuri, în mod deosebit vâscozitatea. Am ales acest parametru calitativ, deoarece acesta influențează în cea mai mare parte calitatea ungerii și prin aceasta calitatea semifabricatului turnat continuu.

Concluziile desprinse în urma experimentărilor efectuate, relevă necesitatea utilizării prafurilor noi, performante, pentru care, cu cât va fi mai scăzută temperatura lichidus a oțelului și mai mare viteza de turnare, cu atât va trebui să se topească mai repede praful (acesta însemnând o viteză înaltă și o temperatură scăzută de topire).

Principalele direcții de cercetare, ce ar trebui abordate în acest domeniu, trebuie îndreptate către optimizarea prafurilor folosite la turnarea continuă a țagelilor din otel, având ca obiectiv studiul proceselor de lubrefiere și infiltrare a fluxului topit în cristalizator. Acest proiect de cercetare a fost sponsorizat parțial de Comunitatea Europeană a Oțelului și Cărbunelui (CECO), actualmente EUROFER, și realizat de firma spaniolă SIDENOR. În cadrul acestui proiect, s-a fost studiat mecanismul de lubrifiere a cristalizorului pentru a preveni defectul de lipire a crustei de otel și au fost propuse prafuri noi, performante, pentru a reduce forța de frecare în cristalizator precum și un nou model de oscilație a cristalizorului.

5. EXPERIMENTĂRI TEHNOLOGICE PRIVIND PRODUCEREA ȘI UTILIZAREA PRAFURILOR DE TURNARE CONTINUĂ LA OȚELĂRIA ELECTRICĂ 2 ARCELOR MITTAL STEEL HUNEDOARA

5.1. Alegerea materialelor și stabilirea componenței prafurilor de turnare

Materiile prime utilizate pentru realizarea prafurilor de lubrefiere pentru cristalizor au fost alese în funcție de următoarele criterii:

- compoziția chimică;
- conținutul de noxe;
- posibilitatea realizării pulberilor ca amestecuri mecanice;
- costuri;
- cheltuielile aferente procesării.

Compoziția chimică este unul dintre principalele criterii din punct de vedere tehnologic, deoarece trebuie să se poată asigura prin topire în contact cu oțelul lichid din cristalizor, obținerea unei zguri care să se încadreze în caracteristicile fizico-chimice.[75]

Cunoscând compozițiile chimice, componenții au fost aleși astfel încât să se obțină o compoziție chimică medie similară cu alte prafuri produse de firme autohtone și străine și care să îndeplinească în bune condiții rolul de lubrifiant.

În ceea ce privește protecția muncii, este foarte important ca aceste prafuri în timpul zgurificării, ca urmare a contactului cu oțelul lichid să nu degaje noxe.

Materialele alese pentru obținerea amestecului mecanic au fost aduse la o granulație corespunzătoare, respectiv 85% sub 0,06mm. Este cunoscut faptul că odată cu creșterea indicelui de sfărâmare (măcinare) cresc și cheltuielile de procesare. În acest sens am căutat să alegem ca materii prime, pe cele care se aduc relativ ușor la forma de pulbere sau care sunt deja în această situație.[36]

Referitor la costuri, am căutat să folosim în primul rând diverse deșeuri rezultate din procesele industriale, având în vedere și aspecte de ordin ecologic.

Pentru obținerea prafurilor de turnare pentru cristalizor ca amestecuri mecanice, s-au folosit următoarele materii prime:

- cenușă de termocentrală;
- zgură de furnal;
- deșeuri de B.C.A.;
- calcar;
- fluorină brută;
- sodă calcinată;
- dolomită brută;
- praf de grafit (sau cocs metalurgic).

Limitele de variație pentru principalele caracteristici fizico-chimice ale materiilor prime folosite la realizarea loturilor experimentale sunt prezentate în tabelul 5.1.

În tabelul 5.2. prezint compoziția chimică și masa volumetrică a materiilor prime folosite la realizarea loturilor experimentale de prafuri de lubrifiere, experimentate la turnarea continuă a oțelului la Oțelăria Electrică2 – ARCELOR MITTAL STEEL HUNEDOARA.[3]

Pe baza datelor prezentate în tabelul 5.2. am stabilit 4 rețete pentru obținerea prafurilor de turnare.

Compoziția și compoziția chimică a rețetelor o prezint în tabelele 5.3., 5.4., 5.5., 5.6., 5.7. (compoziția și compoziție chimică).

Sortimentele de prafuri destinate turnării blumurilor și țagelilor au un conținut de carbon de cca. 22 - 23%, temperaturi de topire de cca. 1200°C și vâscozitatea de cca. 5 - 6 poise.

Tabelul 5.3. Compoziția rețetelor

Nr. rețetă	Materii prime folosite							
	Cenușă termo-centrală %	Zgură de furnal %	Deșeuri B.C.A. %	Fluorină brută %	Praf de grafit %	Calcar %	Sodă calcinată %	Dolomită %
A	15	28	15	6	21	9	6	-
B	20	24	12	6	22	6	6	4
C	20	24	12	6	22	10	6	-
D	18	24	16	6	-	-	-	-

Domaniul optim al principalelor proprietăți dedus din analiza produselor realizate pe plan mondial cât și în urma cercetărilor proprii, este prezentat în tabelul 5.8.

Tabelul 5.8. Principalele proprietăți ale prafurilor de turnare

Masa volumetrică	max. 1150 kg/m ³		
Granulație	85% < 0,06 mm		
Bazicitate	CaO/SiO ₂ = 0,7 - 1,0		
Temperatura de topire	1150 - 1250 °C		
Viteza de topire	10 ⁻² - 4*10 ⁻² kg/m ² s		
Vâscozitatea la temperaturile [poise]	1200 °C	1300 °C	1400 °C
	10 - 2	2 - 6	5 - 1,5

5.2. Producerea prafurilor de turnare

Pentru producerea prafurilor utilizate la turnarea continuă, pentru lubrifiere în cristalizor, am utilizat schema fluxului tehnologic de fabricație.

Materialele utilizate pentru producerea prafurilor pentru turnarea continuă (de lubrifiere) au fost supuse în prealabil operației de calcinare în vederea eliminării umidității. Am considerat că este mai eficient pentru unele materiale (calcar,

fluorină, spărturi de electrozi) să facem o sfărâmare înaintea operației de măcinare.[38]

Măcinarea s-a făcut într-o moară cu bile și moara Kollergang, utilaj existent în dotarea laboratorului de Metalurgia fontei și oțelului. Înainte de dozare, materialele au fost cernute pe site cu ochiurile de 1 mm, 0,25 mm, 0,065 mm și 0,018 mm.

Refuzurile de pe sitele a fost reintrodus în instalația de măcinare. Am considerat că este mai indicat pentru calitatea prafului de turnare, ca înaintea dozării să supunem operației de clasare și materialele existente în stare pulverulentă fără ca acestea să fie supuse inițial operației de măcinare (sodă calcinată și cenușă de termocentrală). Această operație s-a justificat pentru ambele materiale rămânând pe sita de 0,25 mm circa 4% refuz, mai ales în cazul cenușii de termocentrală.

După clasare, din fiecare material s-a dozat cantitatea necesară amestecului conform rețetei urmărite, după care s-au introdus componenții în toba de amestec în vederea omogenizării.[73] Amestecul omogenizat a fost dozat și ambalat în pungi de polietilenă, în cantitate de 5 kg/pungă.

Din fiecare rețetă înainte de testarea în practică s-a efectuat o testare în fază de laborator care a permis o primă apreciere în comparație cu praful utilizat în prezent la oțelărie (Scorialit C 163-79/H – praf etalon), a cărui caracteristici sunt prezentate în tabelul 5.9.

Tabelul 5.9. Caracteristicile prafului etalon

Element/Proprietate	Scorialit C 163 – 79/H	
SiO ₂	24,0 - 26,0%	
CaO + MgO	23,5 - 25,5%	
Al ₂ O ₃	11,5 - 13,5%	
Fe ₂ O ₃	3,0 - 5,0%	
MnO	< 0,2%	
C _{liber}	23,0 - 25,0%	
C _{total}	23,0 - 25,0%	
F	5,0 - 6,5%	
Na ₂ O + K ₂ O	2,5 - 4,0%	
H ₂ O	< 0,8%	
CaO / SiO ₂	0,84 - 0,96	
Greutatea specifică	0,65 - 0,85 kg/dm ³	
Temperatura de înmuiere	1140 - 1200°C	
Temperatura de topire	1255 - 1295 °C	
Temperatura de curgere	1320 - 1360 °C	
Analiza granulometrică	mărimea sitei, [mm]	refuzul, [%]
	0,5	< 0,5
	0,125	2,0 - 10,0
	0,06	10,0 - 30,0

Testările în fază de laborator au demonstrat că în cazul prafului produse după rețete proprii, temperatura de topire este cu 50 - 70°C mai scăzută și zgura rezultată are o fluiditate mai mare, fapt confirmat și de experimentările în fază industrială. Topirea prafului s-a efectuat într-un cuptor Tamman[36].

5.3. Experimentarea prafurilor de turnare

Praful de turnare trebuie adăugat de îndată ce nivelul oțelului se ridică deasupra ieșirii tubului de imersie. Oțelul lichid ar trebui să fie întotdeauna acoperit uniform fără pete goale de oțel care rămân vizibile și întreaga suprafață a stratului de praf ar trebui să rămână colorată închis. Cu toate acestea stratul de zgură nu trebuie să devină prea gros, deoarece nivelul oțelului ar putea scădea apoi în mod necontrolat. Grosimea totală recomandată de praf și zgură este de 20 - 30 mm.

Nivelul de oțel ar trebui menținut constant pe întreg procesul de turnare. Fluctuațiile de nivel duc uneori la defecte de calitate pe suprafața firului și în fir cauzate de praful de turnare care poate fi înglobat sau poate să nu mai reacționeze după cum se așteaptă. Fluctuațiile nivelului de oțel cauzează de asemenea consum mai mare de praf de turnare.

Nu este recomandabil să se lovească cu tije sau bare la nivelul oțelului, de exemplu pentru a îndepărta scoarțe de zgură, deoarece există riscul de a introduce zgură în crusta firului din interior și astfel să cauzeze defecte interne. Crustele de zgură nu ar trebui îndepărtate dacă acesta nu este posibil fără introducerea barei sau tijei în stratul de zgură. Praful de turnare trebuie menținut uscat tot timpul. Praful neconsumat care a existat deja în tăvile de praf din partea superioară a cristalizorului trebuie descărcat.[40]

Testările prafului de turnare pentru cristalizor s-au efectuat la Oțelăria Electrică pe o instalație de turnare prevăzută cu 5 fire, la care semifabricatului turnat a fost de 240 x 270 mm, iar viteza de turnare a fost cuprinsă între 0,78 – 0,83 m/min.

În cadrul experimentărilor, adaosul de praf de turnare s-a făcut la un singur fir (firul 2) pentru a se putea face o comparație privind modul de comportare a prafului experimentat, raportat la praful etalon – Scorialit. Fiecare rețetă a fost testată la un număr de două turnări, deci în total pentru opt șarje, în toate cazurile turnându-se oțeluri pentru țevi.

Experimentările efectuate au avut drept scop clarificarea următoarelor aspecte:

- comportarea la turnare (modul de topire, modul de așezare pe menisc);
- calitatea suprafeței semifabricatului;
- starea suprafeței interne a cristalizorului după terminarea turnării;
- consumul specific.

În urma analizei testărilor efectuate au rezultat următoarele concluzii:

- împrăștierea și acoperirea meniscului de oțel din cristalizor a fost bună, pentru toate prafurile produse după cele 4 rețete, comportarea fiind similară cu a prafului etalon;

- viteza de topire a fost mai mare în comparație cu cea a prafului etalon, dar nu au rămas pete de oțel de pe suprafața meniscului neacoperite de zgură;

- filmul de zgură rezultat după topirea (zгурificarea) prafului, s-a desprins ușor de crusta de oțel, semifabricatele prezentând o suprafață curată din acest punct de vedere;

- peretele cristalizorului a rămas curat după terminarea turnării, neavând loc lipirea zгурei;

- pe suprafața semifabricatelor nu s-a constatat existența altor defecte față de turnarea cu praful etalon;

- consumul de praf de turnare a fost cu 18 - 20% mai mare față de praful etalon, fapt explicabil prin viteză mai mare de topire și prin pierderi mai mari la calcinare[24].

Analizând modul de comportare în timpul turnării a prafurilor produse după cele patru rețete, luând în considerare și comportarea prafului Scorialit, consider că cel mai bine a corespuns praful produs după rețeta 2.

Din punct de vedere al stării suprafeței semifabricatelor turnate continuu, am constata că nu există deosebiri semnificative între semifabricatele turnate cu cele două tipuri de praf. Nici în ceea ce privește puritatea oțelurilor nu s-au semnalat deosebiri (absorbție de incluziuni de zgură).

Pentru a obține o imagine mai bună privind eficiența utilizării rețetei nr.2 în practica industrială, printr-o serie de adaosuri am obținut câteva rețete derivate prezentate în tabelul 5.10. și 5.11.

Tabelul 5.10. Rețete derivate din rețeta de bază

Nr. rețetă	Compoziția rețetelor							
	Cenușă termocentrală %	Zgură de furnal %	Deșeuri B.C.A. %	Florină %	Praf de grafit %	Calcar %	Bauxită %	Sodă calcinată %
2a	19	23	-	6	22	9	4	6
2b	18	22	11	6	21	9	7	6
2c	18	22	11	9	21	9	4	6
2d	18	22	11	9	20	9	6	5

Tabelul 5.11. Compozițiile chimice ale rețetelor derivate obținute conform buletinului de analiză

Nr. rețetă	Compoziție chimică%										
	C	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O+K ₂ O	TiO ₂	MnO
2a	22.67	26.91	21.08	1.59	10.34	5.61	5.99	0.11	4.97	0.18	0.54
2b	21.87	26.23	20.36	1.56	12.19	6.42	5.78	0.11	4.79	0.17	0.52
2c	21.77	25.94	20.27	1.53	9.94	5.39	9.59	0.11	4.77	0.17	0.52
2d	21.39	25.63	19.93	1.51	10.85	5.79	9.42	0.11	4.69	0.17	0.51

Pentru rețeta nr. 2a, experimentările au decurs în mod similar ca în cazul rețetei de bază. S-a constatat o viteză mai mică de topire, consumul fiind de 0.60kg praf/t oțel de 0.61kg/t oțel la rețeta de bază și respectiv de 0.56kg praf/t oțel la rețeta etalon.

Starea suprafeței semifabricatului și a suprafeței interioare a cristalizorului a fost corespunzătoare. Consider că această rețetă poate fi utilizată în practică alături de rețeta nr.2.

Prafurile pentru rețeta 2b au fost utilizate numai la o singură secvență, deoarece s-a apreciat că viteza de topire este mai redusă decât în cazul rețetei de bază. De asemenea, în cazul rețetelor 2c și 2d s-a constata că viteza de topire este mai mare decât în cazul rețetei 2, existând riscul rămânerii unor suprafețe de menisc neacoperite.

Starea suprafeței semifabricatului turnat continuu a fost bună, însă consumul de praf a crescut la 0.65kg/t oțel și în acest caz experimentările au fost realizate pe o secvență pentru fiecare rețetă.

Pentru asimilarea și omologarea tehnologiei de fabricație a prafurilor de turnare se are în vedere numai rețeta 2 și 2a codificate rețeta A și respectiv rețeta B.[23]

5.4. Concluzii

Din analiza cercetărilor efectuate, atât privind studiul din literatura de specialitate cât și experimentările proprii au rezultat următoarele concluzii:

- problema comportării prafului de turnare și factorii care o influențează, deși este în principiu cunoscută, mai necesită încă cercetări;
- prin prelucrarea unor date din literatura de specialitate și din experimentări proprii, s-au obținut o serie de corelații de importanță deosebită, între compoziția zguri rezultată din prafurile de turnare și calitatea acestora;
- este necesară o sintetizare a datelor din literatura de specialitate și prelucrarea lor utilizând tehnica modernă de calcul, pentru a obține informații mai concrete referitoare la factorii care influențează calitatea prafurilor, modul în care pot fi influențate caracteristicile acestora și comportarea lor în timpul turnării;
- pentru producerea prafurilor de turnare se pot utiliza deșeuri rezultate din diferite activități industriale, ceea ce pe de o parte conduce la un preț de fabricație mai scăzut, iar pe de altă parte la rezolvarea unor probleme de ordin ecologic;
- de o importanță deosebită pentru comportarea prafurilor este respectarea componentei granulometrice, de fapt aceasta ridicând cele mai mari probleme și cele mai mari costuri de procesare.

Trebuie însă avut în vedere că această finețe avansată, permite o împrăștiere mai bună pe baia de oțel și menținerea prafului în rețeaua spațială creată de carbon:

- există posibilitatea utilizării mai multor rețete, în funcție de disponibilul de materii prime, respectiv de costurile acestora;
- ca urmare a experimentărilor efectuate cu prafurile produse după cele patru rețete, s-a observat că cea mai bună comportare a avut-o cel obținut după rețeta 2.

Dintr-un calcul estimativ, rezultă că prafurile produse după toate cele patru rețete au un preț de cost mai scăzut cu cca. 35% față de prafurile din import.

Pentru calcularea corectă a unui preț de cost precum și pentru definitivarea și asimilarea unei tehnologii de fabricație, consider că se impune producerea și utilizarea a cel puțin 5t de prafuri (în paralel cu prafurile utilizate actualmente în practica industrială), ceea ce ar impune continuarea cercetărilor.

96 Experimentări tehnologice privind producerea și utilizarea prafurilor de turnare
continuă la Oțelăria Electrică 2 Arcelor Mittal Steel Hunedoara - 5

Tabelul 5.2. Compoziția chimică și masa volumică a materiilor prime folosite pentru producerea prafurilor de lubrifiere

Material	Analiza chimică, [%]												γ kg/m ³
	C	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	P.C	TiO ₂	
Cenușă de termocentrală	-	47,08	6,72	1,82	23,06	20,12	-	0,5	0,20	0,20	-	0.30	900
Zgură de furnal	-	38,41	46,34	4,01	7,72	0,62	-	-	1,96	0,83	2,2	0.11	1100
Deșeuri B.C.A.	-	50,82	20,34	0,82	6,58	-	-	-	2,81	1,12	17,10	0.41	300
Fluorină brută	-	2,5	0,7	-	0,20	0,10	95,1	-	-	-	0,8	0.60	2750
Praf de grafit	98	1,03	0,236	0,1	0,634	-	-	-	-	-	-	-	800
Calcar	-	3,5	53,0	0,5	2,5	1,6	MnO 1,8	0,10	-	-	37,0	-	1575
Dolomită brută	-	1,2	30	22	0,8	1,0	-	0,12	-	-	44,9	-	-
Sodă calcinată	-	-	-	-	-	-	-	-	Na ₂ CO ₃ 99,8	-	-	-	750

Tabelul 5.4. Componenta și compoziția chimică pentru rețeta nr.1

Material	[kg]	Compoziția chimică, [kg]												
		C	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	P.C.	TiO ₂	MnO
Cenușă termocentrală	18	0	8,474	1,21	0,328	4,15	3,622	0	0,09	0,04	0,036	0	0,054	0
Zgură de furnal	24	0	9,122	10,88	0,962	1,85	0,149	0	0	0,47	0,199	0,528	0,0264	0,336
Deșeuri B.C.A.	16	0	8,131	3,254	0,131	1,05	0	0	0	0,45	0,179	2,736	0,0656	0
Fluorină brută	6	0	0,15	0,042	0	0,01	0,006	5,706	0	0	0	0,048	0,036	0
Praf de grafit	21	20,6	0,216	0,05	0,021	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0
Calcar	9	0	0,315	4,77	0,045	0,23	0,144	0	0,009	0	0	3,33	0	0,162
Sodă calcinată	6	0	0	0	0	0	0	0	3,51	0	2,49	0	0	0
Total	100	20,6	26,41	20,21	1,487	7,43	3,92	5,706	0,099	4,47	0,414	9,132	0,182	0,162
Bazicitatea	B = CaO/SiO ₂ = 0,765													
Total fără pierderi prin calcinare	100	22,6	29,06	22,24	1,637	8,17	4,314	6,279	0,109	4,91	0,456	0	0,20029	0,17828
Total fără carbon	100	0	37,57	28,75	2,116	10,6	5,578	8,118	0,141	6,35	0,59	0	0,25893	0,23048

Tabelul 5.5. Componenta și compoziția chimică pentru rețeta nr.2

Material	[kg]	Compoziția chimică, [kg]												
		C	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	P.C.	TiO ₂	MnO
Cenușă termocentrală	20	0	9,416	1,344	0,364	4,61	4,024	0	0,1	0,04	0,04	0	0,06	0
Zgură de furnal	24	0	9,122	10,88	0,962	1,85	0,149	0	0	0,47	0,199	0,528	0,0264	0,336
Deșeuri B.C.A.	12	0	6,098	2,441	0,098	0,79	0	0	0	0,34	0,134	2,052	0,0492	0
Fluorină brută	6	0	0,15	0,042	0	0,01	0,006	5,706	0	0	0	0,048	0,036	0
Praf de grafit	22	21,6	0,227	0,052	0,022	0,14	0	0	0	0	0	0	0	0
Calcar	10	0	0,35	5,3	0,05	0,25	0,16	0	0,01	0	0	3,7	0	0,18
Sodă calcinată	6	0	0	0	0	0	0	0	0	3,51	0	2,49	0	0
Total	100	21,6	25,36	20,06	1,497	7,66	4,339	5,706	0,11	4,36	0,374	8,818	0,1716	0,516
Bazicitatea	B = CaO/SiO ₂ = 0,791													
Total fără pierderi prin calcinare	100	23,6	27,82	22	1,642	8,4	4,758	6,258	0,121	4,78	0,41	0	0,1882	0,565
Total fără carbon	100	0	36,43	28,81	2,15	11	6,232	8,196	0,158	6,26	0,537	0	0,24647	0,74115

Tabelul 5.6. Componenta și compoziția chimică pentru rețeta nr.3

Material	[kg]	Compoziția chimică, [kg]												
		C	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	P.C.	TiO ₂	MnO
Cenușă termocentrală	15	0	7,062	1,008	0,273	3,46	3,018	0	0,075	0,03	0,03	0	0,045	0
Zgură de furnal	28	0	10,64	12,7	1,123	2,16	0,174	0	0	0,55	0,232	0,616	0,0308	0,392
Deșeuri B.C.A.	15	0	7,623	3,051	0,123	0,99	0	0	0	0,42	0,168	2,565	0,0615	0
Fluorină brută	6	0	0,15	0,042	0	0,01	0,006	5,706	0	0	0	0,048	0,036	0
Praf de grafit	21	20,6	0,216	0,05	0,021	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0
Calcar	9	0	0,315	4,77	0,045	0,23	0,144	0	0,009	0	0	3,33	0	0,162
Sodă calcinată	6	0	0	0	0	0	0	0	0	3,51	0	2,49	0	0
Total	100	20,6	26,01	21,62	1,585	6,98	3,342	5,706	0,084	4,51	0,43	9,049	0,1733	0,554
Bazicitatea	B = CaO/SiO ₂ = 0,831													
Total fără pierderi prin calcinare	100	22,6	28,6	23,77	1,742	7,67	3,674	6,274	0,092	4,96	0,473	0	0,19054	0,60912
Total fără carbon	100	0	36,96	30,72	2,252	9,92	4,749	8,108	0,119	6,41	0,612	0	0,24627	0,78726

98 Experimentări tehnologice privind producerea și utilizarea prafurilor de turnare
 continuă la Oțelăria Electrică 2 Arcelor Mittal Steel Hunedoara - 5

Tabelul 5.7. Componenta și compoziția chimică pentru rețeta nr.4

Material	[kg]	Compoziția chimică, [kg]												
		C	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	P.C.	TiO ₂	MnO
Cenușă termocentrală	20	0	9,416	1,344	0,364	4,61	4,024	0	0,1	0,04	0,04	0	0,06	0
Zgură de furnal	24	0	9,218	11,12	0,962	1,85	0,149	0	0	0,47	0,199	0,528	0,0264	0,336
Deșeuri B.C.A.	12	0	6,098	2,441	0,098	0,79	0	0	0	0,34	0,134	2,052	0,0492	0
Fluorină brută	6	0	0,15	0,042	0	0,01	0,006	5,706	0	0	0	0,048	0,036	0
Praf de grafit	22	21,6	0,227	0,052	0,022	0,14	0	0	0	0	0	0	0	0
Calcar	6	0	0,21	3,18	0,03	0,15	0,096	0	0,006	0	0	2,22	0	0,108
Dolomită brută	4	0	0,048	1,2	0,88	0,03	0,04	0	0,005	0	0	1,796	0	0
Sodă calcinată	6	0	0	0	0	0	0	0	3,51	0	2,49	0	0	0
Total	100	21,6	25,37	19,38	2,357	7,59	4,315	5,706	0,111	4,36	0,374	9,134	0,1716	0,444
Bazicitatea	B = CaO/SiO ₂ = 0,764													
Total fără pierderi prin calcinare	100	23,7	27,92	21,33	2,594	8,35	4,749	6,28	0,122	4,8	0,411	0	0,18885	0,48863
Total fără carbon	100	0	36,6	27,96	3,401	10,9	6,226	8,233	0,16	6,29	0,539	0	0,2476	0,64064

Tabelul 5.1. Limitele de variație pentru compoziția chimică a materiilor prime folosite pentru producere prafurilor de lubrifiere

Denumire material	Analiza chimică, [%]											
	C	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaF ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	P.C.	TiO ₂
Cenușă de termocentrală	-	47,08	6,72	1,82	23,06	20,12	-	0,5	0,20	0,20	-	0,30
Zgură de furnal	-	38,41	46,34	4,01	7,72	0,62	-	-	1,96	0,83	2,2	0,11
Deșeuri B.C.A.	-	50,82	20,34	0,82	6,58	-	-	-	2,81	1,12	17,10	0,41
Fluorină brută	-	2,5	0,7	-	0,20	0,10	95,1	-	-	-	0,8	0,60
Praf de grafit	98	1,03	0,236	0,1	0,634	-	-	-	-	-	-	-
Calcar	-	3,5	53,0	0,5	2,5	1,6	MnO 1,8	0,10	-	-	37,0	-
Dolomită brută	-	1,2	30	22	0,8	1,0	-	0,12	-	-	44,9	-
Sodă calcinată	-	-	-	-	-	-	-	-	Na ₂ CO ₃ 99,8	-	-	-

6. MODELUL MATEMATIC DE SIMULARE A SOLIDIFICĂRII SEMIFABRICATELOR TURNATE CONTINUU CU ADAOS DE MIRORĂCITORI

6.1.Cercetări cu privire la îmbunătățirea structurii semifabricatelor turnate continuu

Industria metalurgică din România este structurată în mod eșalonat pentru a asigura necesarul de produse siderurgice solicitate de ramurile economice, dar și pentru a participa la schimburile internaționale de produse din oțel în vederea compensării importului de materii prime.

Managementul în siderurgie trebuie să găsească răspunsuri în etapa actuală, la alte două întrebări care funcționează cât mai mult ca și criteriile de competitivitate în practica exploatarei procedeului:

- ce soluții tehnico-organizatorice să se adopte în tehnologia clasică astfel încât productivitatea la turnare să fie cât mai mare, fără a efectua productivitatea produsului finit (criteriul productivității maxime);
- ce dimensiuni de semifabricat turnat continuu să se adopte în fabricație, astfel încât să fie cât mai apropiate de dimensiunea finală a produsului siderurgic livrat, fără a efectua calitatea acestuia (criteriul dimensional).

Evident toate aceste criterii de competitivitate sunt subordonate interesului primordial al oricărui manager din siderurgie, anume acela de a fabrica produse de calitate cât mai bune cu costuri de fabricație cât mai mici.[32]

Una din sarcinile principale ale turnării continue actuale este îmbunătățirea calității oțelului turnat continuu. Pentru realizarea acestui deziderat trebuie să se acorde o atenție deosebită măsurilor de scădere a segregăției zonale și dentritice, de reducere a formării fisurilor și de creștere a densității axului părții centrale a semifabricatului turnat continuu.

Macrostructura semifabricatului obținut prin turnare continuă se caracterizează prin formarea a trei zone distincte: zona de suprafață a cristalelor echiaxe mici, zona dentritelor columnare și zona centrală a cristalelor echiaxe orientate. În funcție de condițiile de cristalizare zonele structurale se deosebesc după extinderea zonelor de solidificare și dimensiunile cristalelor în fiecare zonă.

Se cunoaște faptul că la solidificarea lingourilor de oțel întinderea zonei de cristale echiaxe favorizează îmbunătățirea considerabilă a calității structurii lingourilor, în special scăderea segregăției axiale și dentritice, dispersarea porozității axiale și micșorarea dimensiunilor incluziunilor nemetalice.

Crusta marginală se formează la o adâncime de 140-200mm sub nivelul oțelului lichid din cristalizor, în contact direct cu pereții reci de cupru ai acestuia. Datorită fluxului mare de căldură are loc o creștere rapidă a unor cristale achiaxe foarte fine, uniforme, formând o zonă de solidificare cu o grosime cuprinsă între 30-40mm și 60-70mm.

După formarea crustei marginale, odată cu scăderea temperaturii, aceasta se contractă și se desprinde de peretele cristalizorului formând un inetrstițiu mult mai mic decât la turnarea clasică. Când temperatura la suprafața exterioară a

semifabricatului ajunge la aproximativ 1200 °C, semifabricatul iese din cristalizor și urmează a fi răcit rapid în răcitorul secundar, unde temperatura scade până la 900-110 °C.

Formarea zonei a treia de solidificare începe încă din cristalizor și se continuă în răcitorul secundar, grosimea acestei zone fiind însă mult mai mare decât în cazul turnării clasice. În centrul semifabricatului se formează o zonă cu cristale echiaxiale, zonă care depinde mult de gradul de supraîncălzire, de secțiunea semifabricatului, de intensitatea răcirii secundare și de compoziția chimică a oțelului prin conținutul său de carbon în special.[33]

Pentru a asigura condițiile de solidificare impuse de compoziția chimică a oțelului trebuie sincronizați un număr mare de factori tehnologici, cei mai importanți fiind: compoziția chimică a oțelului, temperatura de turnare și viteza de turnare.

La turnarea oțelului cu un grad mic de supraîncălzire, cristalizarea în masa de oțel începe rapid, iar suprafața ocupată de cristalele echiaxe este mai mare. La turnarea oțelului cu un grad mare de supraîncălzire, germinarea cristalelor columnare face ca suprafața ocupată de cristalele echiaxe să fie mai redusă. Chiar și în cazul turnării cu un grad mai mare de supraîncălzire, în centrul semifabricatului se formează o zonă echiaxă. Acest lucru e posibil deoarece viteza de solidificare este întârziată din cauza schimbului de căldură limitat prin crusta formată.

În timpul formării zonei columnare, în fața frontului de solidificare se produce segregarea unor elemente. Dacă cristalele columnare cresc până la centrul semifabricatului, atunci în zona centrală semifabricatul va prezenta o segregatie majoră. Totodată, datorită supraîncălzirii excesive, în partea centrală a semifabricatului poate apărea o zonă poroasă.

În timpul solidificării blumurilor și țaglelor, la turnarea cu grad mare de supraîncălzire, cristalele columnare care cresc pe fețe opuse, se pot uni și pot forma așa numitele punți. În partea exterioară a firului turnat continuu se formează crusta. După formarea crustei, cristalele columnare încep să crească perpendicular pe suprafața semifabricatului. Datorită curenților de convecție și a gradientilor termici din oțelul lichid, dezvoltarea cristalelor columnare devine instabil, creând astfel posibilitatea formării punților care izolează de restul oțelului lichid anumite zone nesolidificate. Solidificarea în aceste zone este foarte asemănătoare cu solidificarea în lingotieră. Oțelul lichid prezent în aceste zone se va solidifica, formând microcavități (goluri).

În timpul solidificării blumurilor și țaglelor, la turnarea cu grad mic de supraîncălzire, formarea cristalelor echiaxe începe mult mai de vreme și în centrul semifabricatului se formează o zonă păstoasă. Solidificarea acestei zone păstoase în care oțelul lichid nu mai poate pătrunde, conduce la formarea segregatiilor în V. Aceste segregatii pot fi observate în secțiunea longitudinală a firului. Pentru eliminarea segregatiei centrale care poate apărea la sfârșitul solidificării, se poate aplica cu succes reducerea ușoară a secțiunii semifabricatului.[40]

Efectul factorilor tehnologici și constructivi asupra structurii de solidificare și a nivelului segregatiilor semifabricatului turnat continuu nu este individual, ci combinat. Astfel, deși supraîncălzirea este cel mai important factor și o valoare mică a acesteia conduce la mărirea zonei echiaxe, totuși în practică este dificil de operat cu un grad de supraîncălzire de doar 10 °C.

Dezvoltarea economiei mondiale și extinderea unor ramuri de vârf, a avut ca efect o diversificare și îmbunătățire a producției siderurgice, în vederea corelării fabricației cu solicitările tot mai exigente ale utilizatorilor.

Acțiunea de modernizare a industriei siderurgice care se desfășoară la nivel mondial, are în vedere introducerea sau extinderea unor tehnologii mai eficiente și

pe cât posibil nepoluante sau cu un grad redus de emisii nocive în mediul înconjurător, așa cum este și procedeul de turnare continuă.

Principalii factori care au urgențat extinderea tehnologiei moderne de turnare continuă pot fi sinterizați astfel :

- realizarea unor produse care să corespundă solicitărilor impuse de tehnicile de vârf (cosmonautică, electronică, militară, nucleară, etc.);
- protecția mediului și neperturbarea ciclurilor biologice ;
- creșterea productivității muncii;
- reducerea cheltuielilor materiale;
- adaptarea criteriilor de calitate la exigențele sporite ale utilizatorilor produselor din oțel.

La un produs metalurgic calitatea este caracterizată prin mulți parametri și determinări prin care se nimalizează :

- analiza chimică ;
- valorile proprietăților fizico-mecanice ;
- gradul de puritate în incluziuni nemetalice (natura, cantitatea, mărimea, forma și amplasarea acestora) ;
- conținutul de gaze al oțelului (H_2 , O_2 , N_2) ;
- finisarea suprafeței ;
- plaja de toleranțe, etc.

O calitate superioară la un produs siderurgic finit, care să asigure acestuia competitivitate ridicată, se poate realiza prin conceperea și aplicarea unor tehnologii integrate de elaborare a oțelului, turnare, laminare, trefilare, forjare, tratament termic, ș.a.

În industria oțelului realizarea unor produse de calitate la nivelul exigențelor mondiale și a tendințelor de globalizare, depinde de mai mulți factori, între care :

- itinerariul de producție, tehnologiile și procedurile de luccru, aplicate ;
- calitatea materialelor utilizate în procesul de elaborare, turnare, laminare ;
- nivelul de dotare tehnică, organizare, exploatare întreținere și parametrii de funcționare ai agregatelor și instalațiilor de producție;
- pregătirea profesională, exigența managerilor și cointeresarea materială a personalului în realizarea unei calități superioare.[34]

Turnarea continuă în statele industrializate și în curs de dezvoltare a avut o contribuție importantă la ridicarea nivelului calitativ produselor finite, majorarea profilului și îmbunătățirea prestației unor firme, prin avantajele tehnico-economice pe care le prezintă acest procedeu de realizare a oțelului:

- majorarea gradului de utilizare a metalului (scoaterea);
- reducerea consumului integral de combustibil și energie cu 50-70%, comparativ cu fluxul clasic de realizare a laminatelor la cald din lingou;
- produsele au structura omogenă și mai fină;
- semifabricatele au suprafața mai curată și laminatele finite defecte mai puține ;
- oțelul are puritate mai ridicată;
- cheltuielile de producție sunt mai reduse cu 14-26%;
- avantajele acestei tehnologii sunt ilustrate și prin extinderea procedurii în foarte multe state și profilul realizat la firmele respective;
- produsele finite din oțel realizate din semifabricate turnate continuu au competitivitate mare în cele mai multe cazuri de nivel mondial și asigură un profil ridicat în industria oțelului;pentru considerentele

6.1.Cercetări cu privire la îmbunătățirea structurii semifabricatelor 101 turnate continuu

enumerare, se recomandă uzinelor din România să intensifice precocuparea pentru realizarea într-o pondere mai mare a produselor lungi din semifabricate turnate continuu.

Orientarea pe plan mondial, cu precădere în Uniunea Europeană, a fost de a realiza la instalațiile de turnare continuă o extindere a gamei sortimentale de oțeluri, de obținere a unor semifabricate de dimensiuni apropiate de produsului finit, pentru creșterea eficienței, diminuarea segregățiilor, uniformizarea structurii metalografice.

Ponderea oțelului turnat continuu pe mapamond în 1985 a fost de 46%, pentru ca în 2002 să depășească 88%. În Uniunea Europeană prin tehnologia de turnare continuă s-a realizat 72% din producția de oțel în anul 1985 și 96.6% în anul 2002. Din 85 de țări în care se practică acest procedeu, în aproximativ 36 de state oțelul este integral turnat continuu.

Între țările care toarnă continuu 100% din producția de oțel se nominalizează: Arabia Saudită, Croația, Cuba, Danemarca, Ecuador, Elveția, Emiratele Arabe, Filipine, Grecia, Hong Kong, Indonezia, Iran, Irlanda, Israel, Letonia, Malaezia, Noua Zeelandă, Singapore, Siria, Tailanda, Ungaria, Uruguay, Venezuela, ș.a.

În alte 10 țări se toarnă continuu peste 99% din producția de oțel: Australia, Belgia, Finlanda, Mexic, Moldova, Norvegia, Slovacia, Taiwan, Tunisia, Uzbekistan.

La nivel mondial din total instalații de turnare continuu, aproximativ 26% realizează țagle. 20% blumuri și 54% sleburi.

La cea de a 37-a Conferință anuală IISI s-au constatat tendințe îmbucurătoare privind creșterea cererii globale de oțel. Ea se bazează pe creșterea economică constantă pe plan mondial în ultimii ani. Produsul intern brut totalizat pe plan mondial a crescut în 2003 cu 2.2% față de 2002 și cu 3.1% în anul 2004 față de 2003, față de situațiile anterioare de 1.9% în 2002 și 1.2% în 2001.

Activitatea economică în China, continuă să rămâne foarte susținută cu creșteri de 8.3% în 2003 și 8% în 2004, față de 8% în 2002, 7.5% în 2001 și 8% în 2000.

Japonia speră să evite cea de a patra recesiune care are loc în decursul ultimilor zece ani, având creșteri de 1-1.5 % în 2003 și 2004, față de numai 0.-0.4 % în 2001-2002. În celelalte țări asiatice creșterile au fost moderate, India 6.5%, Coreea de Sud 5.3 %, Australia 3.2 % și Taiwan 3.8 %.

În Europa se constată o stagnare relativă marcată prin creșteri imperceptibile în Uniunea Europeană (0.9-2% în perioada 2002-2004). Pe de altă parte unele țări din Europa Centrală, Polonia și Cehoslovacia se așteaptă la creșteri importante în anul 2008, iar țările membre CIS au înregistrat creșteri moderate de 4-5%. Statele Unite se așteaptă la o creștere de 6% în anul 2008 față de numai 0.4% în 2001, iar în țările Americii de Sud, creșterea se situa abia în 2004, 2.8% față de 2.3% în anul 2002 și 0.2% în anul 2001.

În ultimii ani în metalurgia noastră a fost extinsă această tehnologie, ponderea oțelului turnat continuu majorându-se de la 29.9% în anul 1985, la 96% în anul 2006.

În țara noastră turnarea continuă este utilizată predominant pentru oțeluri nealiatate, iar în Uniunea Europeană, Japonia, Canada, S.U.A. din producția de sortimente aliate mai mult de 90% sunt realizate prin acest procedeu.

De asemenea, structura sortimentală a produselor turnate continuu în România este simplificată, comparativ cu ceea ce se practică în alte state, unde se asigură laminarelor și sleburilor subțiri, profile și sârme de dimensiuni mici, semifabricate tubulare, rotunde cu diametrul până la 600 mm ș.a.

În metalurgia din țara noastră, oțelul destinat produselor lungi este turnat continuu în proporție de 43%, iar pentru laminate 94%.

Un alt aspect analizat a fost gradul de utilizare a instalațiilor de turnare continuă menținute în funcțiune, care în România este în medie 63% (mondial 90%).

Avantajele tehnico-economice pe care le prezintă turnarea continuă (îmbunătățirea calității produselor, creșterea productivității, reducerea costurilor de fabricație, eliminarea unor surse de poluare, etc. Impun ca în următorii 3-5 ani prioritatea numărul 1 a restructurării siderurgiei.

În teza de doctorat propusă prin tematica abordată, se urmărește clarificarea unor probleme cu privire la realizarea unei structuri cristaline îmbunătățite a semifabricatelor turnate continuu, prin utilizarea adaosului de microrăcitori în acesta, în timpul turnării continue a oțelului.

Pentru simultarea solidificării semifabricatelor turnate continuu, se va întocmi un model matematic, respectiv un program de simulare a solidificării semifabricatelor turnate continuu cu microrăcitori. Se are drept scop asigurarea unei baze de date și concluzii pentru utilizarea microrăcitorilor la turnarea continuă a oțelului și efectele acestora, asupra variației temperaturii în cristalizor și asupra structurii semifabricatului turnat continuu.

Baza de date obținută va asigura posibilitatea efectuării rezultatelor experimentale industriale, compararea datelor simulării cu rezultatele experimentărilor, respectiv verificarea industrială a acestora.

Experimentările urmăresc, demonstrarea practică a îmbunătățirii proprietăților semifabricatelor turnate continuu cu adaos de microrăcitori, comparativ cu cele obținute fără adaos de microrăcitori. Se urmărește să se realizeze practic o îmbunătățire a structurii, a caracteristicilor mecanice, a semifabricatelor turnate continuu, respectiv creșterea calității.

Cercetările prevăzute a se efectua în cadrul tezei de doctorat propus, se desfășoară pe fluxul tehnologic începând de la evacuarea oțelului din cuptor până la recepția semifabricatelor turnate continuu.

Documentarea din literatura de specialitate și participarea la experimentări, prelucrarea datelor și interpretarea lor, contribuie la perfecționarea specializării într-un domeniu de vârf al industriei siderurgice.[35]

Problema de bază care trebuie rezolvată, constă în obținerea semifabricatelor turnate continuu de calitate și anume omogene din punct de vedere chimic, structurale și a proprietăților mecanice. Factorii tehnologici care trebuie avuți în vedere pentru obținerea semifabricatelor turnate continuu sunt aceia care determină puritatea oțelului, în special ceea ce privește elementele cu tendința mare de segregare și gazele precum și factorii care influențează progresarea frontului de solidificare.

Compoziția chimică cerută oțelului și gradul de puritate în ceea ce privește conținuturile de gaze și incluziuni nemetalice sunt influențate de foarte mulți factori tehnologici și anume:calitatea încărcăturii, condițiile de topire, condițiile de la afinare, de la dezoxidare, de la prelucrarea în instalația LF, etc.

Pentru atenuarea deficiențelor cu privire la reglarea temperaturii în cristalizor, este necesară adoptarea unei metode eficiente de evacuare a căldurii din oțelul în curs de solidificare. O astfel de metodă constă în introducerea în oțel a microrăcitorilor.

Procesul de cristalizare a oțelului cu germeni exogeni introduși prin intermediul acestora diferă substanțial de cel al oțelurilor turnate continuu fără

6.1.Cercetări cu privire la îmbunătățirea structurii semifabricatelor 103
turnate continuu

adaos de microrăcitori. În calitate de microrăcitori se utilizează de obicei pulberi metalice de aceeași compoziție chimică cu a oțelului care se toarnă și sunt introduse în cantități de 0.5-2 %. Din analiza literaturii de specialitate cu privire la adaosul de microrăcitori sub formă de pilitură de oțel la turnarea continuă s-a stabilit faptul că o cantitate de pulbere metalică de 1% determină o scădere a temperaturii oțelului cu circa 18 °C.

În cadrul temei propuse pentru experimentările industriale s-au utilizat ca și microrăcitori pilitura de oțel cu granulație cuprinsă în intervalul 0.074-0.5mm și granule de oțel cu dimensiuni sub 1mm. Având în vedere faptul că producerea pulberilor metalice necesită instalații performante și de asemenea au un cost foarte ridicat, experimentările industriale s-au axat pe utilizarea de microrăcitori sub formă de granule obținuți prin tăiere de sârmă laminată de aceeași marcă cu oțelul turnat sau marca apropiată, având diametrul sub 1mm.

Particulele metalice, care joacă rol de microrăcitori, trebuie să îndeplinescă o serie de condiții: să aibă o puritate ridicată în ceea ce privește conținutul de incluziuni oxidice (cantitatea de oxigen sub 0.5%), să nu aibă suprafața oxidată, să aibă o anumită compoziție granulometrică, umiditatea nu trebuie să fie mai mare de 0.25%, formă sferică sau apropiată, densitate mare în vrac și cost relativ mic cu cel al oțelului. Granulele se găsesc astfel o perioadă de timp în suspensie în topitura de oțel lichid și pot provoca la răcirea și solidificarea oțelului mai multe efecte: de răcire, de cristalizare, de aliere, de obținere a unor proprietăți fizico-chimice speciale, etc.

Din punct de vedere al efectului de răcire, microrăcitorii pot determina patru tipuri de solidificare a oțelului:

I – în acest caz granulele de microrăcitori se topesc înainte de începerea solidificării oțelului, de asemenea dispar și microgrupările atomilor elementelor din microrăcitori (prin difuzie); aceștia acumulând parțial sau total căldura de supraîncălzire, corespunzătoare gradientului de supraîncălzire $\Delta T = (0,01 - 0,11) \cdot T_{top}$;

II – microrăcitorii se topesc, însă microgrupările atomilor se mențin până la începutul cristalizării oțelului caz în care ei joacă rolul și de germeni exogeni;

III – microrăcitorii se topesc până la sfârșitul solidificării oțelului, aceștia acumulează și căldura latentă de cristalizare, determină cristalizarea și solidificarea în volum a oțelului respectiv schimbă direcția fluxului de căldură, în sensul că fluxul exterior nu coincide cu direcția cu fluxul interior la nivelul fiecărui microvolum;

IV - microrăcitorii nu se topesc deloc sau numai parțial până la sfârșitul solidificării oțelului, și deci apar suprafețele de separație între aceștia și masa de oțel, obținându-se piese compozite, iar microrăcitorii apar ca și componente de sine stătătoare în peretele piesei din oțel.

Efectul maxim se obține în cazul tipului III de solidificare, când microrăcitorii se topesc în întregime timp în care acumulează căldura de supraîncălzire a oțelului.

La solidificarea de tip I, în topitura metalică se realizează o uniformizare rapidă a temperaturii, iar la solidificarea de tip II și III, în intervalul de temperatură lichidus-solidus, se mențin microvolume, care se deosebesc din punct de vedere al temperaturii și compoziției aliajului de bază; pe curbele de temperatură apar vârfuri cauzate de degajarea neuniformă a căldurii latente de topire. Apar microvolume cu densități și vâscozități diferite, care influențează substanțial curenții de convecție (la solidificarea de tip I aceștia dispar repede, la solidificarea de tip II și III se mențin).

În prezența microrăcitorilor netopiți, solidificarea oțelului suferă schimbări radicale: capătă un caracter volumic succesiv, frontal, de solidificare, fiind fragmentat și multiplicat la nivelul numărului granulelor inoculate, astfel suprafața

de răcire crește foarte mult, de asemenea segregăția zonală directă și indirectă este brusc frânată, datorită micșorării posibilității de transfer de masă prin spațiile dintre microfronturile de solidificare respectiv formarea retasurii în general și a celei concentrate în special este de asemenea frânată, datorită micșorării valorii contracției oțelului în stare lichidă și contracției la solidificare.[29]

Microrăcitorii se utilizează și pentru armarea lingourilor și pieselor. În acest caz se realizează un proces de solidificare de tip IV, când microrăcitorii nu se topesc sau se topesc numai parțial. În acest caz particulele sunt denumite și macrorăcitori, cantitatea acestora din urmă ajungând până la 50% din masa lingoului rezultând nu piese monolit, ci piese armate (compozite). Pentru aceste scopuri pot fi folosite, în calitate de macrorăcitori particule cu dimensiuni mari, de exemplu bile de rulmenți cu diametrul cuprins între 5 – 60 mm, în funcție de masa lingoului, alice, bucăți de sârmă, etc.

Una din sarcinile principale ale turnării continue actuale este îmbunătățirea calității oțelului turnat continuu. Pentru realizarea acestui deziderat trebuie să se acorde o atenție deosebită măsurilor de scădere a segregăției zonale și dendritice, de reducere a formării fisurilor și de creștere a densității părții centrale a semifabricatului turnat continuu.

Pentru a asigura condițiile de solidificare impuse de compoziția chimică a oțelului trebuie sincronizați un număr mare de factori tehnologici, cei mai importanți fiind: compoziția chimică a oțelului, temperatura de turnare și viteza de tragere.

Principala metodă pentru reducerea supraîncălzirii oțelului în cristalizor constă în introducerea de răcitori consumabili, care pot fi exteriori (pregătiți în afara sistemului și introduși în cristalizor) și interiori (constituiți din cruste de oțel, formate nemijlocit în miezul semifabricatului, pe suprafețe răcite cu apă). [43]

Răcitorii exteriori sunt introduși în oțelul lichid sub diferite forme: alice, granule sau particule sub formă de bandă, tije, sârmă, tub cu umplutură formată din pulbere metalică.

Utilizarea microrăcitorilor în cristalizor conduce la creșterea zonei cristalelor echiaxe, scăderea gradului de supraîncălzire și reducerea porozității axiale.

6.2. Obținerea microrăcitorilor

Pentru obținerea materialelor în vederea efectuării experimentărilor industriale s-a optat pentru utilizarea de microrăcitori sub formă de granule realizate din sârmă laminată, cu compoziția chimică apropiată cu a oțelului turnat continuu.

Sârma cu diametru de 3mm se debitează la lungimi de 2-3 mm. În prealabil sârma este supusă curățirii de oxizi, ea trebuie să fie curată.

După debitare granulele obținute sunt cântărite și ambalate în vederea transportului la unitatea industrială unde au loc experimentările. În fazele următoare se vor extinde clasele granulometrice ale microrăcitorilor pentru realizarea experimentărilor industriale. În funcție de rezultatele obținute în această fază se va opta pentru utilizarea de microrăcitori cu dimensiuni cuprinse în limitele 1-3mm și chiar sub 1mm.

6.3. Pregătirea microrăcitorilor pe caracteristici calitative

Microrăcitorii utilizați în vederea reglării temperaturii în cristalizorul

instalației de turnare continuă a oțelului respectiv pentru dirijarea procesului de solidificare trebuie să îndeplinească o serie de condiții, și anume:

- să aibă o puritate ridicată în ceea ce privește conținutul de incluziuni oxidice;

- umiditatea microrăcitorilor trebuie să fie de maxim 0,25%;

- să nu aibă suprafața oxidată;

- să aibă o anumită compoziție granulometrică.

În calitate de microrăcitori pentru realizarea experimentărilor industriale se vor utiliza granule obținute din sârmă laminată cu diametrul de 3mm, debitată la lungimi de 2-3mm și având compoziția chimică apropiată de a oțelului turnat.

Sârma trebuie curățată de oxizi în prealabil și supusă operației de tăiere. După tăiere granulele obținute se ambalează în pungi de hârtie și se transportă la secția industrială a uzinei în cadrul căreia vor avea loc experimentările industriale.

Am optat pentru experimentările industriale pentru un adaos de microrăcitori de 1% respectiv 2% din cantitatea de oțel turnată.

Adaosul specific de microrăcitori (kg/t) pentru fiecare din variantele de lucru este de 10kg/t respectiv 20kg/t, deci vom experimenta 2 variante de lucru. Adaosurile specifice de microrăcitori s-au stabilit pe baza rezultatelor obținute în urma simulării, precum și a concluziilor obținute de colectivul de cercetare în urma experimentărilor industriale efectuate pentru cazul dirijării solidificării lingourilor de oțel cu ajutorul microrăcitorilor

Este cunoscut în literatura de specialitate că introducerea de inoculatori, modificatori și de centrii de cristalizare contribuie la creșterea rapidă a cristalelor echiace 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 structura echiaxială este influențată de prezența în oțelul lichid a particulelor suplimentare de cristalizare și de intensitatea evacuării căldurii din această zonă.[37]

Depunerea particulelor înaintea frontului de cristalizare are loc din cauza diferenței între viteza de difuzie și viteza de avansare a frontului de cristalizare. Structura semifabricatului se determină prin compoziția chimică a oțelului, prin gradientul de temperatură la frontul de cristalizare respectiv prin viteza de înaintare a acestui front și prin prezența centrilor suplimentari de cristalizare în volumul oțelului lichid.

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 microrăcitori s-a dorit crearea unui număr foarte mare de centrii de cristalizare, având drept suport afirmația academicianului rus Eftimov, care a afirmat 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.

Cercetările și experimentările caută să verifice efectele subrăcirii zonei centrale a semifabricatului de oțel în timpul turnării utilizând microrăcitori, în următoarele ipoteze:

- prin introducerea microrăcitorilor iau naștere suprafețe noi de germinare care produc o îmbunătățire a structurii macro și microscopică a semifabricatului turnat;

- între grăunțele cristaline a semifabricatului turnat și caracteristicile mecanice există o legătură sensibilă;
- semifabricatele obținute în cadrul experimentărilor prezintă o creștere și o omogenitate semnificativă a proprietăților mecanice față de semifabricatele obținute prin metoda clasică, drept răspuns a modificării structurii.

Stimularea germinației eterogene produce o creștere semnificativă a caracteristicilor mecanice concomitent cu scăderea valorii diametrului grăunțelii reale, finisarea grăunțelii cristaline 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.

S-a întocmit un model matematic, respectiv un program de simulare a oțelului turnat continuu cu adaos de microrăcitori în cristalizor, utilizând metoda diferențelor finite. Pentru această s-a considerat o secțiune a cristalizorului, care este împărțită cu o rețea de discretizare.

Programul de calcul este realizat în limbajul C++ și funcționează sub platforme Win32, adică Windows 95, 98, Me, NT4, 200, XP – cu procesor Intel.

Pentru interfața grafică programul folosește Microsoft Foundation Classes, o bibliotecă de clase care încapsulează funcționalitatea interfeței standard de programare Windows a specificației – Application Program Interface.

Graficele tridimensionale sunt realizate cu implementarea Windows a specificației Open Graphics Library.

6.4. Întocmirea modelului matematic

Modelarea matematică a fenomenului de solidificare și răcire a semifabricatelor turnate continuu, prezentată în continuare, se bazează pe descrierea matematică a acestui fenomen. Soluția acestei probleme este de fapt soluționarea ecuației transmiterii căldurii în regim nestaționar.

Pentru a defini transmiterea de căldură între semifabricat și cristalizor este necesară cunoașterea condițiilor inițiale, legea de variație a fluxului de căldură semifabricat-cristalizor, a fluxului de căldură cristalizor-apă de răcire. Unele condiții se pot ușor schematiza, altele însă conduc la sisteme de ecuații care nu au putut fi soluționate pe cale analitică.

6.4.1. Modelarea prin metoda diferențelor finite

Această metodă se bazează pe transformarea ecuației diferențiale a transmiterii căldurii în ecuații cu diferențe finite.

Ecuația diferențială a transmiterii căldurii după cele trei axe are forma:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (6.1)$$

unde:

- T este temperatura, [°C] ;
- τ – timpul, [s];
- a – difuzivitatea termică, [m²/s];
- x, y, z – coordonate spațiale.

Dacă se neglijează transmiterea de căldură pe verticală, relația devine:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (6.2)$$

Având în vedere dependența conductibilității termice λ de temperatură se introduce o temperatură redusă care să includă această variație:

$$\Phi = \int_{T_0}^T \frac{\lambda}{\lambda_0} dT \quad (6.3)$$

unde λ și λ_0 sunt conductibilitățile termice la temperatura T și la o temperatură arbitrară T_0 . Astfel:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = a(\Phi) \cdot \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot \frac{\rho \cdot c}{\lambda} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \quad (6.5)$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \cdot \frac{\partial H}{\partial T} \cdot \frac{\rho}{\lambda} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} = \frac{\lambda_0}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \right) \quad (6.7)$$

Ultima relație este avantajoasă pentru că face posibil calculul direct al conținutului de căldură (entalpia H), care include în faza lichidă și căldura latentă. S-au folosit relațiile pentru difuzivitatea termică $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$ și căldura specifică

$$c = \frac{\partial H}{\partial \tau}.$$

Pentru a transforma relația (6.7) într-o ecuație cu diferențe finite se exprimă temperatura unui punct (i, j) în funcție de temperatura punctelor vecine. Se consideră pentru început cazul din figura 6.1 adică un punct din interior.

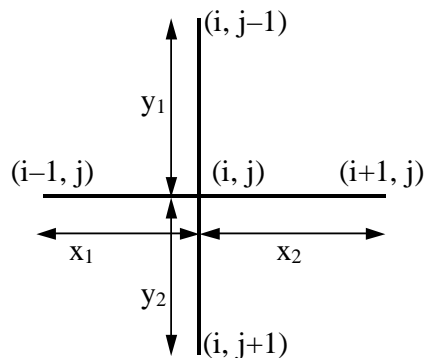


Figura 6.1. Nod în interiorul semifabricatului

Valorile $i-1$, i , $i+1$ se referă la axa X ; $j-1$, j , $j+1$ la axa Y , iar k și $k+1$ la succesiunea în timp. Dacă se dezvoltă funcția $\Phi = f(x, y)$ în serie Taylor față de x și se neglijează termenii superiori, începând cu ordinul trei, se obține:

$$\Phi_{i-1,j,k} = \Phi_{i,j,k} - \frac{x_1}{1!} \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} + \frac{x_1^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (6.8)$$

și

$$\Phi_{i+1,j,k} = \Phi_{i,j,k} + \frac{x_2}{1!} \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} + \frac{x_2^2}{2!} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (6.9)$$

de unde rezultă:

$$x_2 \Phi_{i-1,j,k} + x_1 \Phi_{i+1,j,k} = (x_1 + x_2) \Phi_{i,j,k} + \frac{x_2 x_1^2 + x_1 x_2^2}{2} \cdot \frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} = \frac{2}{x_1 x_2 (x_1 + x_2)} \cdot [x_2 \Phi_{i-1,j,k} + x_1 \Phi_{i+1,j,k} - (x_1 + x_2) \Phi_{i,j,k}] \quad (6.11)$$

Pentru axa y se procedează identic și se obține:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial y^2} = \frac{2}{y_1 y_2 (y_1 + y_2)} \cdot [y_2 \Phi_{i,j-1,k} + y_1 \Phi_{i,j+1,k} - (y_1 + y_2) \Phi_{i,j,k}] \quad (6.12)$$

Variația de entalpie se exprimă sub formă de diferență finită:

$$\frac{\partial H}{\partial \tau} \cong \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} \quad (6.13)$$

Dacă se introduc relațiile (6.11), (6.12) și (6.13) în (6.7) se

obține:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot x_1 x_2 (x_1 + x_2)} \cdot [x_2 \Phi_{i-1,j,k} + x_1 \Phi_{i+1,j,k} - (x_1 + x_2) \Phi_{i,j,k}] + \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot y_1 y_2 (y_1 + y_2)} \cdot [y_2 \Phi_{i,j-1,k} + y_1 \Phi_{i,j+1,k} - (y_1 + y_2) \Phi_{i,j,k}] \quad (6.14)$$

În cazul în care distribuția punctelor de discretizare este omogenă de-a lungul celor două axe (caz frecvent utilizat) și notând $x_1 = x_2 = x$, $y_1 = y_2 = y$ se

obține:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}] \quad (6.15)$$

Ecuatia cu diferențe finite face posibilă determinarea variației de entalpie într-un interval de timp $\tau_{k+1} - \tau_k$, în funcție de temperatura punctelor vecine. Dacă se cunoaște distribuția inițială de temperaturi $\Phi_{i,j,0}$ (sau entalpii $H_{i,j,0}$) se poate determina pe baza relației (6.14) sau (6.15) distribuția de temperaturi după un interval dat, rezultând $\Phi_{i,j,1}$. Pe baza acestui rezultat se poate determina distribuția de temperaturi $\Phi_{i,j,2}$ etc. Deci, printr-o metodă iterativă se poate determina evoluția distribuției de temperaturi în cursul răcirii, solidificării semifabricatului.

Ecuatia (6.14) este valabilă pentru un punct din interior. Pentru un punct situat pe o suprafață limită, aceasta însă se modifică. Pentru punctele de pe suprafața de separație se scrie ecuația fluxului de căldură la suprafață:

$$W = -\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x} \quad (6.16)$$

unde $\Phi_{i,j,k}$ este temperatura la suprafață (limita considerată paralelă cu axa Y).

Expresia $\lambda \cdot \frac{\partial \Phi_{i,j,k}}{\partial x}$ se poate scrie sub formă de diferență finită în funcție de o temperatură $\Phi_{i+1,j,k}$ a unui punct imaginar situat la distanța $x = x_1$ (pentru simplificare) de suprafață. Fluxul de căldură prin suprafață trebuie să fie:

$$W = \frac{\lambda_0}{2x} \cdot (\Phi_{i-1,j,k} - \Phi_{i+1,j,k}) \quad (6.17)$$

de unde:

$$\Phi_{i+1,j,k} = \Phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} \cdot W \quad (6.18)$$

Relația (6.11) devine:

$$\frac{\partial^2 \Phi_{i,j,k}}{\partial x^2} = \frac{2}{x^2} \cdot \left[\Phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] \quad (6.19)$$

Iar, (6.14)

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{2\lambda_0}{\rho x^2} \cdot \left[\Phi_{i-1,j,k} - \frac{x}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] + \\ &\frac{2\lambda_0}{\rho \cdot \gamma_1 \gamma_2 (\gamma_1 + \gamma_2)} \cdot \left[\gamma_2 \Phi_{i,j-1,k} + \gamma_1 \Phi_{i,j+1,k} - (\gamma_1 + \gamma_2) \Phi_{i,j,k} \right] \end{aligned} \quad (6.20)$$

Pentru o suprafață paralelă cu axa X se obține (în mod identic):

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{2\lambda_0}{\rho \cdot x_1 x_2 (x_1 + x_2)} \cdot \left[x_2 \Phi_{i-1,j,k} + x_1 \Phi_{i+1,j,k} - (x_1 + x_2) \Phi_{i,j,k} \right] + \\ &\frac{2\lambda_0}{\rho \cdot \gamma^2} \cdot \left[\Phi_{i,j-1,k} - \frac{y}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] \end{aligned} \quad (6.21)$$

Pentru un punct de colț rezultă relația:

$$\begin{aligned} \frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} &= \frac{2\lambda_0}{\rho x^2} \cdot \left[\Phi_{i-1,j,k} - \frac{x}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] + \\ &\frac{2\lambda_0}{\rho \cdot \gamma^2} \cdot \left[\Phi_{i,j-1,k} - \frac{y}{\lambda_0} W - \Phi_{i,j,k} \right] \end{aligned} \quad (6.22)$$

6.4.2. Criteriul de stabilitate a ecuațiilor cu diferențe finite

Una din problemele critice ale aplicării prin iterație a ecuației cu diferențe finite este asigurarea stabilității și acurateții soluției în cursul integrării.

Pentru a asigura stabilitatea soluției, adică pentru a împiedica oscilația soluției în cursul integrării, intervalul de timp între iterații și dimensiunile rețelei trebuie ales în conformitate cu criteriile de stabilitate deduse. Acuratețea soluției, adică concordanța cât mai bună cu soluția analitică este de asemenea de dorit. Aceasta depinde de forma ecuației cu diferențe finite și de desimea rețelei.

În concluzie, desimea rețelei se stabilește pornind de la necesitatea găsirii unei rezolvări a următoarei contradicții: pe de o parte folosirea unei rețele mai dese

mărește precizia modelului (eroarea introdusă prin ipoteza că suprafața adiacentă fiecărui nod are aceeași temperatură cu a nodului scade odată cu aria nodului rețelei); pe de altă parte o rețea deasă mărește durata de efectuare a calculului atât datorită creșterii numărului de noduri, cât și reducerii intervalelor de timp între iterații dictate de condițiile de stabilitate a soluției.

Din analiza stabilității ecuației cu diferențe finite se deduc următoarele criterii:

$$\text{- în interior} \quad \Delta\tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[\frac{1}{x_1 x_2} + \frac{1}{y_1 y_2} \right]} \quad (6.23)$$

$$\text{- pe margine} \quad \Delta\tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[\frac{1}{x_1 x_2} + \frac{1}{y^2} + \frac{W}{\lambda \cdot y} \right]} \quad (6.24)$$

$$\text{- pe colț} \quad \Delta\tau \leq \frac{1}{2a \cdot \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{y^2} + \frac{W}{\lambda \cdot x} + \frac{W}{\lambda \cdot y} \right]} \quad (6.25)$$

Intervalul de timp ales reprezintă de fapt timpul în care procesul nestaționar al transmiterii căldurii este aproximat cu un proces staționar. Din această cauză, cu cât caracteristicile procesului real se abat mai puternic de la cele ale unui proces staționar, cu atât trebuie să fie mai mică durata iterației.

În relațiile (6.14), (6.15), (6.20), (6.21), (6.22) se observă că termenul drept depinde numai de mărimi cunoscute la momentul iterației k . Dacă notăm aceste expresii cu $G_{i,j,k}$ se obține:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = G_{i,j,k} \quad (6.26)$$

Mărimea $G_{i,j,k}$ reprezintă de fapt viteza de variație a entalpiei punctului (i, j) în procesul considerat staționar care începe la momentul τ_k . Cu cât această mărime este mai mare în valoare absolută, cu atât procesul este mai nestaționar, iar intervalul de timp trebuie ales mai mic.

Soluția optimă constă în folosirea unui interval de timp variabil și limitarea variației entalpiei la o valoare fixată ΔH_{\max} , adică:

$$\Delta\tau_k = \tau_{k+1} - \tau_k = \frac{\Delta H_{\max}}{\max_{(i,j) \in D} |G_{i,j,k}|} \quad (6.27)$$

unde D este domeniul valorilor (i, j) .

Astfel se obține un interval de timp mic atunci când variația entalpiei este mare (la turnare) și un interval mare atunci când aproximarea cu un proces staționar este mai bună.

6.4.3. Modelul bidimensional al solidificării și răcirii semifabricatului

În vederea realizării modelării matematice bidimensionale a unui semifabricat se consideră o secțiune a ansamblului semifabricat-cristalizor care se

împarte cu ajutorul unei rețele de discretizare (figura 6.2).

Temperatura în fiecare nod reprezintă temperatura medie a suprafeței adiacente nodului, în aceste noduri se scriu ecuațiile cu diferențe finite prezentate anterior. Modelul se realizează pe baza următoarelor ipoteze simplificatoare:

1. Se neglijează transmiterea căldurii pe axa longitudinală, considerând că ea are loc doar în secțiunea orizontală a semifabricatului.
2. Se neglijează variația de densitate
3. Secțiunea cristalizorului se consideră a fi o secțiune echivalentă dreptunghiulară.
4. Se consideră că cristalizorul pierde căldură în mod uniform de pe toate suprafețele.
5. Se consideră că în momentul zero temperatura masei de oțel topit este uniformă, iar temperatura microrăcitorilor este cea a mediului ambiant.
6. Conductibilitatea termică a stratului de zgură de pe suprafața firului este considerată constantă.
7. Degajarea căldurii latente de topire se face în intervalul lichidus–solidus proporțional cu temperatura.
8. Conductibilitatea termică a materialului cristalizorului este considerată constantă.

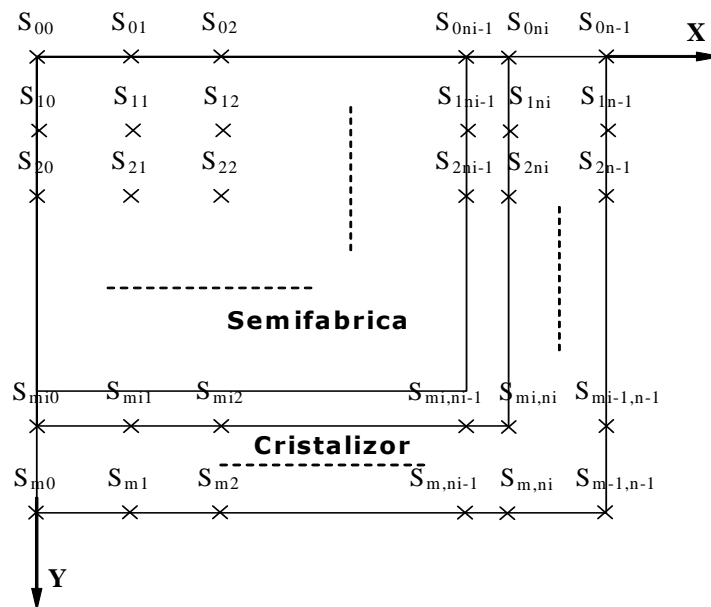


Figura 6.2. Schema rețelei utilizate la aplicarea metodei diferențelor finite

Ca urmare a ipotezelor considerate, ansamblul semifabricat-cristalizor este simetric față de axa longitudinală a semifabricatului. Sistemul de axe va avea originea în centrul semifabricatului, iar calculele se vor efectua numai pentru x și y pozitivi.

Fluxul de căldură transmis apei de răcire în zona primară și secundară de răcire se calculează cu relațiile:

$$W = K \cdot (T_M - T_A)^{1,25} \quad (6.28)$$

$$W = K \cdot (T_S - T_A)^{1,25} \quad (6.29)$$

unde:

- T_S este temperatura absolută a suprafeței semifabricat, [K];
- T_M - temperatura absolută a suprafeței interioare a cristalizorului, [K];
- T_A - temperatura apei de răcire [K].
- K - constanta de convecție.

6.4.4. Desfășurarea calculelor și funcționarea programului

Pentru a implementa un algoritm care să urmeze modelul descris anterior, avem nevoie de următoarele date inițiale:

- Temperatura ambiantă.
- Temperatura de turnare.
- Temperatura inițială a cristalizorului.
- Dimensiunile semifabricatului și grosimea peretelui cristalizorului.
- Numărul nodurilor din semifabricat și cristalizor după cele două axe.
- Valorile conductibilității termice a oțelului și cuprului în funcție de temperatură.
- Valorile entalpiei oțelului și cuprului în funcție de temperatură. În cazul oțelului, această dependență funcțională trebuie să includă căldura latentă de topire.
- Constanta de convecție K (formulele 6.28 și 6.29).
- Condiția de evacuare a semifabricatului din instalație.
- Condiția de oprire a desfășurării algoritmului. Aceasta poate fi: oprire manuală, după un anumit timp, sau la o temperatură minimă, medie sau maximă a semifabricatului specificată.
- Maximul variației entalpiei la o iterație.
- Conținutul de microrăcitori administrați.
- Conductibilitatea termică a zgurii.
- Grosimea stratului de zgură.

Relația (6.14) permite calculul entalpiei unui nod în funcție de entalpia aceluiași nod la momentul precedent și temperaturile reduse ale nodului respectiv și a celor adiacente. Pentru a continua iterarea, avem nevoie să deducem temperatura din entalpie, apoi temperatura redusă din temperatură. La o iterație, avem nevoie de următoarele transformări $\dots \rightarrow \Phi \rightarrow H \rightarrow t \rightarrow \Phi \rightarrow \dots$

Pentru a efectua calculele, avem nevoie de dependențele funcționale $\lambda(t)$, $\Phi(t)$, $t(\Phi)$, $H(t)$ și $t(H)$. Acestea trebuie să fie suficient de precise, dar și să fie executate rapid de către calculator. De exemplu, dacă avem o rețea de 50x50 noduri și un număr de 150.000 iterații (situație obișnuită), aceste funcții vor fi calculate de 375.000.000 ori. Rezultă de aici că aceste funcții sunt critice din punct de vedere al timpului de execuție.

Graficele și tabelele următoare corespund mărcii de oțel S 295 JRG2.[42]

6.4.5. Conductibilitatea termică

Conductibilitatea termică a oțelului și cuprului 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 ($T_{cr} = 768 \text{ }^\circ\text{C}$, este temperatura punctului Curie), și o valoare constantă peste această temperatură.

Funcția are forma:

$$\lambda(T) = \begin{cases} a \cdot T^2 + b \cdot T + c, & T \leq T_{cr} \\ \lambda_{cr}, & T > T_{cr} \end{cases} \quad (6.30)$$

unde, pentru a asigura continuitatea funcției în punctul $T = T_{cr}$ se calculează λ_{cr} cu:

$$\lambda_{cr} = a \cdot T_{cr}^2 + b \cdot T_{cr} + c \quad (6.31)$$

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 6.1 se prezintă valorile experimentale și cele aproximate prin această metodă, iar în figura 6.3 aceleași date sub formă de grafic.

În figura 6.4. sunt prezentate dependența conductivității de temperatură rezultată în urma simulării unor condiții practice. Se poate observa similitudinea celor două grafice, atât în ce privește forma curbei cât și valorile variabilelor.

Tabelul 6.1. Valorile experimentale și cele aproximative

T [°C]	λ [W/m°C] experimental	λ [W/m°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

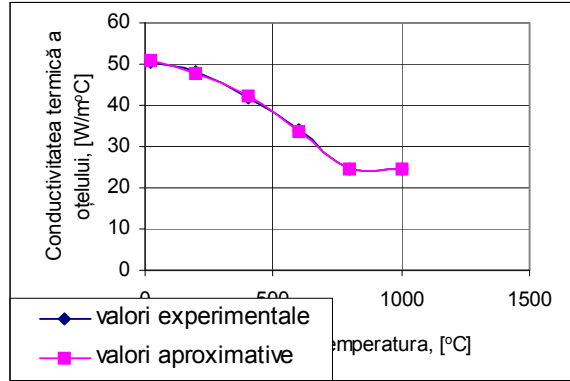


Figura 6.3. Dependenta $\lambda(T)$, valori experimentale (punctele) și aproximative

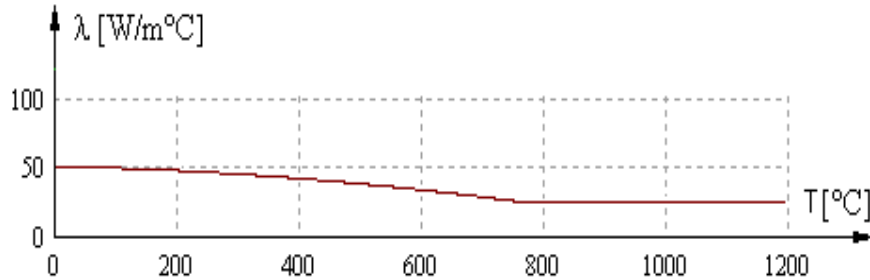


Figura 6.4. Dependenta $\lambda(T)$, rezultată din simulare

6.4.6. Temperatura redusă

Faptul că $\lambda(T)$ are forma dată de (6.30) ușurează mult calculul integralei

$$\phi(T) = \int_{T_0}^T \frac{\lambda}{\lambda_0} dT \quad (6.32)$$

deoarece se poate aplica o metodă analitică. 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 (6.32.) devine:

$$\phi(T) = \frac{1}{c} \cdot \int_{T_0}^T \lambda(T) dT = \begin{cases} \frac{a}{3c} T^3 + \frac{b}{2c} T^2 + T, & T \leq T_{cr} \\ \frac{a}{3c} T_{cr}^3 + \frac{b}{2c} T_{cr}^2 + T_{cr} + (T - T_{cr}) \frac{\lambda_{cr}}{c}, & T > T_{cr} \end{cases} \quad (6.33)$$

$$\text{sau: } \phi(t) = \begin{cases} t \left(\frac{a}{3c} t^2 + \frac{b}{2c} t + 1 \right), & t \leq t_{cr} \\ t \frac{\lambda_{cr}}{c} + t_{cr} \left(\frac{a}{3c} t_{cr}^2 + \frac{b}{2c} t_{cr} + 1 - \frac{\lambda_{cr}}{c} \right), & t > t_{cr} \end{cases} \quad (6.34)$$

6.4.7. Dependența entalpiei de temperatură

Dependența $H(T)$ este dată în literatură sub formă tabelară sau grafică, dar numai pentru temperaturi inferioare punctului solidus. Pentru a continua și peste aceasta avem nevoie de temperaturile solidus și lichidus, căldura latentă de topire a oțelului și căldura specifică a oțelului topit.

În tabelul 6.2 sunt date valorile pentru H în funcție de temperatură, ultimele 3 linii fiind calculate pe baza mărimilor enumerate mai sus. Funcțiile $H(T)$ și $T(H)$ se obțin prin interpolare liniară.

6.4.8. Relațiile de calcul utilizate în program

Din cauza utilizării simetriei centrale, apar situații în care unul (sau amândoi) din indicii i, j vor fi -1 . Aceasta se întâmplă atunci când se calculează un nod situat pe una din axele X, Y sau în origine. Astfel sunt încă trei cazuri distincte, chiar dacă rezolvarea lor este simplă:

$$\begin{aligned}\Phi_{-1,j,k} &= \Phi_{1,j,k} \\ \Phi_{i,-1,k} &= \Phi_{i,1,k} \\ \Phi_{-1,-1,k} &= \Phi_{1,1,k}\end{aligned}\quad (6.35)$$

Figura 6.5. prezintă funcția $H(T)$ sub formă grafică

Tabelul 6.2. Valorile entalpiei în funcție de temperatură

Nr.	T [°C]	H [kcal/kg]	H [kJ/kg]
0	100	11,2	46,88
1	200	22,6	94,59
2	300	36,2	151,52
3	400	49,9	208,86
4	500	64,3	269,13
5	600	82,0	343,21
6	700	101,0	422,74
7	800	130,8	547,46
8	900	148,1	619,87
9	1000	164,6	688,93
10	1100	181,7	760,51
11	1200	198,6	831,24
12	1300	207,5	868,49
13	1440	220,0	920,64
14	1500	284,0	1188,51
15	1600	310,6	1300,27

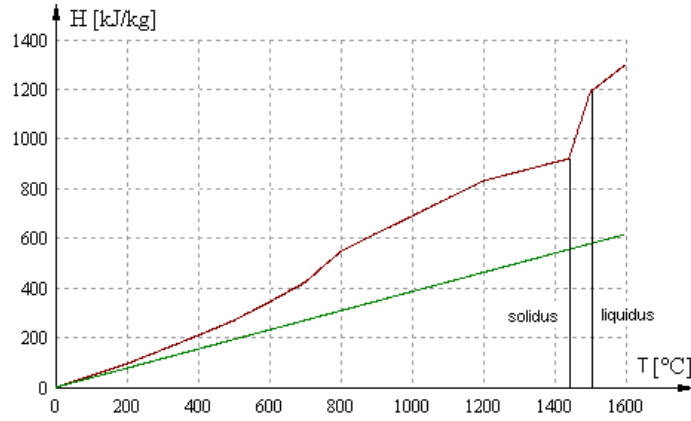


Figura 6.5. Dependența H(T)

În scopul simplificării calculelor, se utilizează rețele de discretizare cu noduri distribuite uniform de-a lungul axelor X și Y.

De asemenea se rescriu relațiile prezentate anterior pentru a reduce numărul cazurilor distincte.

Astfel:

1. Originea axelor ($i = j = 0$):

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [0 + 2\phi_{i+1,j,k} - 2\phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [0 + 2\phi_{i,j+1,k} - 2\phi_{i,j,k}] \quad (6.36)$$

2. Axa Y ($i = 0$):

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [0 + 2\phi_{i+1,j,k} - 2\phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\phi_{i,j-1,k} + \phi_{i,j+1,k} - 2\phi_{i,j,k}] \quad (6.37)$$

3. Axa X ($j = 0$):

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\phi_{i-1,j,k} + \phi_{i+1,j,k} - 2\phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [0 + 2\phi_{i,j+1,k} - 2\phi_{i,j,k}] \quad (6.38)$$

4. Interior:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\phi_{i-1,j,k} + \phi_{i+1,j,k} - 2\phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\phi_{i,j-1,k} + \phi_{i,j+1,k} - 2\phi_{i,j,k}] \quad (6.39)$$

5. Margine Y ($i = n-1$):

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot \left[2\Phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} W - 2\Phi_{i,j,k} \right] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [\Phi_{i,j-1,k} + \Phi_{i,j+1,k} - 2\Phi_{i,j,k}] \quad (6.40)$$

6. Margine X (j = m-1):

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [\Phi_{i-1,j,k} + \Phi_{i+1,j,k} - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[2\Phi_{i,j-1,k} - \frac{2y}{\lambda_0} W - 2\Phi_{i,j,k} \right] \quad (6.41)$$

7. Colț:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot \left[2\Phi_{i-1,j,k} - \frac{2x}{\lambda_0} W - 2\Phi_{i,j,k} \right] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot \left[2\Phi_{i,j-1,k} - \frac{2y}{\lambda_0} W - 2\Phi_{i,j,k} \right] \quad (6.42)$$

Se observă că toate relațiile de mai sus pot fi scrise sub forma:

$$\frac{H_{i,j,k+1} - H_{i,j,k}}{\tau_{k+1} - \tau_k} = \frac{\lambda_0}{\rho \cdot x^2} \cdot [A_x + B_x - 2\Phi_{i,j,k}] + \frac{\lambda_0}{\rho \cdot y^2} \cdot [A_y + B_y - 2\Phi_{i,j,k}] \quad (6.43)$$

unde:

$$A_x = \begin{cases} 0, & i = 0 \\ \Phi_{i-1,j,k}, & 0 < i < n-1 \\ 2\Phi_{i-1,j,k}, & i = n-1 \end{cases} \quad A_y = \begin{cases} 0, & j = 0 \\ \Phi_{i,j-1,k}, & 0 < j < m-1 \\ 2\Phi_{i,j-1,k}, & j = m-1 \end{cases} \quad (6.44)$$

$$B_x = \begin{cases} 2\Phi_{i+1,j,k}, & i = 0 \\ \Phi_{i+1,j,k}, & 0 < i < n-1 \\ -\frac{2x}{\lambda_0} W, & i = n-1 \end{cases} \quad B_y = \begin{cases} 2\Phi_{i,j+1,k}, & j = 0 \\ \Phi_{i,j+1,k}, & 0 < j < m-1 \\ -\frac{2y}{\lambda_0} W, & j = m-1 \end{cases} \quad (6.45)$$

Relațiile (6.43)–(6.45) sunt mult avantajoase față de (6.36)–(6.42), deoarece deciziile se iau numai pentru unul din indicii i, j și nu pentru amândoi. Aceasta conduce la o simplificare serioasă a algoritmului și la mărirea vitezei de execuție a programului.

6.5. Realizarea programului de solidificare a semifabricatelor turnate continuu

Programul de calcul este realizat în limbajul C++ și funcționează sub platforme Win32 (adică Windows 95, 98, Me, NT4, 2000, XP – cu procesor Intel). 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). Funcțiile C standard (cum sunt fopen() sau exit()), care nu sunt parte din Windows API necesită o altă bibliotecă: MSVCRT (Microsoft Visual C Runtime).(ANEXE)

Graficele tridimensionale sunt realizate cu implementarea Windows a specificației OpenGL (Open Graphics Library). Aceste biblioteci dinamice (MFC42.DLL, MSVCRT.DLL, OPENGL32.DLL și GLU32.DLL) sunt instalate implicit cu orice sistem de operare din cele menționate, cu excepția Windows 95 – unde trebuie instalate explicit [37].

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). Programul de față conține 28 astfel de module, însă numai 4 privesc în mod direct calculele. Celelalte sunt auxiliare acestora sau implementează grafice, ferestre, dialoguri etc.

Cele mai importante clase C++ implicate în procesul de simulare sunt:

- Material – conține descrierea unui material (oțel sau cupru). Această clasă implementează dependențele funcționale $\lambda(T)$, $\Phi(T)$, $T(\Phi)$ prin metode analitice și $H(T)$ și $T(H)$ prin interpolare liniară, așa cum s-a arătat în subcapitolele anterioare. Clasa dispune de metode pentru serializare (poate fi scrisă într-un fișier sau citită dintr-unul).

- HeatFlowCalculator – această clasă realizează calculele corespunzătoare unei singure iterații, conform relațiilor (6.41), (6.42) și (6.43). Constructorul acestei clase are ca argumente două referințe: una către clasa MetalDataFile (descrișă mai jos) care a creat-o și una către o altă instanță a HeatFlowCalculator 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 , Φ și H . Pentru a reduce la minim necesitatea conversiilor între T , Φ 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 MetalDataFile 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 liniară și se realizează mai întâi după axa X și apoi după Y. Contrar aparențelor, rezultatul nu este o suprafață plană ci un hiperboloid mărginit de patru segmente de dreaptă pe care le atinge.

Clasa MetalDataFile, 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.

- CProgressDialog - este o derivată a clasei MFC CDialog și implementează un dialog modal (care nu permite accesul la fereastra principală). Aceasta se deschide atunci când se pornește procesul de calcul - pe care îl controlează indirect - și se închide la terminarea calculului fie prin comandă manuală, fie la atingerea condiției de oprire (fig.6.6).

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 funcția calculate() a clasei MetalDataFile.

La rândul ei, aceasta apelează funcția callback() a clasei CProgressDialog 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 (se poate lucra bine în același timp cu altceva).

Temperaturile sunt indicate prin intermediul unui gradient de culoare, cu valorile: roșu pentru temperatura de turnare, albastru pentru temperatura ambiantă și verde pentru media lor.

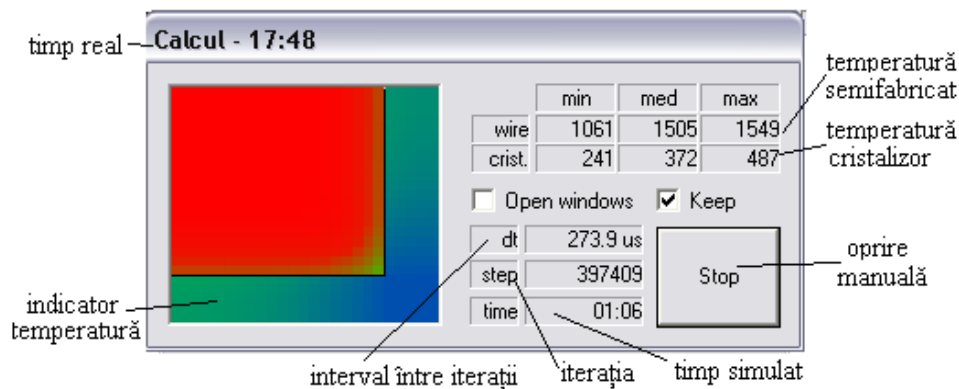


Figura 6.6. Fereastra de dialog pentru progresul calculului

Orice temperatură intermediară este o combinație a acestora.

MetalDataFile - 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 calculului 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 la momentul inițial și la striparea intervalului dintre iterații este de ordinul milisecundelor - ci numai dacă intervalul de la ultima salvare este de cel

puțin 5 secunde în timp simulat (timpul lingoului 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 MetalDataFile.

6.6. Simularea solidificării semifabricatelor turnate continuu cu adaos de microrăcitori în cristalizor

6.6.1. Realizarea simulării solidificării semifabricatelor turnate continuu cu adaos de microrăcitori în cristalizor

Pentru realizarea simulării solidificării semifabricatelor turnate continuu cu programul întocmit se utilizează caracteristicile mărcii de oțel S 235 JRG2, conform SR EN 10025 și anume:

- masa specifică (densitatea) $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$;
- temperatura solidus $T_{\text{sol}} = 1464 \text{ }^\circ\text{C}$;
- temperatura lichidus $T_{\text{lich}} = 1522 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 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 microrăcitori 1%, 2% și 3%;
- dependențele funcționale $\lambda(T)$, $\Phi(T)$ și $H(T)$ prezentate anterior.

Datele ambientale folosite sunt:

- temperatura mediului ambiant 20°C ;
- temperatura de turnare 1550°C ;
- constanta de convecție $K = 15$.

Simulările sunt realizate cu următoarele date:

- numărul nodurilor de discretizare pentru semifabricat 20×20 ;
- numărul nodurilor de discretizare pentru cristalizor 5×5 ;
- maximum variației entalpiei într-o iterație 10 J/kg .

Simularea s-a realizat pentru blmurile cu secțiune $240 \times 270 \text{ mm}$.

Programul permite o distribuție uniformă a microrăcitorilor, o distribuție aleatoare respectiv o distribuție aleatoare repetabilă.[39] Pentru realizarea simulării se deschide o interfața principală a programului prezentată în figura 6.7.

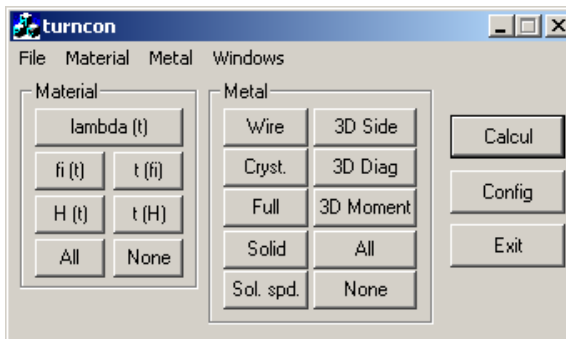


Figura 6.7. Interfața principală a programului

Datele stabilite sunt introduse în program prin intermediul unei ferestre de preluare a datelor, prezentată în figura 6.8.

Simularea solidificării semifabricatelor turnate continuu cu adaos uniform de microrăcitori în cristalizor se va efectua în trei variante: adaos de 1% și 2% microrăcitori. Trebuie specificat și faptul că simularea este realizată doar pentru răcirea primară și secundară și nu pentru întregul parcurs al firului în instalație. Astfel se explică valorile încă mari ale temperaturii oțelului din interiorul semifabricatului (straturile din mijloc) dar care scad până sub valoarea temperaturii solidus până la momentul în care semifabricatul este debitat. Cu cât numărul de noduri de discretizare este mai mare (atât pentru cristalizor cât și pentru semifabricat) și respectiv maximul variației entalpiei într-o iterație mai mic, cu atât timpul real de simulare este mai mare.

Rularea programului poate fi întreruptă în orice moment cu mențiunea că nu poate fi pornit din același moment de timp ci trebuie rulat programul de la început. Pentru o mai bună ilustrare a funcționării programului, am efectuat capturi ale ecranului la diferite momente de timp, din care se pot obține informații privind temperaturile din fir și cristalizor și timpul simulat până la momentul respectiv de timp real.

Parametru	Valoare	Unitate
Temperatura initiala a cristalizorului	20	°C
Temperatura de turnare	1600	°C
Dimensiunile firului	270 x 240	mm
Grosimea peretelui cristalizorului	50	mm
Nr. puncte de discretizare fir	20 x 20	-
Nr. puncte de discretizare cristalizor	5 x 5	-
Maximul variației entalpiei / iterație	100	J/kg
Viteza de turnare	800	mm/min
Înălțimea cristalizorului	900	mm
Înălțimea camerei de ceata	2000	mm
Putere disipată în cristalizor	2090	kW
Putere disipată la r. s.	2856	kW
Distributie microrăcitori	aleatoare repetabila	
Continut de microrăcitori	nici una uniforma aleatoare	
Factor de concentrare MR	aleatoare repetabila	

Figura 6.8. Fereastră de dialog pentru stabilirea datelor de rulare a programului

Astfel, în ceea ce urmează sunt prezentate ferestrele de dialog rezultate la 1-3s de la administrarea microrăcitorilor (figura 6.9) și la ieșirea din zona de răcire secundară (figura 6.10) pentru toate variantele simulate.

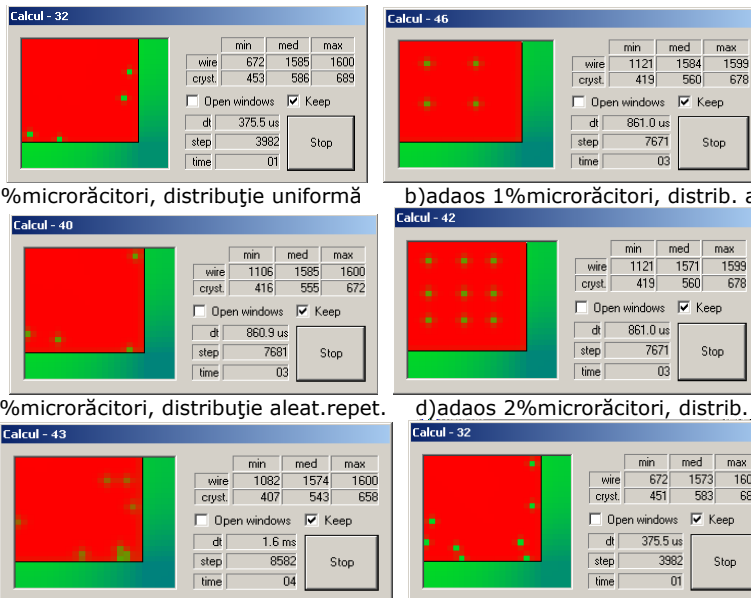
La oprirea procesului de simulare, programul prezintă opțiunea de afișare a variației parametrilor simulați în timp.

O primă dependență obținută o reprezintă variația temperaturii în semifabricat în funcție de timp (figura 6.11-6.16), distribuția punctelor discretizate este de asemenea prezentată.

Se remarcă scăderea lentă a temperaturii punctelor aflate spre centrul semifabricatului dar și modul de variație a temperaturii din straturile mai aproape de suprafața firului, se observă o scădere accentuată a temperaturilor în primele secunde ca urmare a adaosului de microrăcitori.

La un moment de timp, când are loc ieșirea suprafeței considerate din cristalizor are loc, în straturile superioare ale semifabricatului o creștere a temperaturii (cu 35-50°C în punctele 5 și 6 ale suprafeței).

Această creștere a temperaturii se datorează lipsei de răcire a firului imediat după ieșirea acestuia din cristalizor până în dreptul primului inel al răcirii secundare. După acest moment, răcirea și totodată solidificarea firului are loc normal, temperaturile înregistrate corespunzând cu cele prezentate.



a)adaos 1%microrăcitori, distribuție uniformă

b)adaos 1%microrăcitori, distrib. aleatoare

c)adaos 1%microrăcitori, distribuție aleat.repet.

d)adaos 2%microrăcitori, distrib. uniformă

e)adaos 2%microrăcitori, distribuție aleatoare

f)adaos 2%microrăcitori, distrib. aleat.repet.

Figura 6.9. Ferestrele de dialog

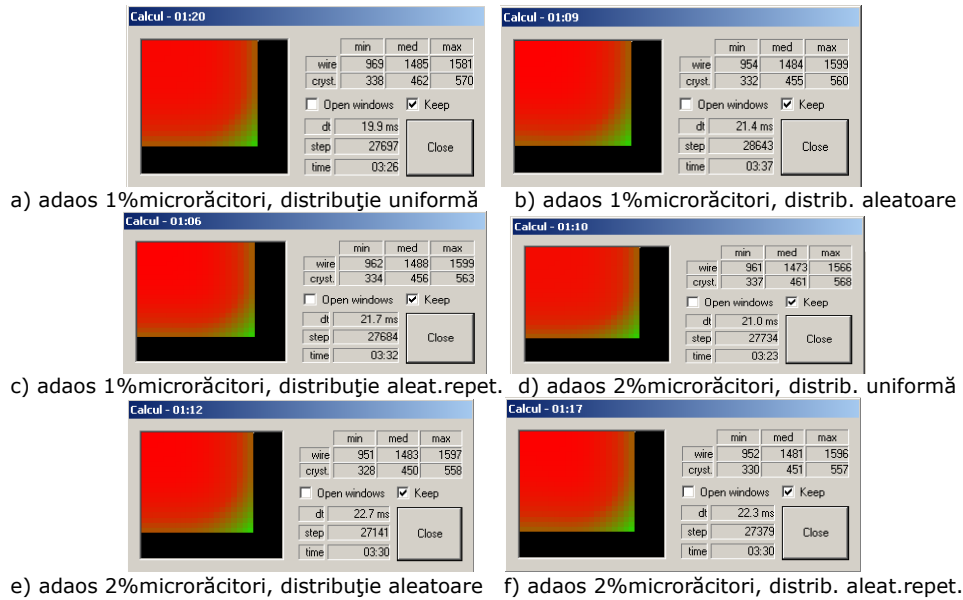


Figura 6.10. Ferestrele de dialog la sfârșitul rulării programului

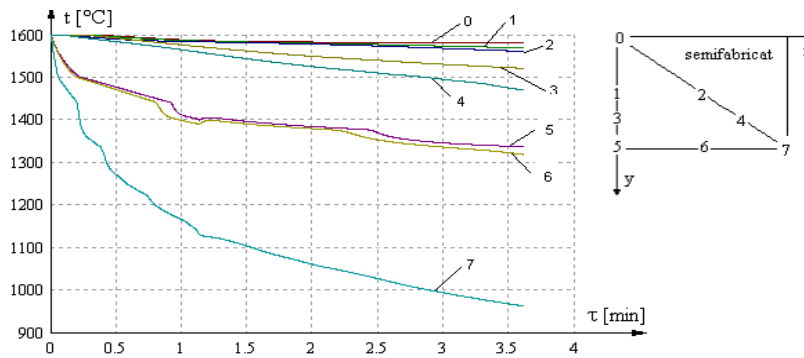


Figura 6.11. Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 1% adaos uniform de microrăcitori

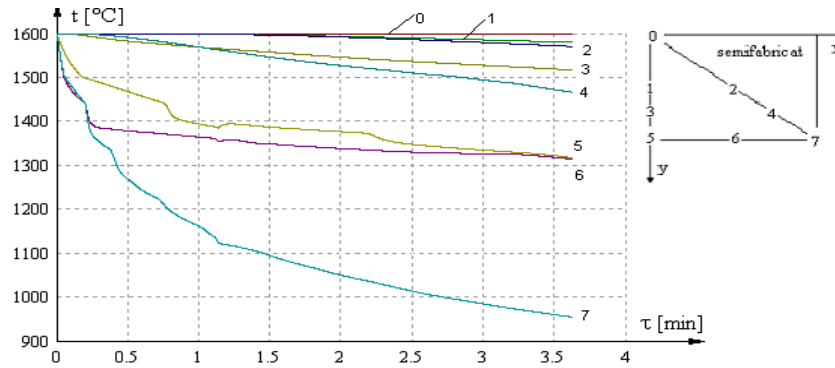


Figura 6.12. Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 1% adaos aleator de microrăcitori

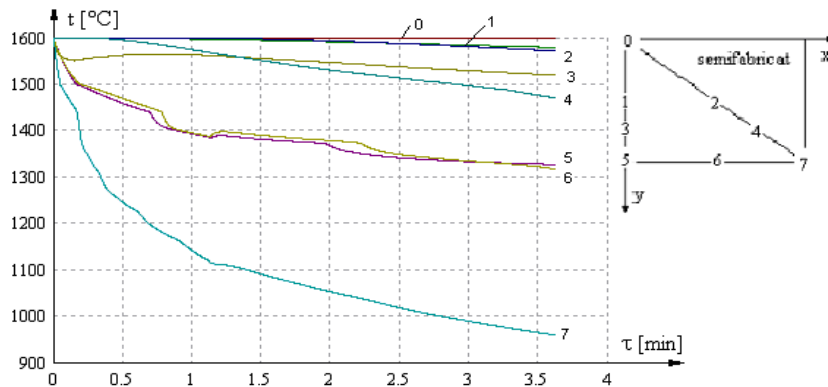


Figura 6.13. Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 1% adaos aleator repetat de microrăcitori

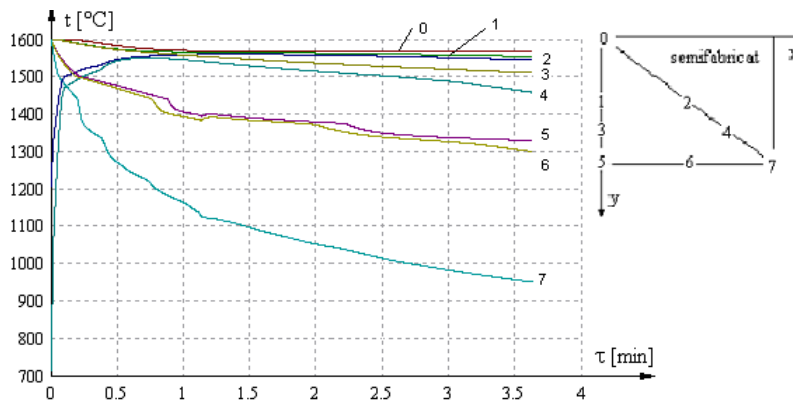


Figura 6.14. Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 2% adaos uniform de microrăcitori

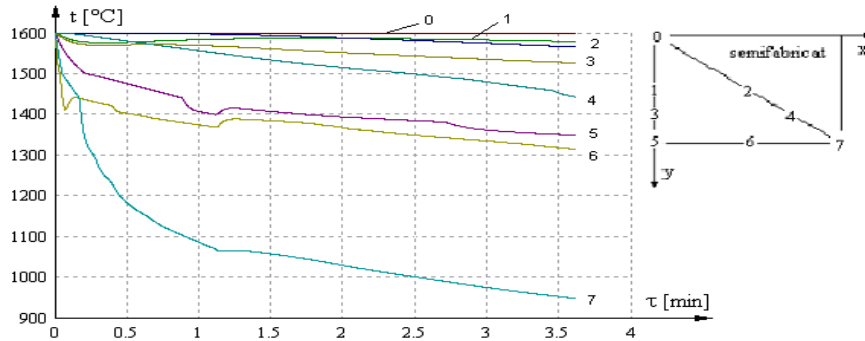


Figura 6.15. Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 2% adaos aleator de microrăcitori

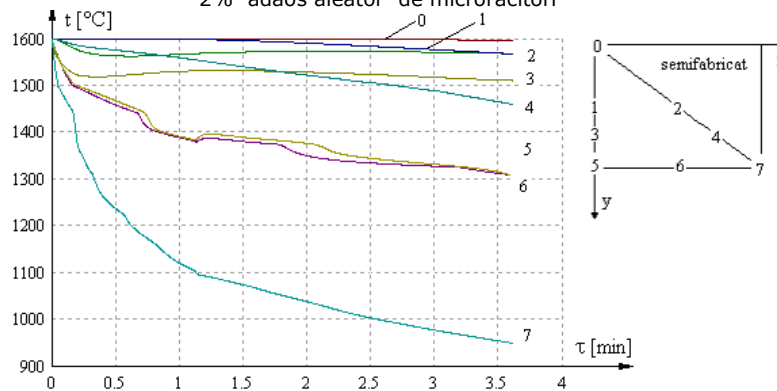


Figura 6.16. Variația temperaturilor în fir, în funcție de timp, 2% adaos aleator repetat de microrăcitori

În ceea ce privește distribuția temperaturilor în cristalizor (care preia căldura cedată de semifabricat și o cedează la rândul lui apei de răcire), acesta este prezentat în figura 6.17-6.22, și în acest caz se prezintă alături modul de amplasare a punctelor de discretizare.

Dacă la începutul turnării temperaturile din cristalizor (în punctele discretizate) au fost relativ ridicate: la 10s au variat între 400-650°C, acestea au scăzut treptat, pe măsură ce suprafața a înaintat în cristalizor, ajungând ca după 30s de la începutul turnării temperaturile din peretele interior al cristalizorului să varieze între 380-600°C, iar la ieșirea suprafeței din cristalizor să ajungă la 330-580°C (la 1,20min de la începutul turnării).

Acest moment este de altfel este marcat pe grafic prin scăderea bruscă a temperaturii tuturor punctelor discretizate. O imagine de ansamblu se poate obține din diagrama cumulată a temperaturilor, atât din fir cât și din peretele cristalizorului (figura 6.23.-6.24).

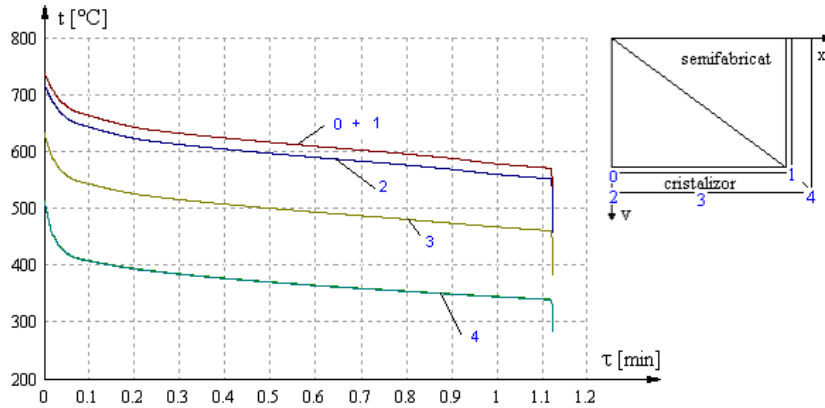


Figura 6.17. Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 1% adaos uniform de microrăcitori

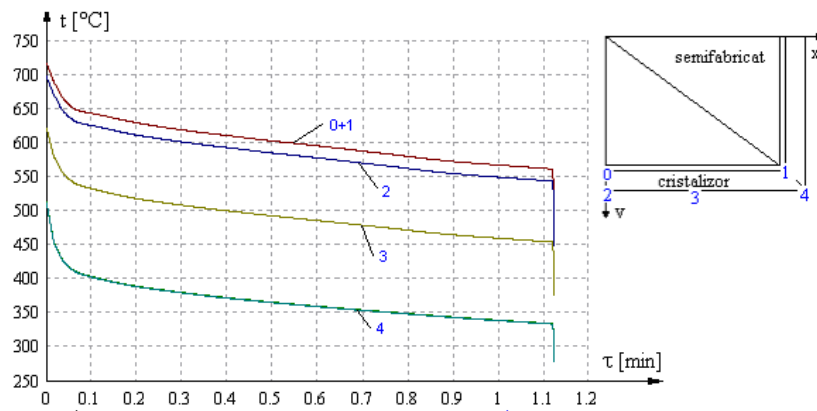


Figura 6.18. Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 1% adaos aleator de microrăcitori

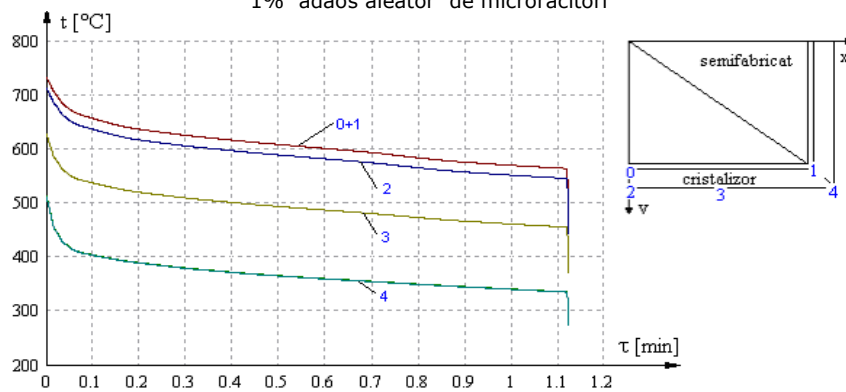


Figura 6.19. . Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 1% adaos aleator repetat de microrăcitori

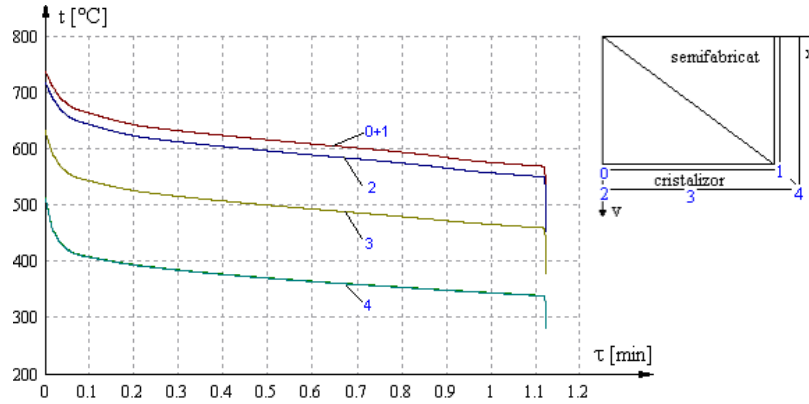


Figura 6.20. Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 2% adaos uniform de microrăcitori

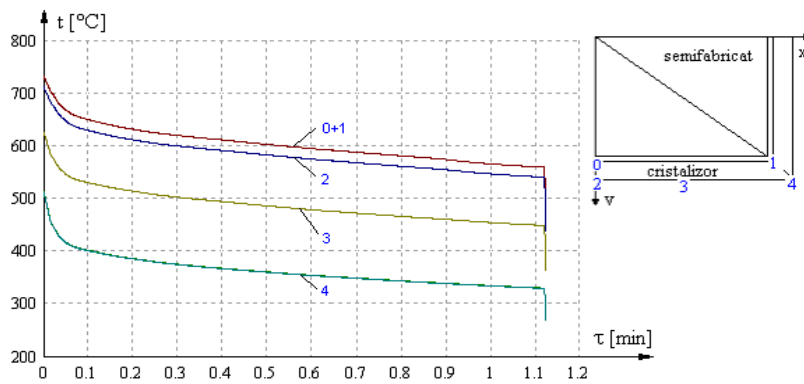


Figura 6.21. Variația temp. din cristalizor, în funcție de timp, 2% adaos aleator de microrăcitori

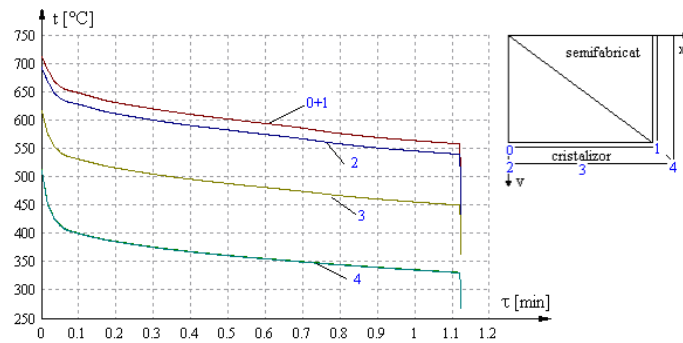


Figura 6.22. Variația temperaturii din cristalizor, în funcție de timp, 2% adaos aleator repetat de microrăcitori

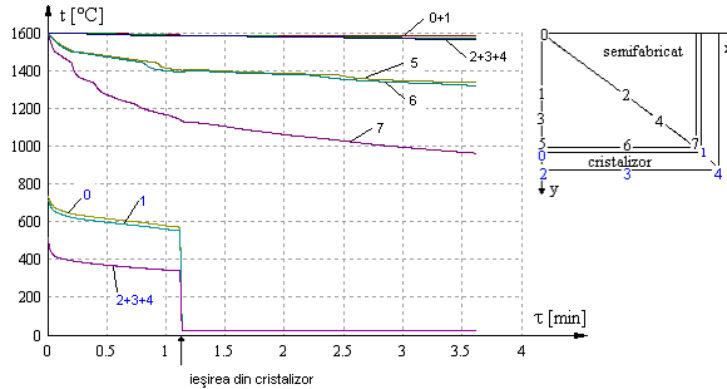


Figura 6.23. Variația temperaturii din fir și cristalizor, în funcție de timp, 1% adaos uniform de microrăcitori

Se disting astfel cele două zone de răcire, respectiv răcirea primară din cristalizor (când variază atât temperaturile din fir cât și cele din cristalizor) și răcirea secundară (când sunt figurate doar temperaturile din fir).

Cele două zone sunt delimitate de momentul ieșirii secțiunii considerate din cristalizor când temperaturile din fir cresc brusc iar cele din peretele cristalizorului scad.

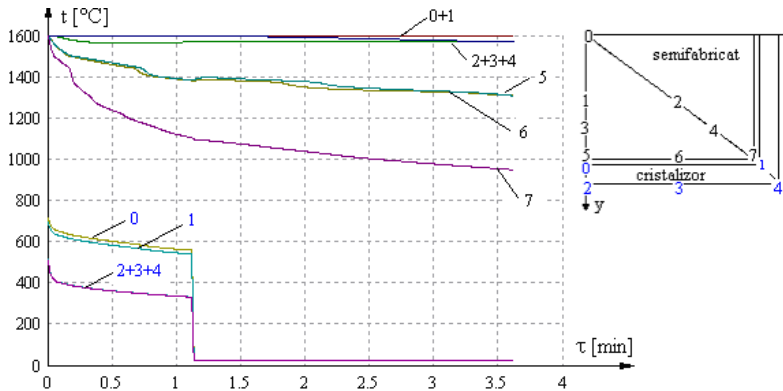


Figura 6.24. Variația temperaturii din fir și cristalizor, în funcție de timp, 2% adaos aleatoriu repetat de microrăcitori

Un alt tip de distribuție a temperaturilor din semifabricat este prezentată în figura 6.25-6.30. la 3s, 10s, 30s respectiv în momentul ieșirii secțiunii considerate din zona de răcire secundară.

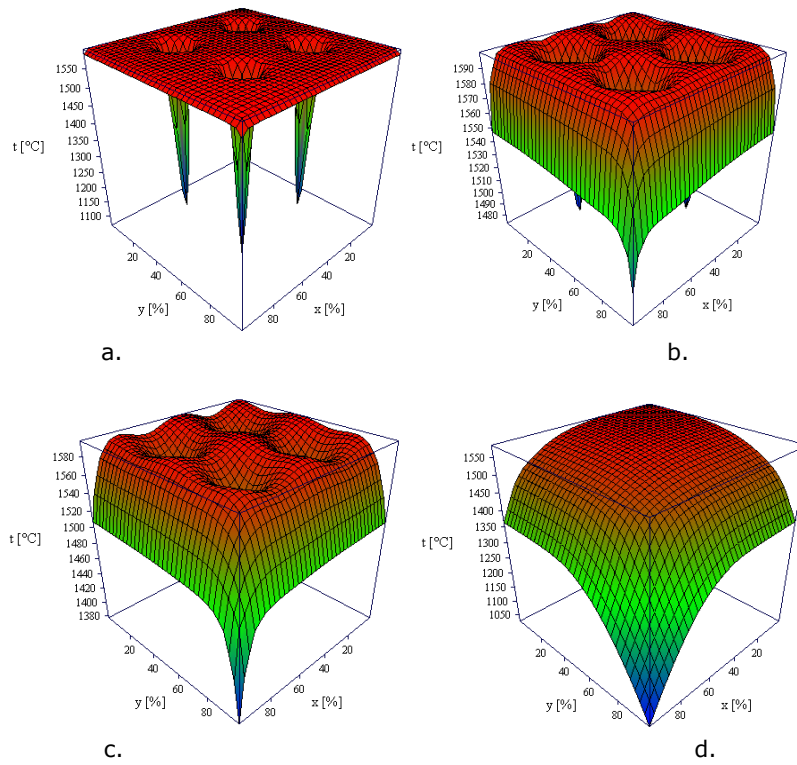


Figura 6.25. Distribuția temperaturilor în semifabricat, 1% adaos uniform de microrăcitori:
a – 3s; b – 10s; c – 30s; d - la sfârșitul rulării programului

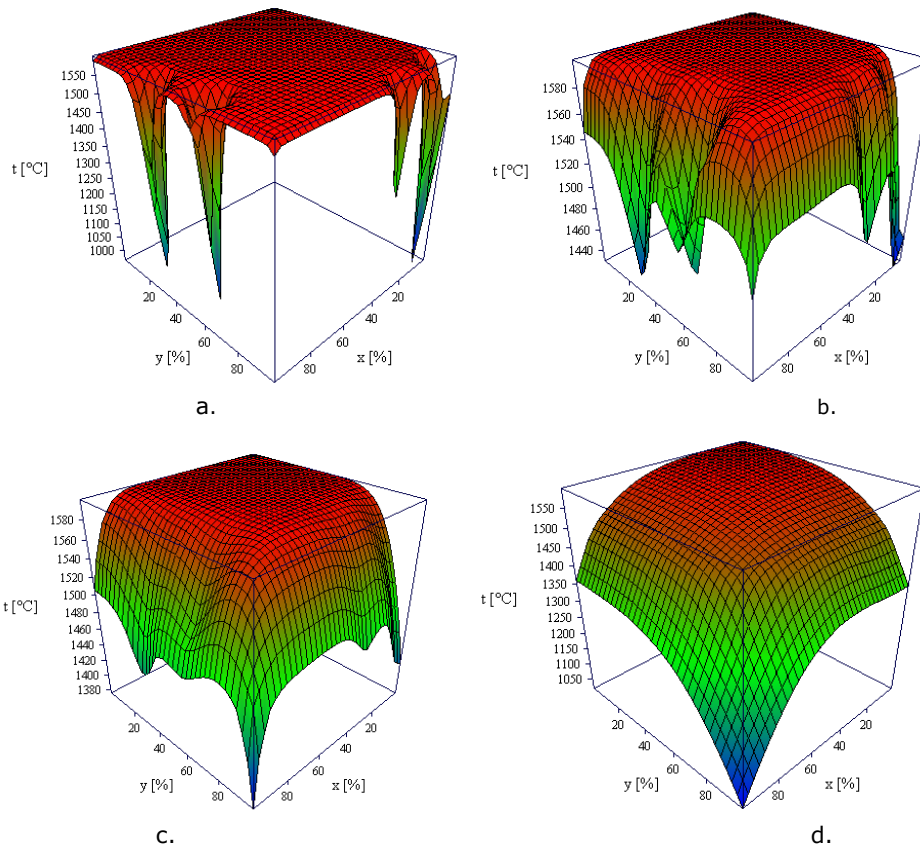


Figura 6.26. Distribuția temperaturilor în semifabricat, 1% adaos aleator de microrăcitori: a – 3s; b – 10s; c – 30s; d - la sfârșitul rulării programului

La o primă vedere cele două variații sunt similare ca și alură; la distribuția temperaturilor după o latură (am considerat axa x), saltul de temperatură la ieșirea din cristalizor nu este atât de mare ca în cazul distribuției temperaturilor după diagonală, caz în care colțul (respectiv oțelul din acea zonă) este cel care preia cantitatea cea mai mare de căldură și ca atare este cel care se încălzește cel mai mult. Și în aceste cazuri, distribuțiile sunt prezentate la momentul ieșirii din zona de răcire secundară. cristalizor).

Tot pe baza programului TURNCON adaptat pentru adaosul de microrăcitori în cristalizor se obține și modul de variație în timp a vitezei de solidificare. Este vorba de o viteză de solidificare calculată între două iterații consecutive, ceea ce explică în parte și aspectul oscilant al curbelor prezentate în figura 6.35-6.36.

Regimul oscilant, poate fi explicat pe de altă parte și datorită mișcării de oscilație a cristalizorului.

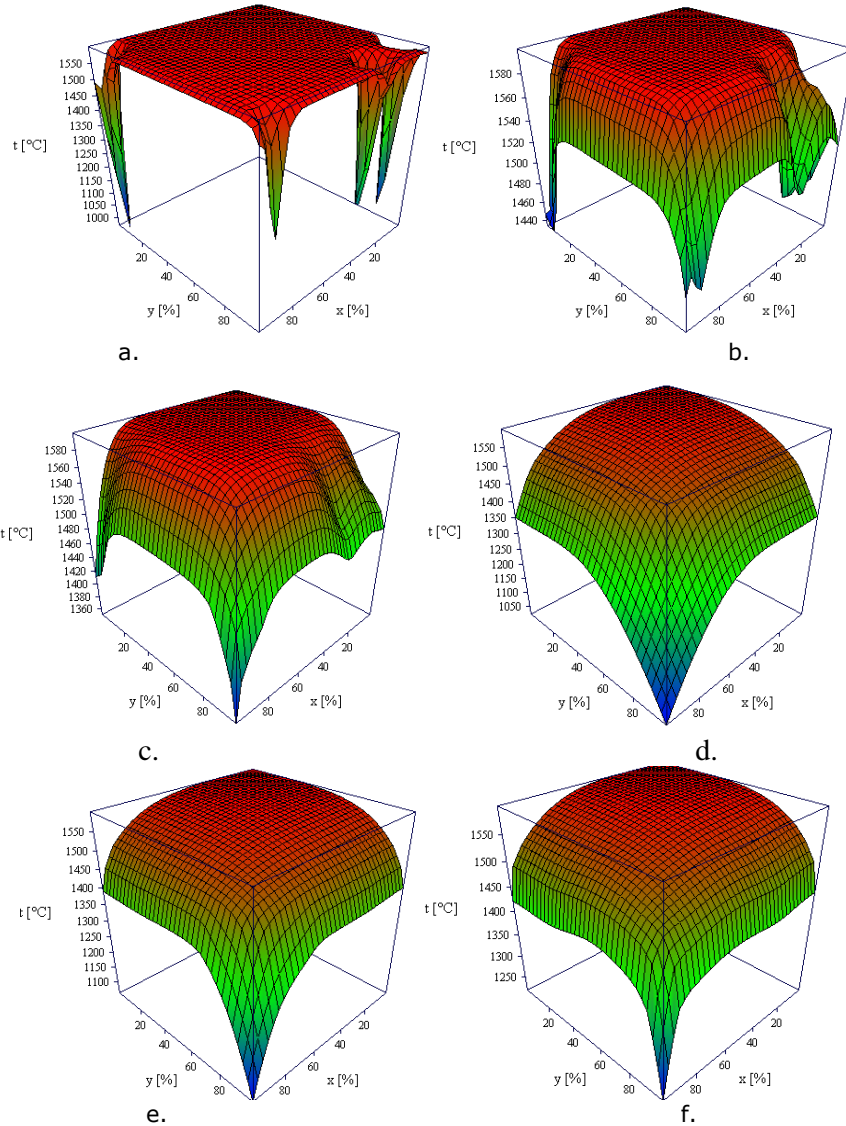


Figura 6.27. Distribuția temperaturilor în semifabricat, 1% adaos aleatoriu rep. de microrăcitori: a – 3s; b – 10s; c – 30s; d – 50s, e– 60s, f – la sfârșitul rulării programului

Cu ajutorul vitezei de solidificare și a celorlalți parametri utilizați de program, interfața principală permite și obținerea variației crustei de oțel solidificată în timp pentru punctele aflate în straturile superioare.

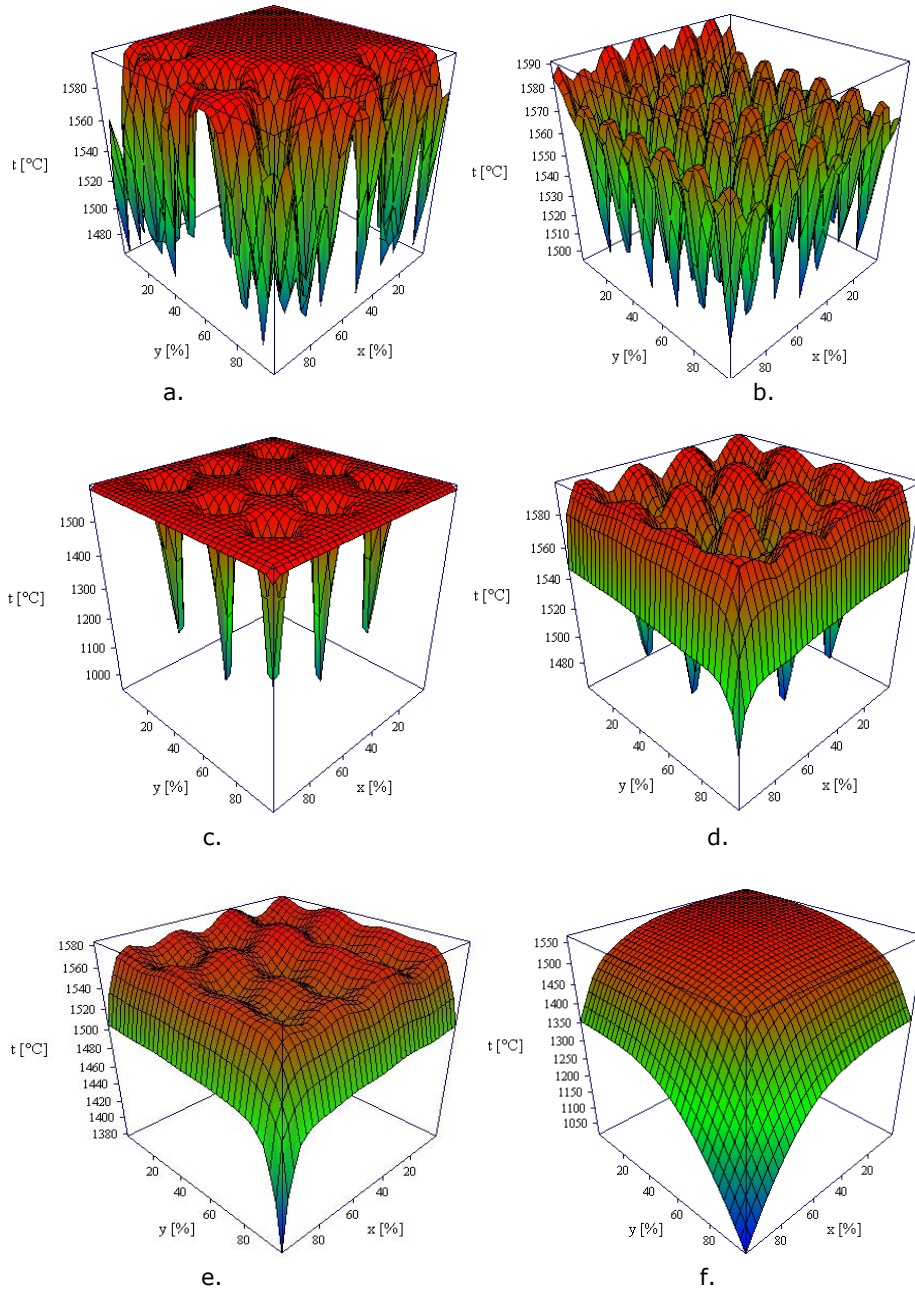


Figura 6.28. Distribuția temperaturilor în semifabricat, 2% adaos uniform de microrăcitori: a - 3s; b - 10s; c - 30s; d - 50s, e- 60s, f - la sfârșitul rulării programului la sfârșitul rulării programului

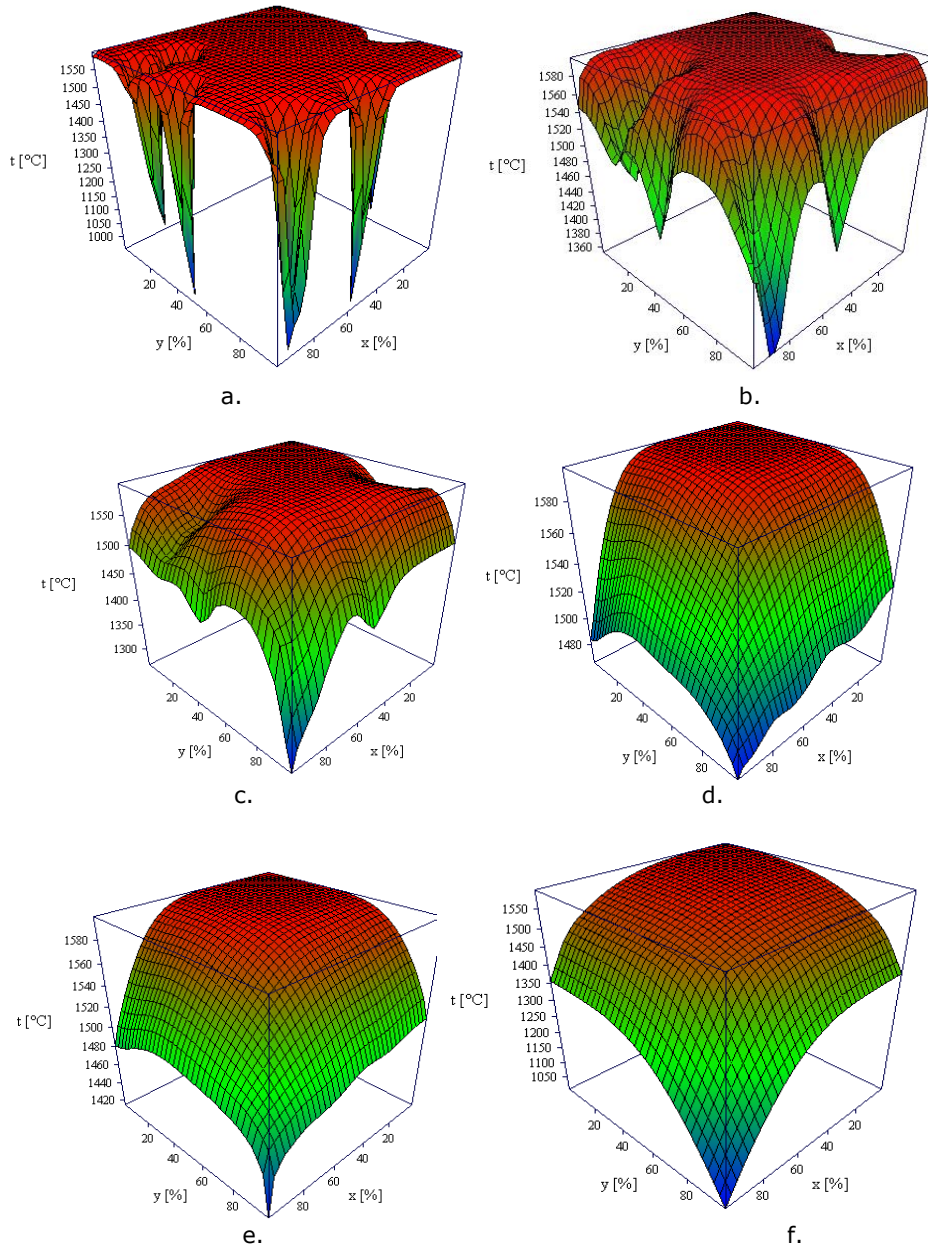


Figura 6.29. Distribuția temperaturilor în semifabricat, 2% adaos aleatoriu de microrăcitori: a – 3s; b – 10s; c – 30s; d – 50s, e – 60s, f – la sfârșitul rulării programului la sfârșitul rulării programului

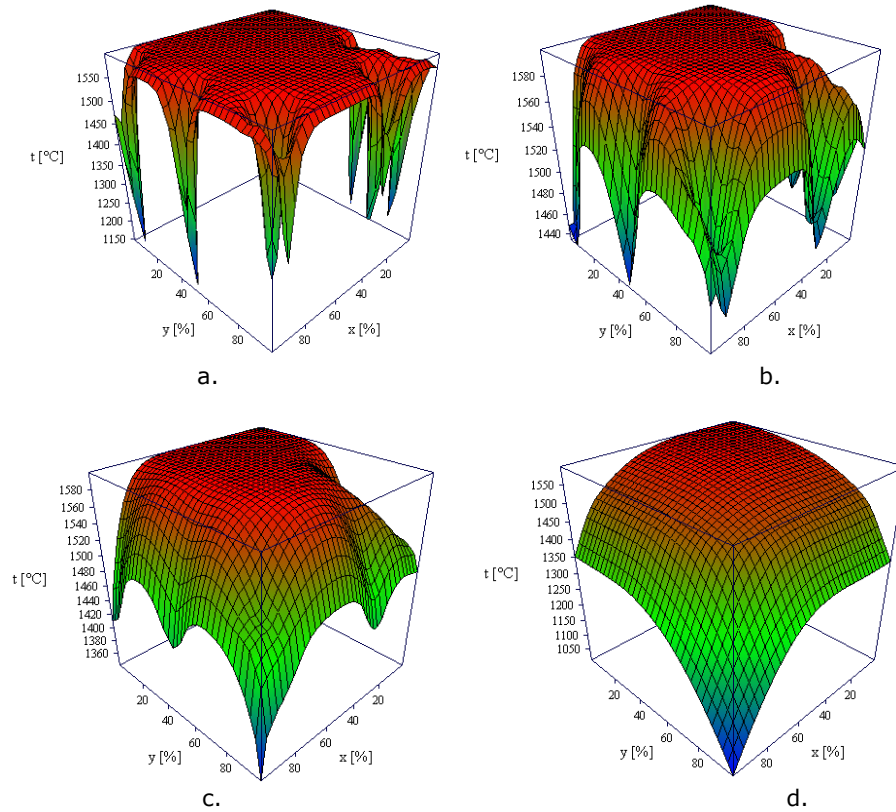


Figura 6.30. Distribuția temperaturilor în semifabricat, 2% adaos aleat. repetat de microăcitori: a - 3s; b - 10s; c - 30s; d - la sfârșitul rulării programului

Suprafețele de regresie obținute sunt corespunzătoare unui sfert din secțiunea semifabricatului, fiind similară și pentru celelalte părți ale secțiunii.

Din punct de vedere a valorilor temperaturilor, colțul semifabricatului este acela care se răcește cel mai intens iar centrul - cel mai lent.

Interfața principală a programului mai permite și obținerea distribuției temperaturii după o anumită axă (figura 6.31-6.32) sau după diagonală (figura 6.33-6.34), în funcție de timp.

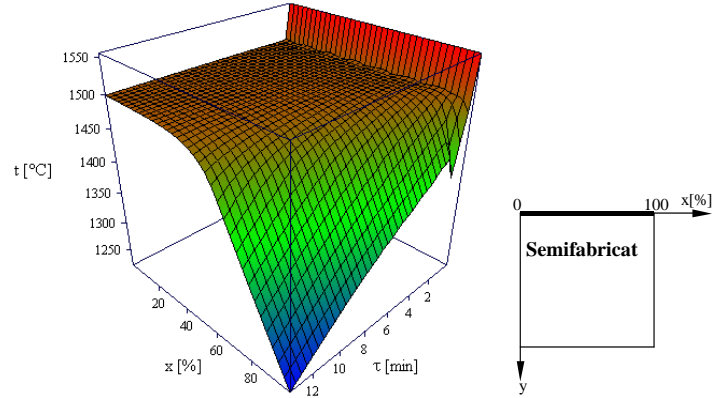


Figura 6.31. Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul axei x pentru $y = 0$, în funcție de timp, 1% adaos uniform de microrăcitori

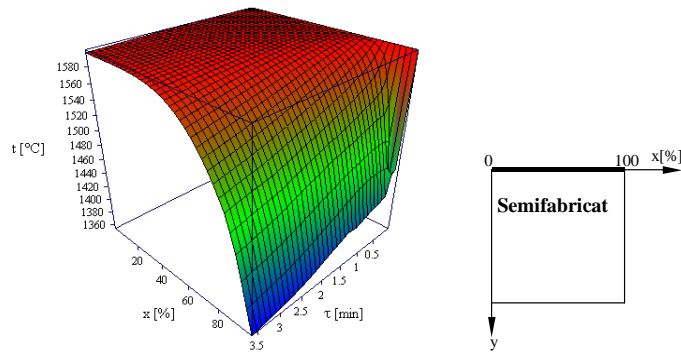


Figura 6.32. Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul axei x pentru $y = 0$, în funcție de timp, 2% adaos aleatoriu repetat de microrăcitori

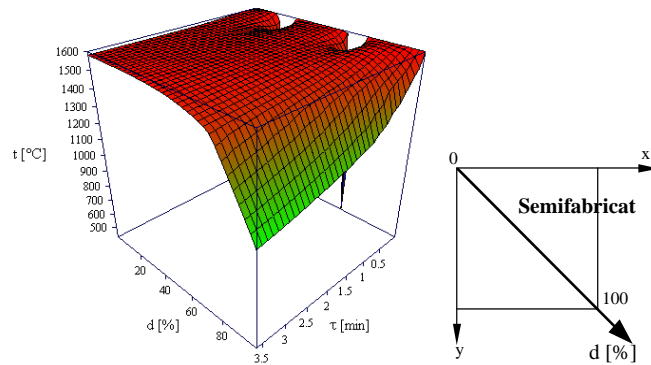


Figura 6.33. Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul diagonalei, în funcție de timp, 1% adaos uniform de microrăcitori

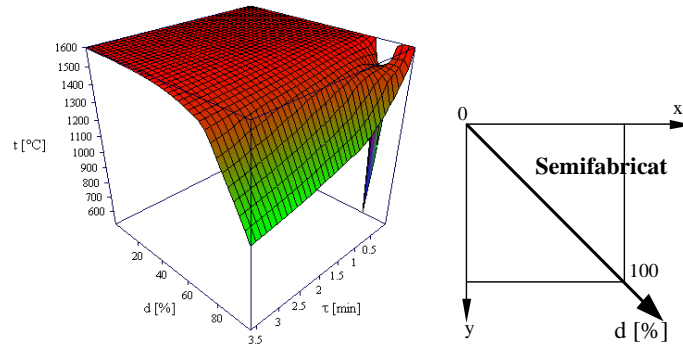


Figura 6.34. Distribuția temperaturilor din semifabricat de-a lungul diagonalei, în funcție de timp, 2%adaos aleatoriu repetat de microărăcitori

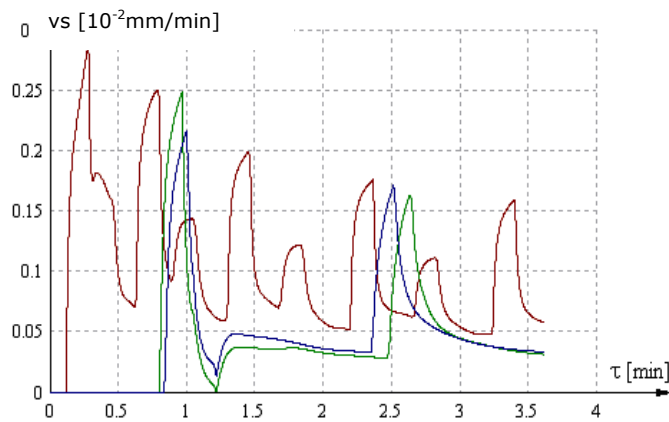


Figura 6.35. Variația în timp a vitezei de solidificare, 1%adaos uniform de microărăcitori

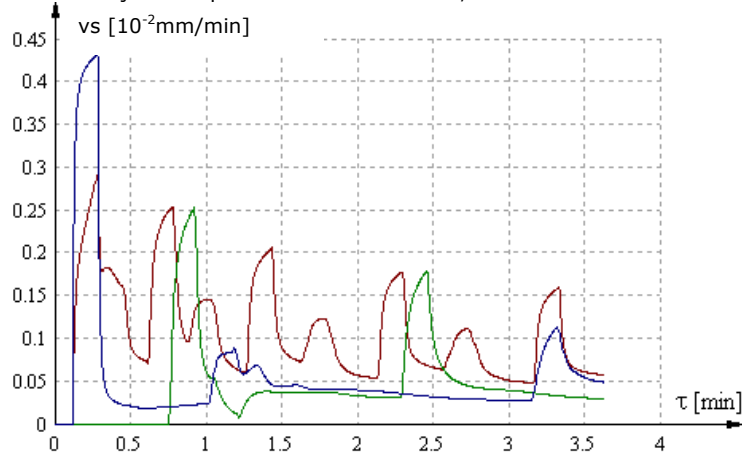


Figura 6.36. Variația în timp a vitezei de solidificare, 1%adaos aleatoriu de microărăcitori

De fapt, se poate spune că variațiile obținute (curbele prezentate în figura 6.37-6.46) reprezintă forma frontului de solidificare pentru punctele considerate.

Variația este de tip procentual, reprezentată de la margine (exterior) către centrul semifabricatului (al secțiunii considerate).

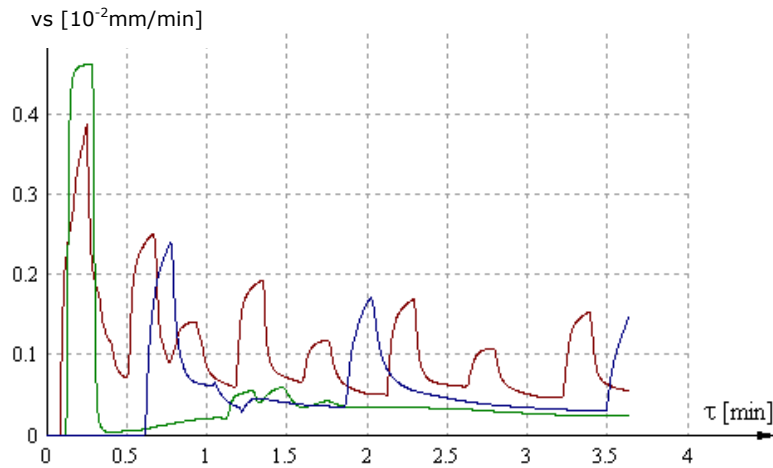


Figura 6.37. Variația în timp a vitezei de solidificare, 1%adaos aleatoriu repetat de microrăcitori

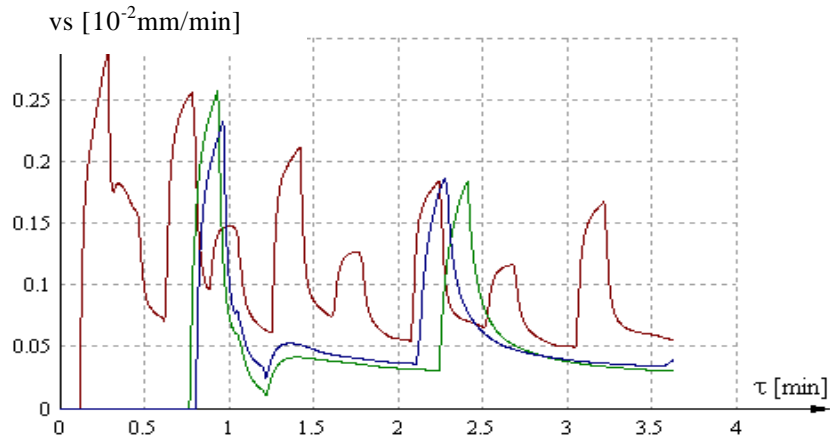


Figura 6.38. Variația în timp a vitezei de solidificare, 2%adaos uniform de microrăcitori

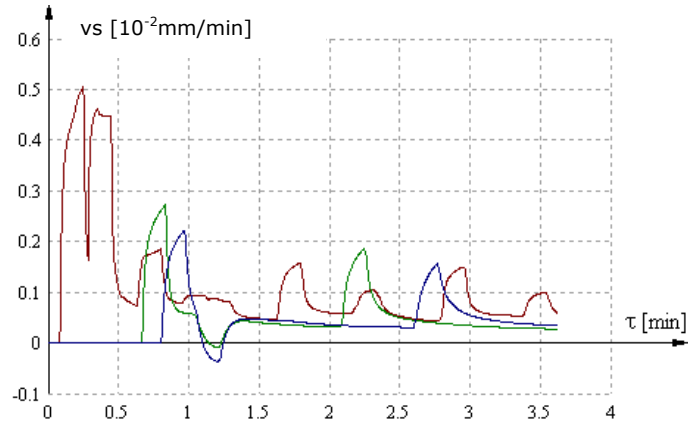


Figura 6.39. Variația în timp a vitezei de solidificare, 2%adaos aleatoriu de microrăcitori

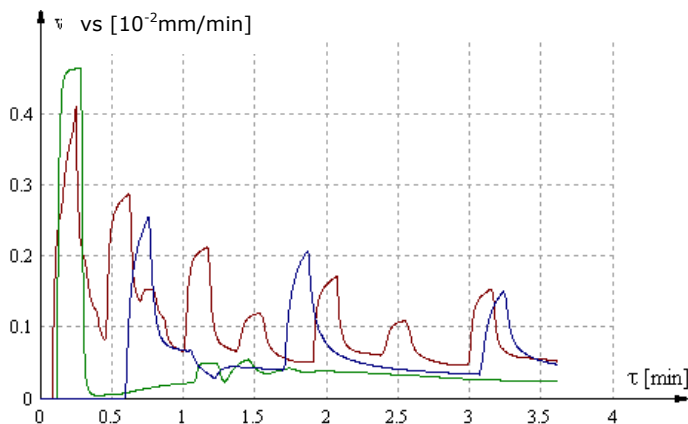


Figura 6.40. Variația în timp a vitezei de solidificare, 2%adaos aleatoriu repetat de microrăcitori

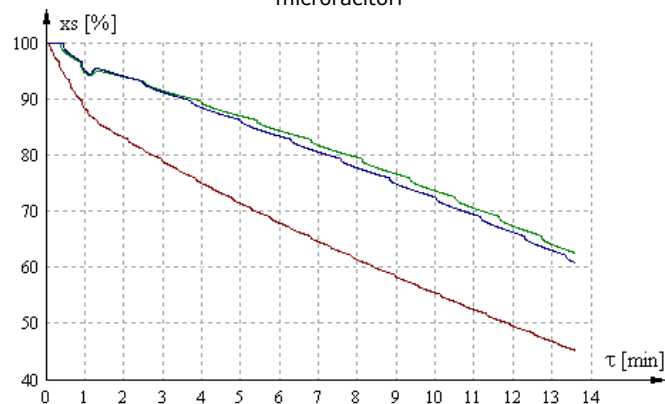


Figura 6.41. Variația grosimii crustei solidificate în timp, 1%adaos uniform de microrăcitori

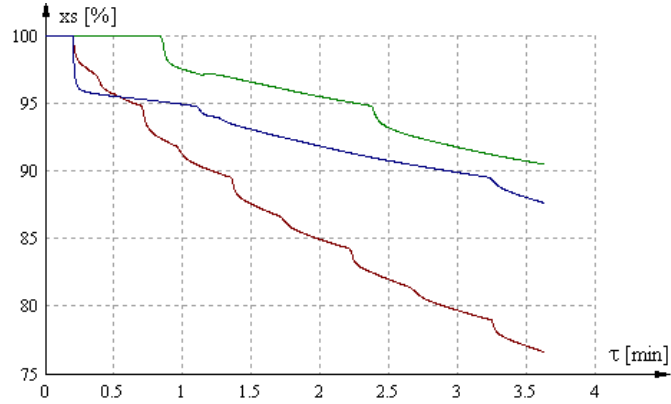
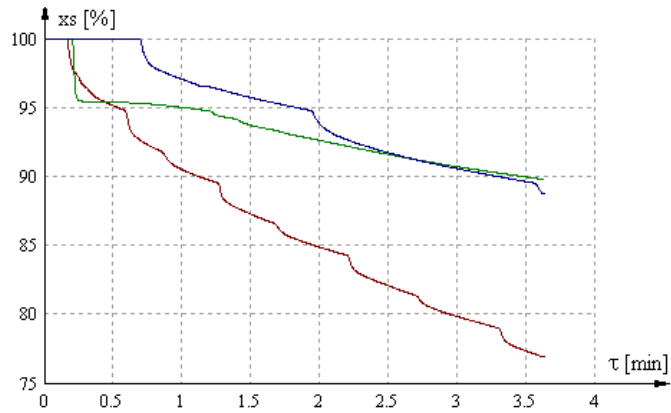


Figura 6.42. Variația grosimii crustei solidificate în timp, 1%adaos aleatoriu de microrăcitori



Figurura 6.43. Variația grosimii crustei solidificate în timp, 1%adaos aleatoriu repetat de microrăcitori

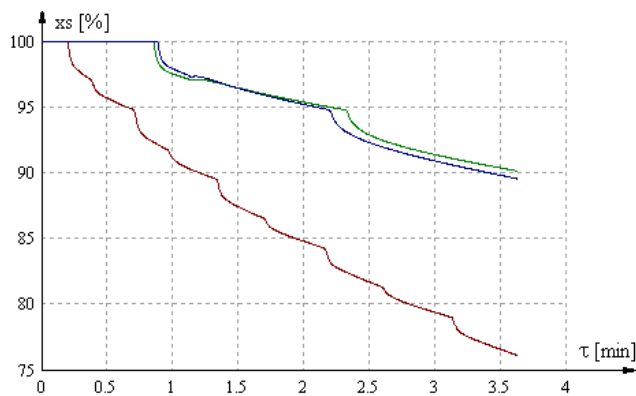


Figura 6.44. Variația grosimii crustei solidificate în timp, 2%adaos uniform de microrăcitori

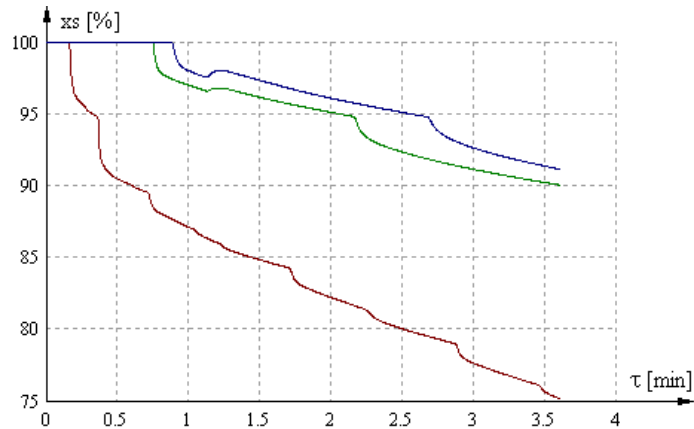


Figura 6.45. Variația grosimii crustei solidificate în timp, 2% adaos aleatoriu de microrăcitori

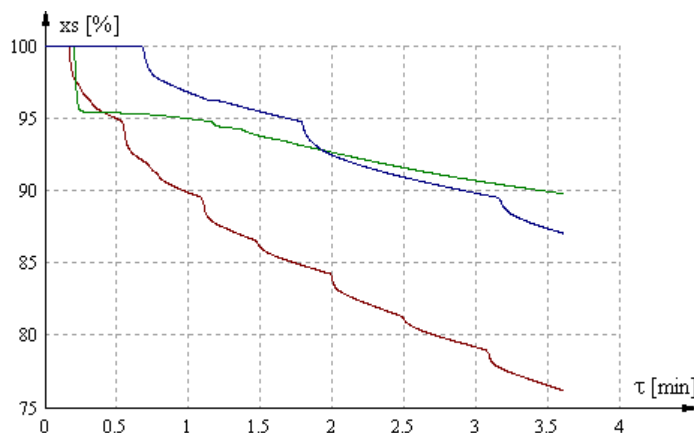


Figura 6.46. Variația grosimii crustei solidificate în timp, 2% adaos aleatoriu repetat de microrăcitori

6.6.2. Realizarea simulării solidificării țagtelor rotunde turnate continuu cu 3% adaos de microrăcitori în cristalizor

Pentru realizarea simulării solidificării semifabricatelor turnate continuu cu programul întocmit se utilizează caracteristicile mărcii de oțel S 235 JRG2, conform SR EN 10025 și anume:

- masa specifică (densitatea) $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$;
- temperatura solidus $T_{\text{sol}} = 1464 \text{ }^\circ\text{C}$;
- temperatura lichidus $T_{\text{lich}} = 1522 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 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 microrăcitori 1%, 2% și 3%;
- dependențele funcționale $\lambda(T)$, $\Phi(T)$ și $H(T)$ prezentate anterior.

Datele ambientale folosite sunt:

- temperatura mediului ambiant 20°C;
- temperatura de turnare 1550°C;
- constanta de convecție K = 15.

Simulările sunt realizate cu următoarele date:

- numărul nodurilor de discretizare pentru semifabricat 20×20;
- numărul nodurilor de discretizare pentru cristalizor 5×5;
- maximul variației entalpiei într-o iterație 10J/kg.

Simularea s-a realizat pentru țagle țevi cu diametrul de 270mm.

Programul permite o distribuție uniformă a microrăcitorilor, o distribuție aleatoare respectiv o distribuție aleatoare repetabilă.

Pentru realizarea simulării se deschide o interfața principală a programului prezentată în figura 6.47.

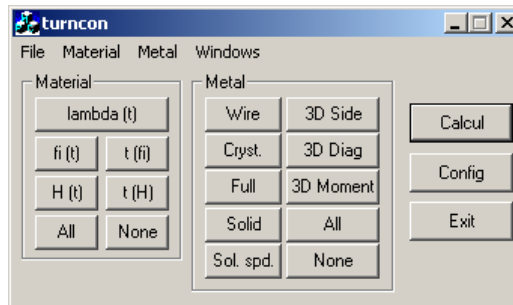


Figura 6.47. Interfața principală a programului

Datele stabilite sunt introduse în program prin intermediul unei ferestre de preluare a datelor, prezentată în figura 6.48. și figura 6.49.

Simularea solidificării semifabricatelor turnate continuu cu adaos uniform de microrăcitori în cristalizor se va efectua în trei variante: fără adaos și cu adaos 3% microrăcitori.

Trebuie specificat și faptul că simularea este realizată doar pentru răcirea primară și secundară și nu pentru întregul parcurs al firului în instalație. Astfel se explică valorile încă mari ale temperaturii oțelului din interiorul semifabricatului (straturile din mijloc) dar care scad până sub valoarea temperaturii solidus până la momentul în care semifabricatul este debitat.

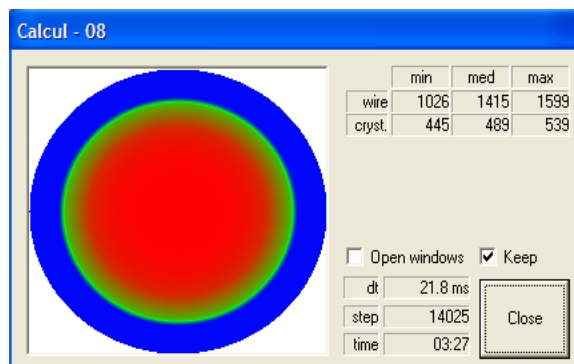


Figura 6.48. Fereastra de dialog pentru progresul calculelor

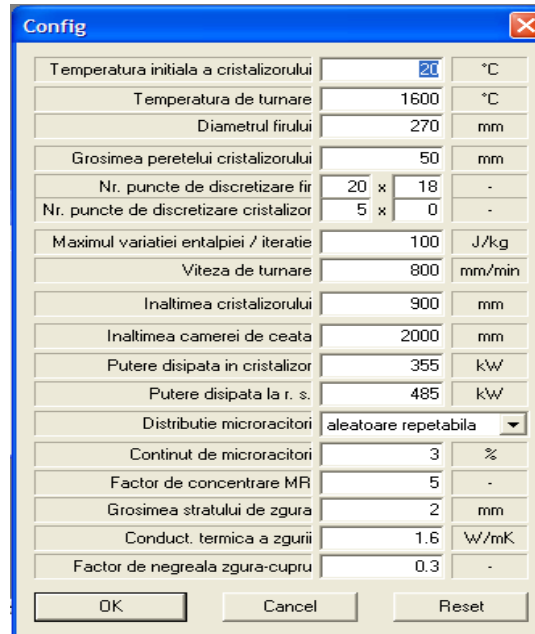


Figura 6.49. Fereastră de dialog pentru stabilirea datelor de rulare a programului

Programului de simulare fiind același ca și în cazul simulării procesului de solidificare al blumului, se vor reda în continuare numai reprezentările grafice ale variației temperaturii în semifabricat în funcție de timp, fiind prezentată și distribuția punctelor discretizate.

Conductivitatea termică pentru materialul cristalizorului (cupru) s-a considerat constantă la valoarea de 394 W/m°C. Pentru oțel s-a folosit o aproximare după datele experimentale obținute din literatură – un arc de parabolă până la temperatura Curie și constantă după aceasta:

$$\lambda = \begin{cases} -3,33 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 - 8,63 \cdot 10^{-3} \cdot t + 50,93 & t < 768 \\ 24,7 & t \geq 768 \end{cases} \quad (6.46.)$$

unde λ este în W/m°C iar temperatura în grade Celsius.

Conductivitatea termică a oțelului în funcție de temperatură, așa cum e folosită în program este prezentată în graficul de mai jos:

Temperatura redusă este o mărime introdusă de formula:

$$\Phi = \int_{t_0}^t \frac{\lambda}{\lambda_0} dt \quad (6.47.)$$

și care se folosește într-o substituție care simplifică calculele în metoda diferențelor finite.

Valoarea t_0 a temperaturii este aleasă arbitrar (în acest caz s-a folosit 0°C), iar $\lambda_0 = \lambda(t_0)$.

Pentru cristalizor, unde conductivitatea termică este constantă, se obține $\Phi = t$. Calculul integralei în cazul oțelului se face analitic, acest lucru fiind permis de modul în care s-a aproximat $\lambda(t)$.

Funcția directă $\Phi(t)$ și inversă $t(\Phi)$ sunt prezentate în figura 6.51, respectiv figura 6.52.

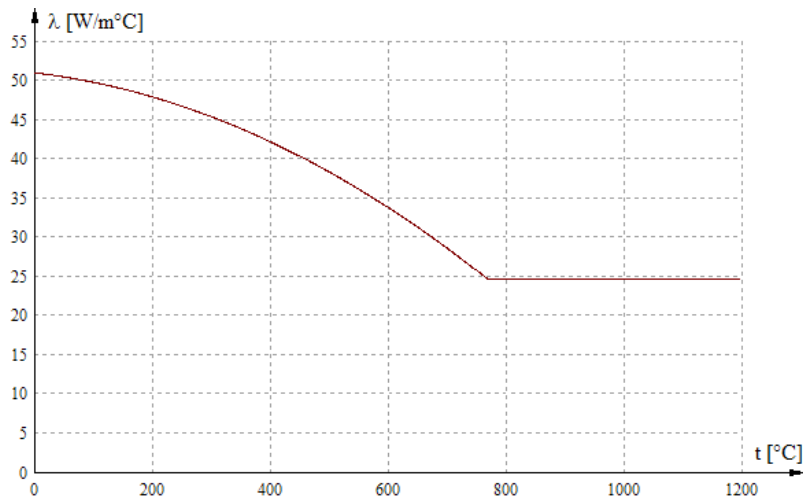


Figura 6.50. Conductivitatea termică a oțelului în funcție de temperatură

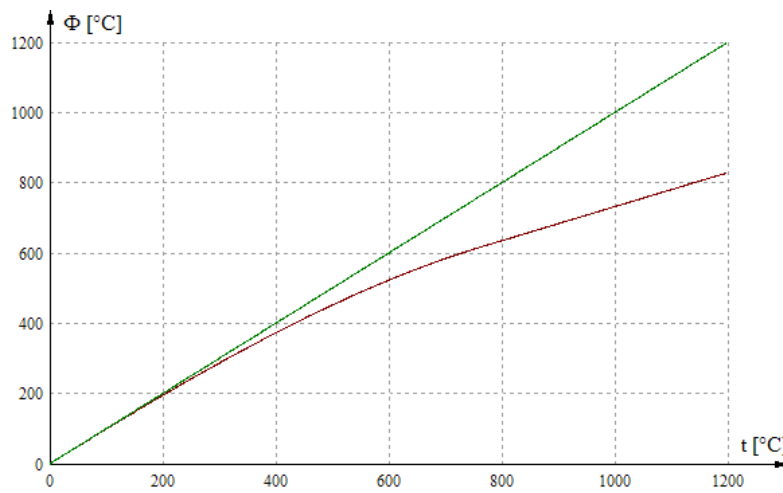


Figura 6.51. Funcția directă $\Phi(t)$

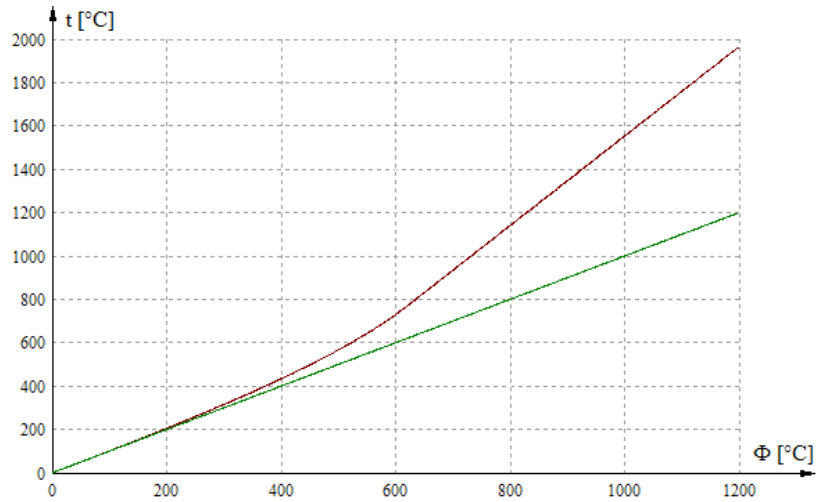


Figura 6.52. Funcția inversă $t(\Phi)$

Entalpia în funcție de temperatură și inversa le-am prezentat în figura 6.53 și 6.54.

Într-o iterație de timp în program se calculează prin metoda diferențelor finite entalpia în funcție de entalpia și temperatura redusă de la momentul precedent, după care se calculează temperatura și temperatura redusă la momentul curent: $\dots \rightarrow \Phi \rightarrow H \rightarrow t \rightarrow \Phi \rightarrow \dots$

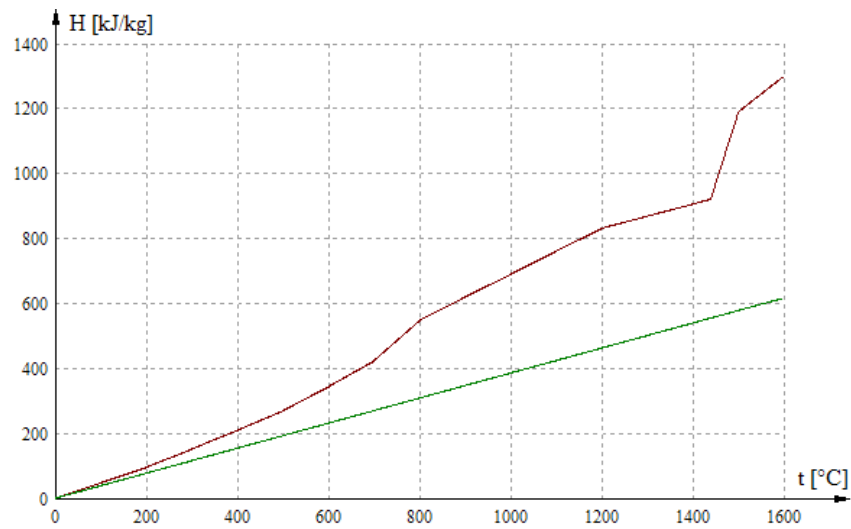


Figura 6.53. Entalpia în funcție de temperatură

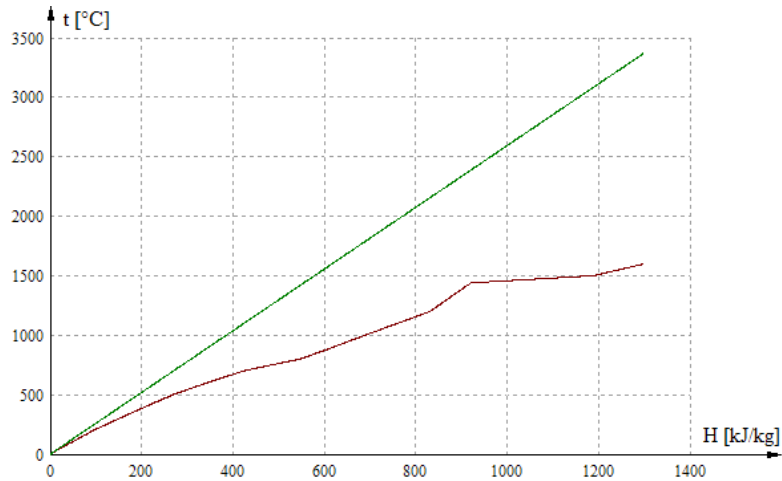


Figura 6.54. Temperatura funcție de entalpie

Am prezentat câteva grafice obținute în urma simulării fără microrăcitori.

În figura 6.55. am reprezentat temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 10%, 25%, 50% și 100% din raza firului de turnare. Iar în figura 6.56. am reprezentat temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la coordonatele 1%, 5%, 10%, 50% și 100% – unde 0% este suprafața de separare fir-cristalizor iar 100% suprafața exterioară a cristalizorului.

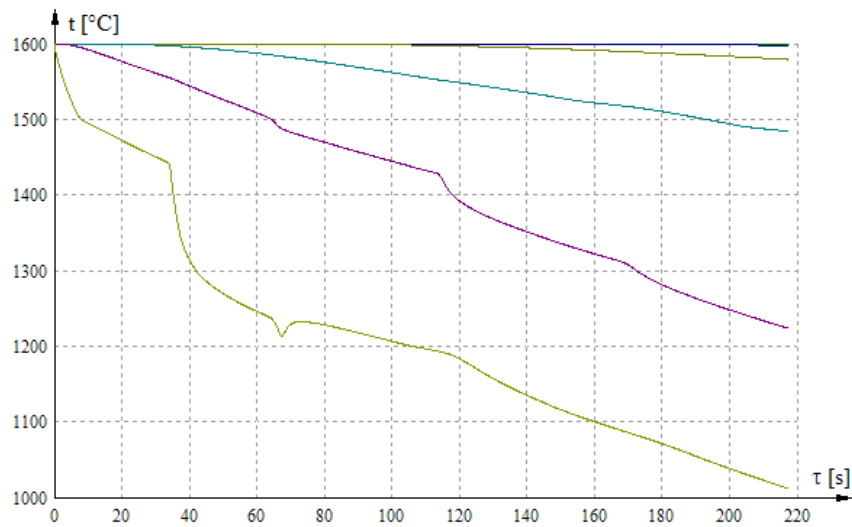


Figura 6.55. Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 10%, 25%, 50% și 100% din raza firului de turnare

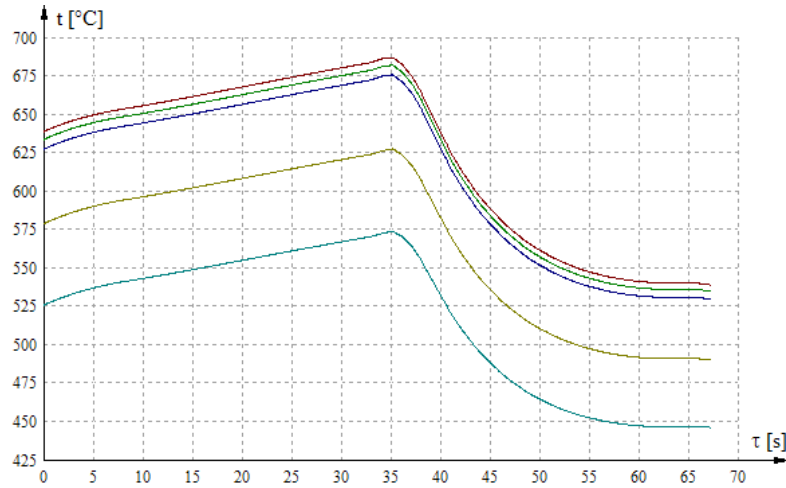


Figura 6.56. Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la coordonatele 1%, 5%, 10%, 50% și 100%

În figura 6.57. am reprezentat temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 50%, 75%, 90%, 100% din raza cristalizorului, precum și la jumătatea grosimii cristalizorului și la suprafața acestuia (cea mai rece).

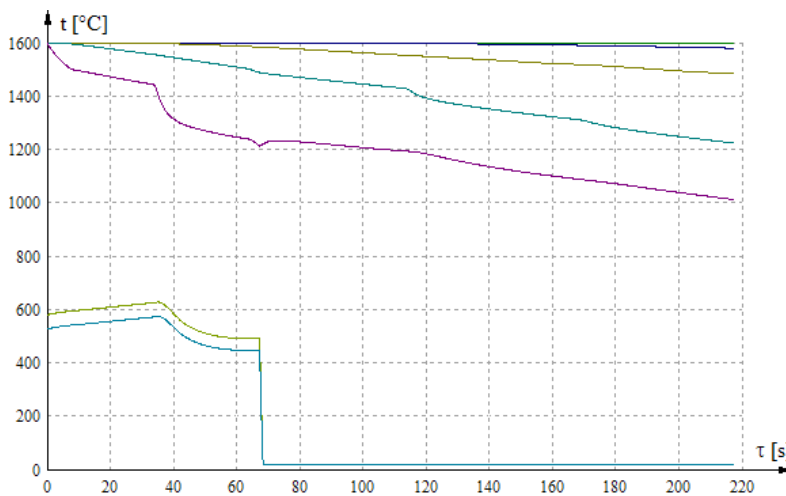


Figura 6.57. Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 50%, 75%, 90%, 100% din raza cristalizorului

Raza relativă a frontului de solidificare (100% = suprafața firului) respectiv viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare sunt reprezentate în figura 6.58. și figura 6.59.

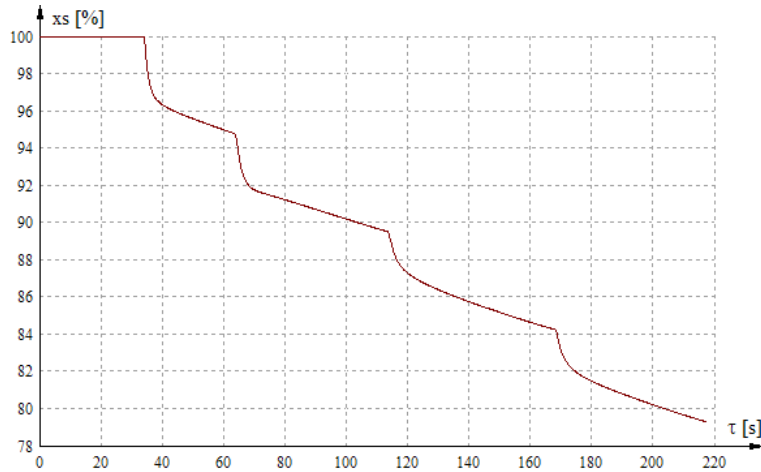


Figura 6.58. Raza relativă a frontului de solidificare

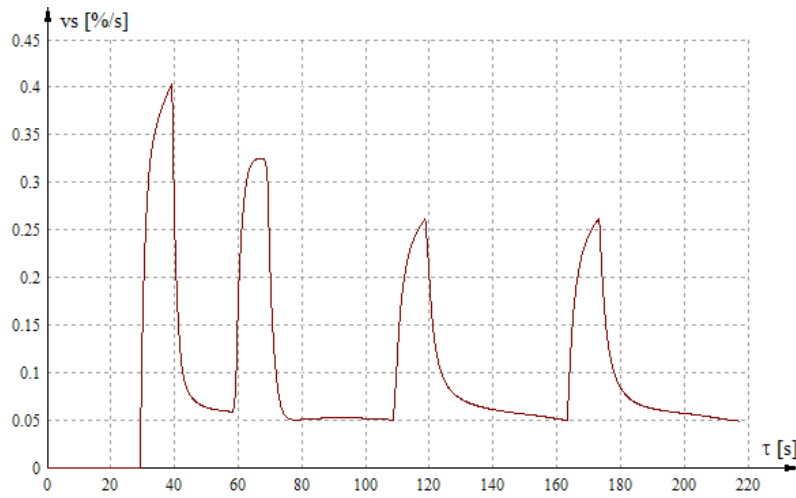


Figura 6.59. Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare

În figura 6.60. am reprezentat temperatura în funcție de raza relativă și timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, iar în figura 6.61. temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d.

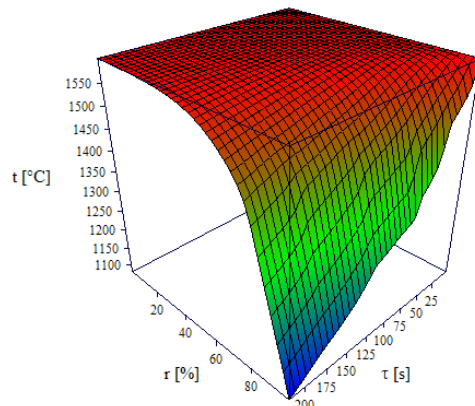


Figura 6.60. Temperatura în funcție de raza relativă și timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$

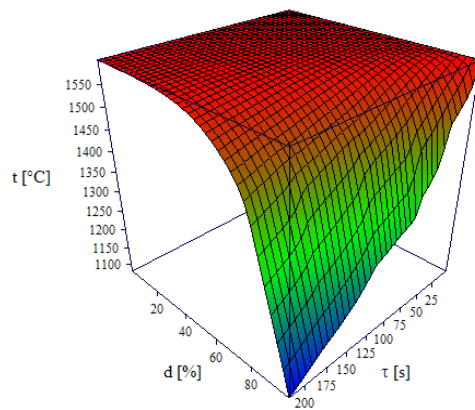


Figura 6.61. Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d

Punctele sunt luate în spirală așa încât d , raza relativă și $\varphi/2\pi$ să aibă aceeași valoare.

Pentru a analiza dependențele grafice am trasat diagramele temperatură în funcție de raza relativă și coordonata polară la 10s, 60, 217s (figura 6.62.,6.63., 6.64.)

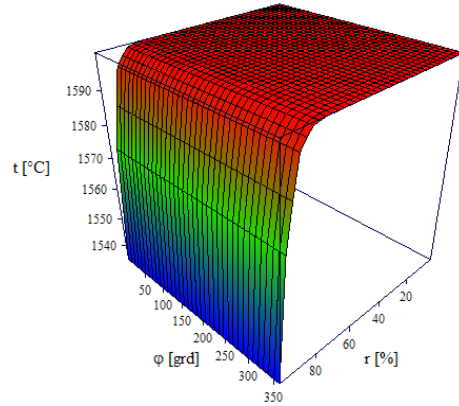


Figura 6.62. Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 10 s

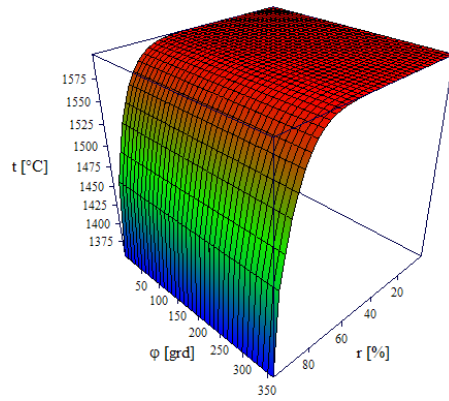


Figura 6.63. Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 60 s

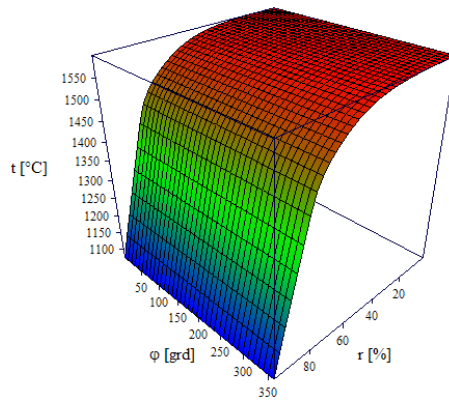


Figura 6.64. Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 217 s

În ceea ce urmează sunt prezentate ferestrele de dialog rezultate la 1-26s de la administrarea microrăcitorilor (figura 6.65) și la ieșirea din zona de răcire secundară (figura 6.66) pentru toate variantele simulate.

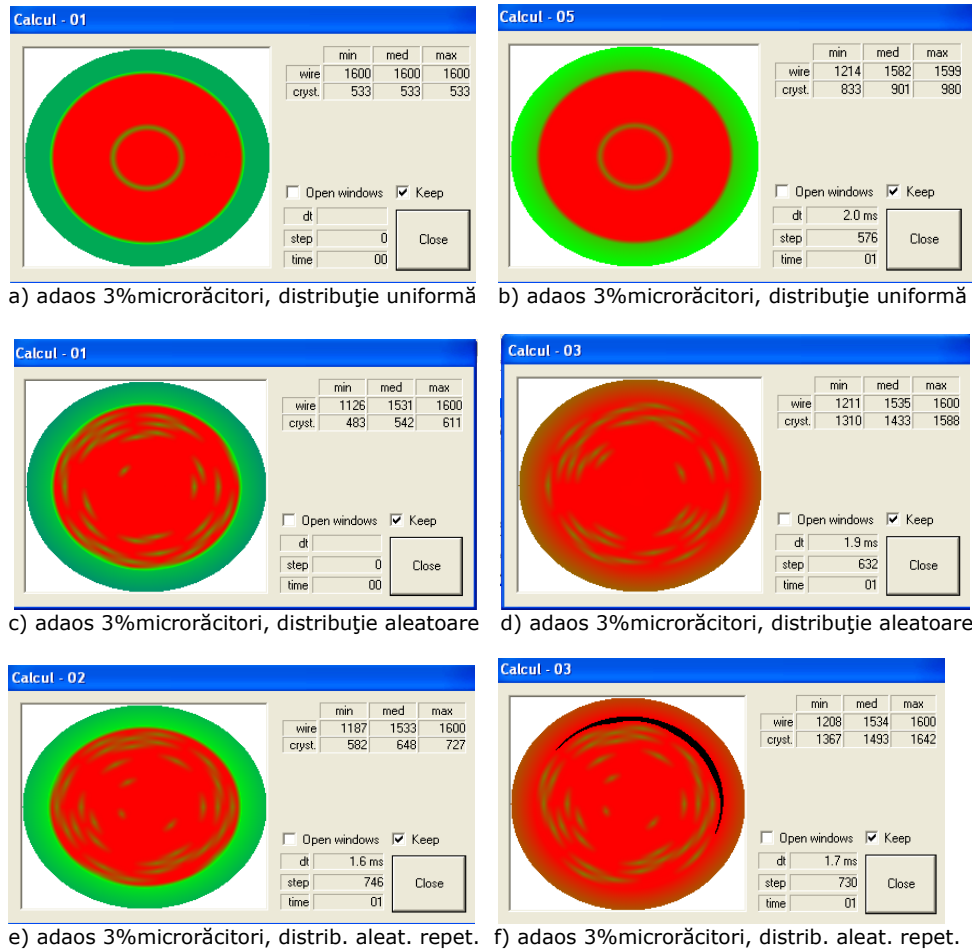
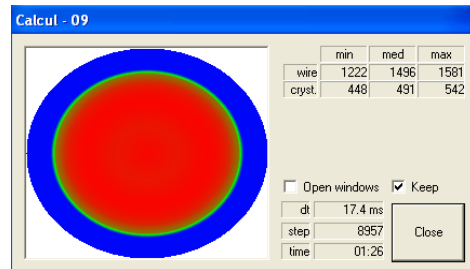


Figura 6.65. Ferestrele de dialog cu adaos 3%microrăcitori

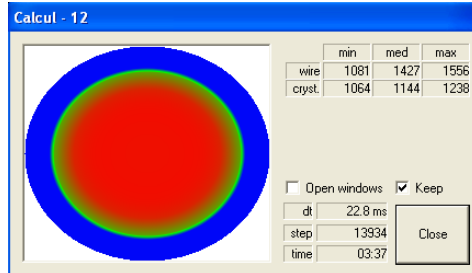
La fel ca la blum, la oprirea procesului de simulare, programul prezintă opțiunea de afișare a variației parametrilor simulați în timp.

6.6. Simularea solidificării semifabricatelor turnate continuu 151
cu adaos de microrăcitori în cristalizor

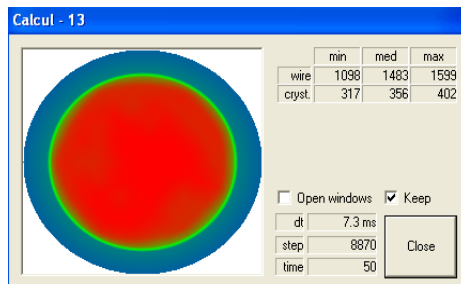
O primă dependență obținută, o reprezintă variația temperaturii în semifabricat în funcție de timp (figura 6.67-6.72), distribuția punctelor discretizate este de asemenea prezentată.



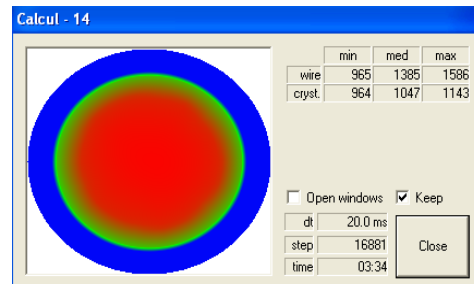
a) adaos 3%microrăcitori, distribuție uniformă



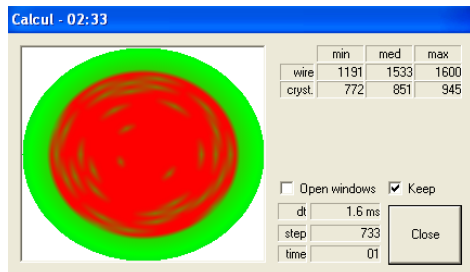
b) adaos 3%microrăcitori, distribuție uniformă



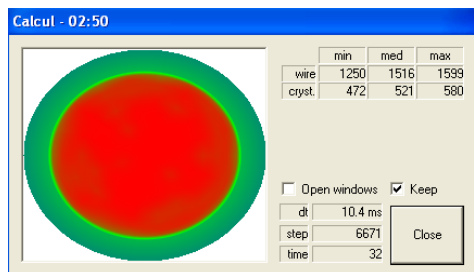
c) adaos 3%microrăcitori, distribuție aleatoare



d) adaos 3%microrăcitori, distribuție aleatoare



e) adaos 3%microrăcitori, distrib. aleat. repet.



f) adaos 3%microrăcitori, distrib. aleat. repet.

Figura 6.66. Ferestrele de dialog la sfârșitul rulării programului

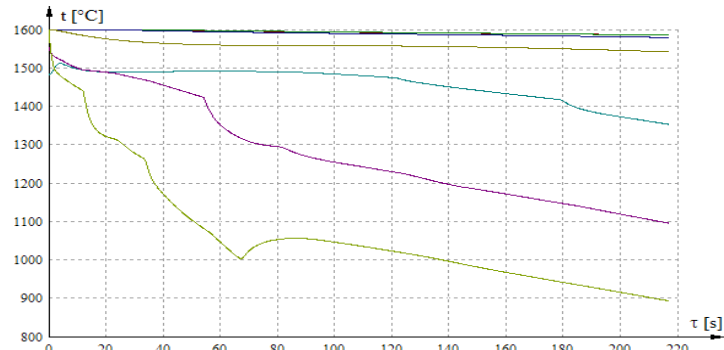


Figura 6.67. Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 10%, 25%, 50% și 100% din raza firului de turnare

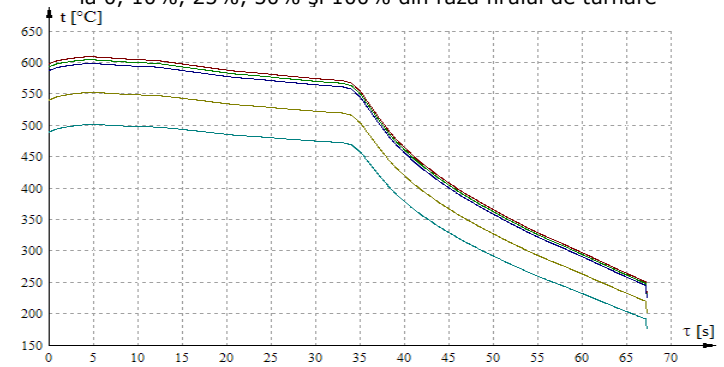


Figura 6.68. Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la coordonatele 1%, 5%, 10%, 50% și 100% - unde 0% este suprafața de separare fir-cristalizer iar 100% suprafața exterioară a cristalizerului

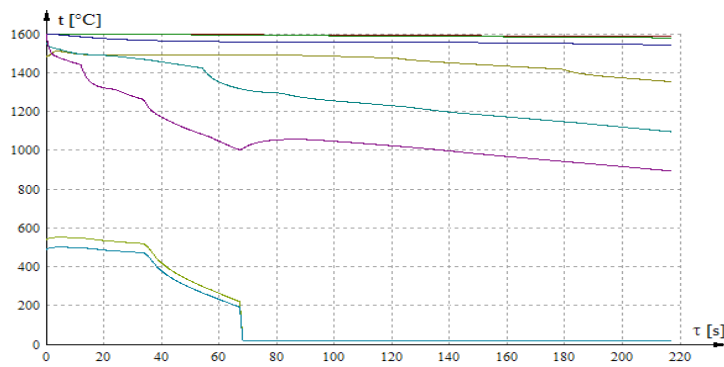


Figura 6.69. Temperatura în funcție de timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, în puncte situate la 0, 50%, 75%, 90%, 100% din raza cristalizerului, precum și la jumătatea grosimii cristalizerului și la suprafața acestuia (cea mai rece)

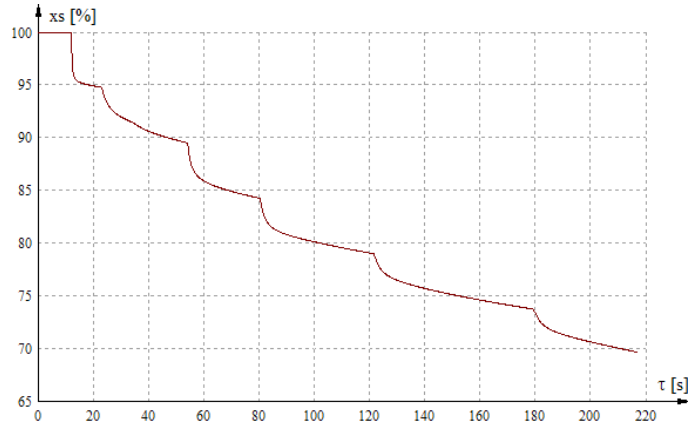


Figura 6.70. Raza relativă a frontului de solidificare (100% = suprafața firului)

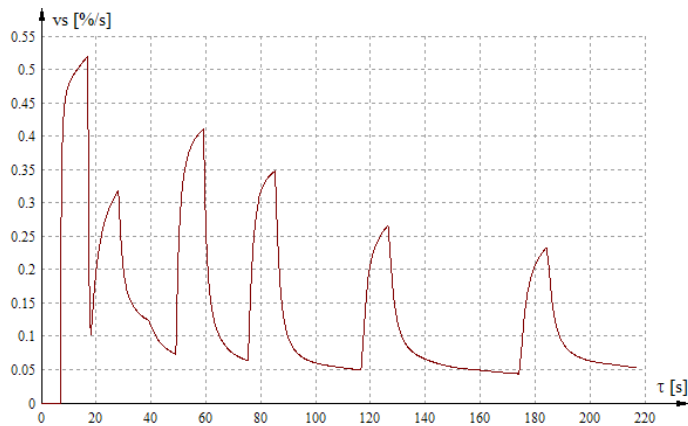


Figura 6.71. Viteza de variație a razei relative a frontului de solidificare

În figura 6.72. am reprezentat temperatura în funcție de raza relativă și timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$, iar în figura 6.73. 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.

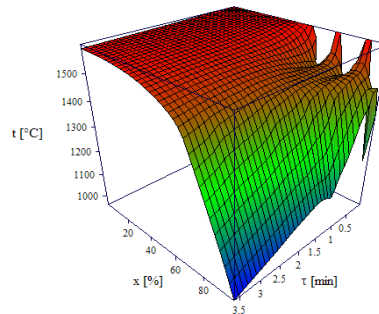


Figura 6.72. Temperatura în funcție de raza relativă și timp, pentru coordonata polară $\varphi = 0$

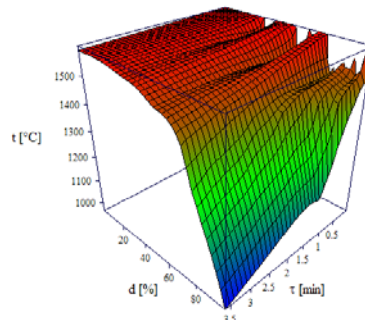


Figura 6.73. Temperatura la coordonata polară 0, în funcție de timp și de coordonata d

Un alt tip de distribuție a temperaturilor din semifabricat este prezentată în figura 6.74-6.76. la 10s, 60s, 217s respectiv în momentul ieșirii secțiunii considerate din zona de răcire secundară.

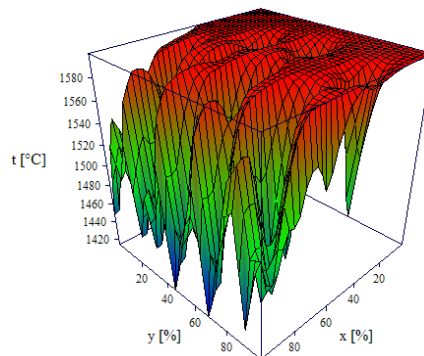


Figura 6.74. Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 10 s

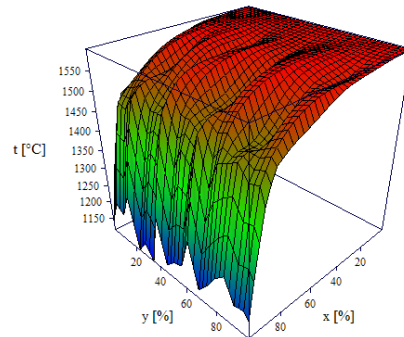


Figura 6.75. Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 60 s

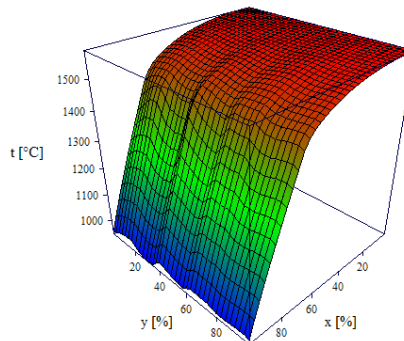


Figura 6.76. Temperatura în funcție de raza relativă și coordonata polară la 217 s

Distribuția temperaturilor din semifabricat în funcție de raza relativă și coordonata polară la diferite intervale de timp la:

- 1s, 2s, 5s, 8s, 20s, 30s, 40s și 75s;
- 140s și 190s;

le-am reprezentat în figura 6.77. și figura 6.78.

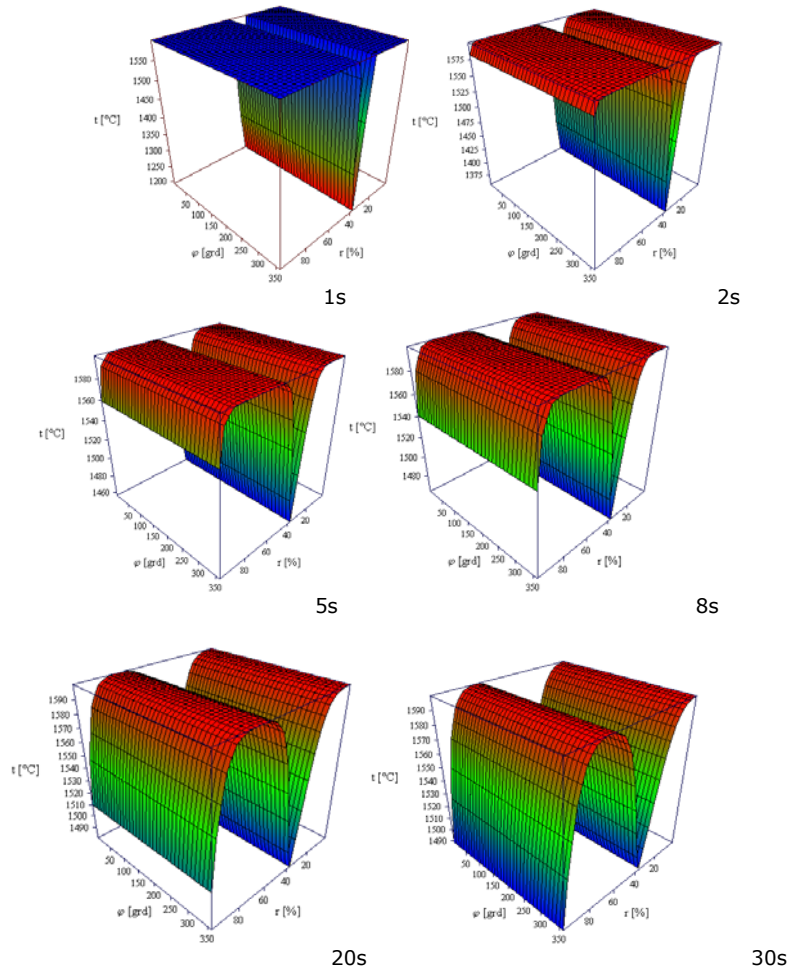


Figura 6.77. Distribuția temperaturilor din semifabricat în funcție de raza relativă și coordonata polară la: 1s, 2s, 5s, 8s, 20s, 30s

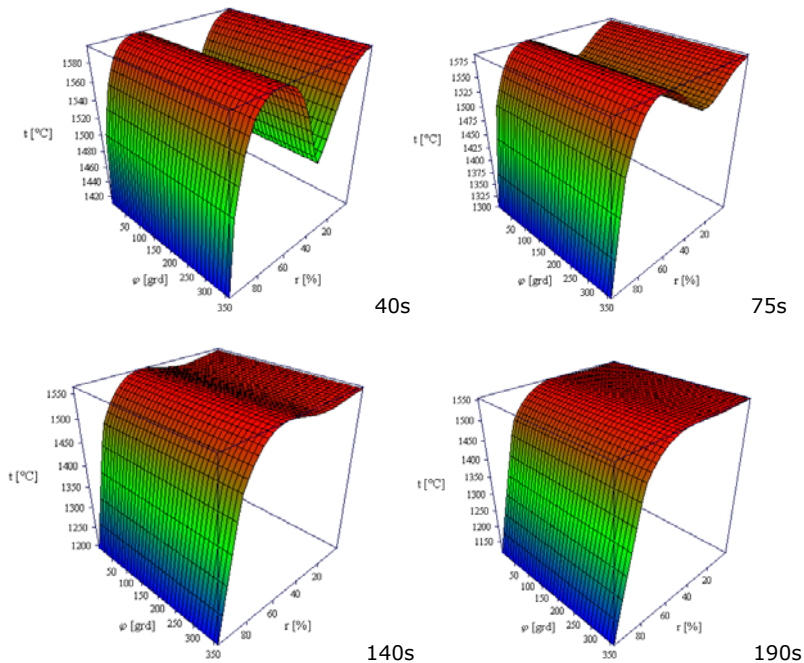


Figura 6.78. Distribuția temperaturilor din semifabricat în funcție de raza relativă și coordonata polară la : 40s, 75s, 140s și 190s

6.7. Concluzii

Datorită performanțelor informatice și îmbunătățirii tehnicii de simulare matematică, cu ajutorul acestor relații empirice s-au întocmit modele care reproduc fenomenul de solidificare și răcire a semifabricatului din oțelul turnat continuu, atât în zona de răcire primară cât și în cea secundară. La baza acestei simulări stă de fapt rezolvarea ecuației transmiterii căldurii în regim nestaționar.

În vederea realizării modelării matematice bidimensionale a solidificării și răcirii unui semifabricat se consideră o secțiune a ansamblului semifabricat -cristalizer care se împarte cu ajutorul unei rețele de discretizare.

Temperatura în fiecare nod reprezintă temperatura medie a suprafeței adiacente nodului. În aceste noduri se scriu ecuațiile cu diferențe finite. Abilitatea modelului a fost probată experimental, rezultatele fiind corespunzătoare.

Tipul de model prezentat, s-a utilizat în acest capitol, pentru a constata, prin comparație, dacă metoda propusă este o metodă optimă de reglare a temperaturii oțelului în cristalizer precum și de dirijare a procesului de solidificare a semifabricatelor turnate continuu. O astfel de metodă constă în introducerea în oțel a microrăcitorilor, adăugarea microrăcitorilor în cristalizer conducând la creșterea

zonei cristalelor echiaxe, scăderea gradului de supraîncălzire și reducerea porozității axiale.

Simularea s-a făcut pentru semifabricatele din oțelul turnat continuu - blum 270X240mm și țagle țevi R270mm; s-a aplicat programul TURCON, în doua variante: fără adaos de microrăcitori și cu adaos de microrăcitori.

Analizând reprezentările grafice rezultă că după circa un minut de la administrarea microrăcitorilor nu se mai observă diferențe semnificative în ce privește variația temperaturii în masa de oțel.

Adaosul de microrăcitori în oțel conduce la apariția unui număr mare de centri de cristalizare uniformi distribuiți și conform literaturii de specialitate, stimularea germinăției eterogene conduce la o serie de avantaje: produce o creștere semnificativă a caracteristicilor mecanice concomitent cu scăderea valorii diametrului grăuntelui real, finisarea grăuntelui cristalin în timpul solidificării, creează premisele îmbunătățirii caracteristicilor mecanice, în special cele de plasticitate, prin îmbunătățirea la scară macroscopică a structurii semifabricatului, respectiv o reducere a dispersiei valorilor caracteristicilor mecanice.

7. CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI INDUSTRIALE REFERITOARE LA CALITATEA SEMIFABRICATELOR TURNATE CONTINUU

7.1. S.C.ArcelorMittal HUNEDOARA – Instalația de producere a oțelului lichid și a produselor din oțel

Liberalizarea completă a prețurilor materiilor prime, materialelor, energiei electrice precum și liberalizarea comerțului cu produse siderurgice (simultan cu un declin al cererii interne) au afectat o serie de agenți economici din ramura metalurgiei printre care și S.C. ArcelorMittal Hunedoara.

Necesitatea trecerii și adaptării producției S.C. ArcelorMittal Hunedoara la condițiile unei economii de piață, a determinat stabilirea unui nou program de orientare și optimizare a activității societății.

În acest sens, S.C. ArcelorMittal Hunedoara are în vedere o strategie care vizează în principal o serie de obiective:

- consolidarea poziției societății pe piața internă și externă;
- creșterea permanentă a calității produselor și alinierea la standardele europene, conform cerințelor pieței;
- realizarea unei activități profitabile.

În același timp evoluția descendentă a cererii de produse siderurgice, manifestată în mod constant de către solicitanți, atât pe piața internă cât și pe cea externă, a condus la reducerea producției de laminate și implicit la reducerea unor capacități de producție.

La S.C. ArcelorMittal Hunedoara, o serie de laminoare au fost dezafectate sau trecute în conservare, fiind necesară reorientarea fabricării unor produse laminate (din grupa profilelor mijlocii și grele) pe capacitățile de producție existente în prezent sau obținerea unor anumite tipodimensiuni din semifabricate turnate continuu.

Un astfel de exemplu sunt și tipodimensiunile Ø180mm, Ø250mm, Ø270mm și Ø310mm care făceau parte din structura sortimentală fabricată din blum la laminorul de profile grele (Ø180mm) și din lingou (Ø250mm, Ø270mm și Ø310mm) la laminorul de Ø800mm, tipodimensiuni care actualmente se obțin prin tehnologia de turnare continuă.

Ținând seama de cele prezentate anterior cât și de faptul că în prezent industria siderurgică se confruntă cu o recesiune economică pronunțată, cauzată de efectele negative, generate în primul rând de criza financiară mondială, precum și de nivelul destul de scăzut al rentabilității, relansarea economică în acest important sector industrial, care asigură de altfel baza de materii prime pentru majoritatea ramurilor economice ale țării, este dependentă în mod evident de adoptarea unor tehnologii performante, un loc central ocupând în cadrul acestora turnarea continuă a oțelurilor.

În concluzie, este necesară reconsiderarea unor soluții de îmbunătățire a performanțelor instalațiilor de turnare continuă precum și o diversificare a gamei

tipodimensionale care să determine un salt calitativ și economic în domeniul producției de oțel.

Având în vedere obiectivele propuse de către colectivul de conducere a firmei S.C. ArcelorMittal Hunedoara, precum și preocupările specialiștilor în domeniul dezvoltării tehnologiei turnării continue, prezenta lucrare, prin experimentările industriale urmărește posibilitatea definirii și catalogării defectelor specifice semifabricatelor turnate continuu, pentru a se putea depista sursa generatoare și a se aplica măsuri corecte de prevenire a acestora și remediere acolo unde este cazul.

Experimentările industriale s-au efectuat o perioadă de câteva luni pe platforma siderurgică a S.C. ArcelorMittal Hunedoara, perioadă în care s-au urmărit pe de o parte modul de elaborare și turnare al oțelului în semifabricate turnate continuu, iar pe de altă parte nivelul calitativ al acestor semifabricate determinat de numărul și natura defectelor depistate la recepția materialului metalic studiat.

7.1.1. Prezentarea S.C. ArcelorMittal HUNEDOARA

Situat într-o depresiune de-a lungul văii Cerna, orașul Hunedoara, această străveche vatră siderurgică, este astăzi reprezentată pe piața mondială a oțelului de către societatea comercială ArcelorMittal. Amplasată la ieșirea din municipiu între șoseaua Hunedoara - Sântuhalm și râul Cerna și organizat pe scheletul fostului combinat siderurgic, societatea rezultată în urma unei fuzionări franco-indiene deține o secție de oțelărie urmată de o turnătorie continuă precum și o secție de laminare destinată prelucrării prin deformare plastică la cald a semifabricatelor sub formă de blumuri (blumuri TC) în produse finite sub formă de profile simple, fasonate și speciale.

Produsul final realizat în urma procesului tehnologic la Oțelăria Electrică din cadrul ArcelorMittal Hunedoara este oțelul. Întreaga producție realizată o constituie oțelurile carbon, slab aliate și aliate.

Cuptorul Electric CE 3 de tip EBT a fost pus în funcțiune în anul 2002 și este un cuptor performant, capacitatea sa fiind de 550 000 t/an, iar greutatea șarjei de 100 t. Durata de elaborare a oțelului este de 75 minute, elaborarea fiind asistată de calculator. Cuptorul CE 3 este prevăzut cu o instalație de desprăfuire a gazelor arse cu dog house, concentrația de pulberi realizată la emisie având concentrații scăzute de 20 mg/m³.

Oțelul lichid se evacuează în oală, iar după terminarea tratării oțelului lichid în instalația de vidare, oala de turnare este preluată cu macaraua și așezată pe un transfercar care o transportă până în dreptul halei Mașinii de Turnat Continu (MTC); de aici este preluată de o altă macara care o așează pe unul din brațele turnului rotitor care o poziționează corespunzător pentru turnare.

Pe brațele turnului rotitor sunt montate dispozitivele de cântărire: diferența dintre greutatea oalei la începutul turnării și sfârșitul acesteia îl reprezintă cantitatea de oțel care s-a turnat. Printr-un tub ceramic de protecție oțelul lichid trece din oală în distribuitorul care-l repartizează pe cele cinci fire - tot prin intermediul unor tuburi ceramice. Ajuns în cristalizoare oțelul începe să se solidifice datorită faptului că printre pereții dubli ai acestora circulă apă de răcire.

La ieșirea din cristalizoare oțelul are deja la exterior o crustă solidificată și prin stropirea intensă în continuare cu jeturi de apă pulverizată sub presiune se solidifică până în centru.

Barele astfel formate, având forma secțiunii similară formei interioare a cristalizoarelor, sunt trase și ghidate în același timp de caje acționate de motoare electrice. O mașină de tăiere cu cinci posturi procedează la debitarea barelor la

7.1. S.C.ArcelorMittal HUNEDOARA – Instalația de producere a oțelului lichid 161
și a produselor din oțel

lungimile cerute. Barele sunt preluate pentru răcire și ajustare în vederea livrării directe la clienți (cazul țagtelor rotunde) sau sunt încărcate în cuptoarele cu propulsie de la secția LPG (cazul blumurilor) pentru încălzirea în vederea deformării plastice la alte dimensiuni solicitate de clienți .

În figura 7.1. am prezentat instalația de turnare continuă de la S.C. ArcelorMittal Hunedoara.

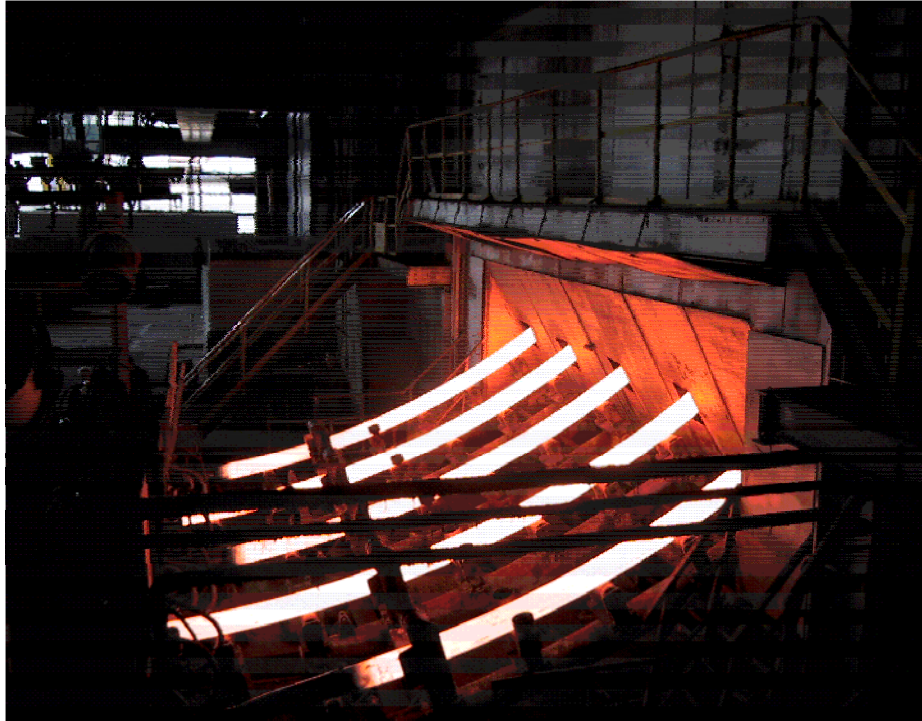


Figura 7.1. Instalația de turnare continuă-S.C. ArcelorMittal Hunedoara

Linia de turnare continuă se compune din următoarele:

- instalațiile de transport a oțelului lichid în oale din Oțelăria Electrica nr.2 până la linia de turnare;
- instalația de turnare propriu-zisă:
 - distribuitorul;
 - cristalizorul răcit cu apă de răcire în circuit închis;
- instalația de răcire secundară prin stropirea semifabricatului turnat cu apă industrială în circuit semideschis;
 - cazele de antrenare;
 - cazele de tragere;
- instalația de tăiere oxigaz a semifabricatelor turnate.

Oțelul este turnat din oală într-un distribuitor care asigură un debit controlat în cristalizoare de forma adecvată, răcite cu apă. Pentru a preveni lipirea crustei solidificate, cristalizorul oscilează în direcția de turnare cu viteza mai mare decât viteza de turnare și în cristalizor se adaugă un lubrifianț pulverulent. Cristalizatorul este componenta tehnologică esențială a mașinii de turnare continuă, care

determină forma secțiunii transversale a profilului turnat, realizând transformarea fazei lichide în fază solidă, printr-o răcire bruscă și dirijată în condițiile turnării de sus în jos, într-o cavitate cu pereți metalici dubli răciți cu apă.

Debitul apei de răcire, pentru un fir, diferă de la o tipo dimensiune la alta, valoarea lui fiind cuprinsă între $60 \div 65 \text{ m}^3/\text{h}$, la cristalizatorul pentru $\phi 180 \text{ mm}$, respectiv de $110 \div 125 \text{ m}^3/\text{h}$ la cristalizatorul pentru blum $240 \times 270 \text{ mm}$.

Firele sunt extrase și răcite în continuare folosind un sistem de jeturi directe de apă. Scopul răcirii secundare este de a continua răcirea profilului după ieșirea din cristalizator și să grăbească solidificarea completă a secțiunii transversale a semifabricatului. Răcirea în această zonă se realizează prin stropire directă cu apă sub presiune, prin duze astfel încât apa să fie capabilă să străbată stratul de abur format prin vaporizare și să asigure contactul continuu și permanent cu metalul.

Stropirea trebuie să asigure răcirea corespunzătoare unei căderi constante de temperatură de la ieșirea din cristalizator până la capătul zonei de răcire secundară. Solidificarea oțelului în cristalizator se realizează prin formarea unor cruste, a căror grosime crește datorită stropirii cu apă a profilului în zona de răcire secundară. Profilul este extras în continuare și este îndreptat datorită trecerii prin cajele de tragere - îndreptare, unde la ieșire se procedează la desprinderea capătului barei false. Debitarea semifabricatului (complet solidificat) la lungimi prestabilite ($5 \div 8 \text{ m}$) se face cu mașina de tăiat cu flacără. Țaglele (blumurile) tăiate se deplasează în continuare pe calea cu role până la opritoare, unde sunt preluate de transportoarele transversale cu clichetși și duse pe paturile de răcire.

7.2. Experimentări propriu-zise. Defecte de turnare specifice țaglelor turnate continuu

La S.C. ArcelorMittal Hunedoara din totalul producției de oțel turnat continuu, ponderea blumului turnat continuu reprezintă aproximativ $45 \div 60\%$ restul fiind țagle țevi destinate societății Petrotub Roman.

Pentru studiu s-au selectat doar șarjele de oțel din care s-au turnat țagle țevi R250mm respectiv R270mm. Pentru o analiză mai completă s-a recurs la utilizarea tuturor mărcilor de oțel (carbon, slab aliat respective aliat) din care se fabrică aceste două tipuri de țagle țevi. Oțelul elaborat care urmează a se turna continuu este destinat în principal obținerii de semifabricate pentru țevi ($\phi 180 \text{ mm}$, $\phi 250 \text{ mm}$, $\phi 270 \text{ mm}$ și $\phi 310 \text{ mm}$) și blum ($240 \times 270 \text{ mm}$), destinat relaminării ulterioare. Ponderea blumului turnat continuu din total oțel turnat continuu este de $50 \div 60\%$ restul fiind țagle țevi destinate societății Petrotub Roman (figura 7.2. unde 1 reprezintă blum, iar 2 - țagle țevi).

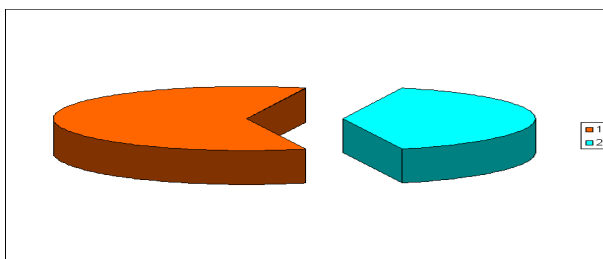


Figura 7.2. Ponderea blumului turnat continuu

Sortimental, oțelul ce urmează a se turna continuu se înscrie în categoria oțelurilor de masă, carbon superioare, slab aliate și aliate reprezentate în figura 7.3., unde 1 reprezintă oțeluri de masă: OLT35, OLT35MOD, 2 - oțeluri carbon superioare: OLT45, OLT45MOD, 3 - oțeluri slab aliate, tip Gr, G52, T52, etc., iar 4 - oțeluri aliate, tip T70.

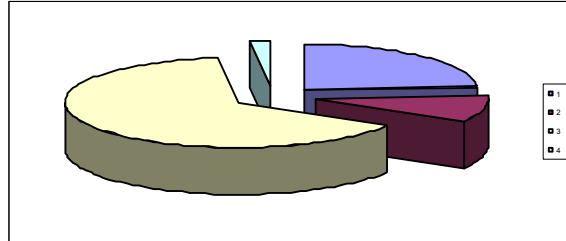


Figura 7.3. Ponderea oțelurilor de masă, carbon superioare, slab aliate și aliate turnate continuu

În vederea analizei influenței proceselor fizico-chimico-metalurgice ce au loc la interfețele cristalizator-zgură-oțel lichid asupra calității oțelului turnat continuu s-au prelevat date dintr-un lot de 55 șarje din diferite mărci de oțeluri din care s-au turnat continuu sortimentele RT250mm și RT270mm. În prezent tipo-dimensiunile turnate continuu pentru țagle țevi sunt: Ø180mm; Ø250mm; Ø270mm și Ø310mm, cu observația că: Ø150mm nu se mai toarnă, deoarece, din punct de vedere calitativ, se asigură un produs mai competent rezultat din laminarea pe Laminorul de Profile Grele din cadrul societății.

Ponderea sortimentală calculată pentru ultimii 3 ani ar fi următoarea (figura 7.4.):

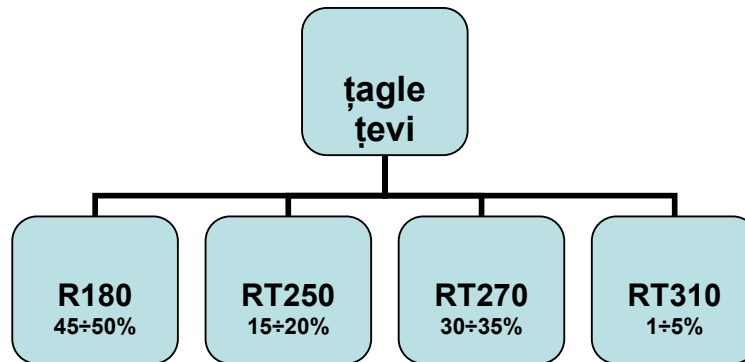


Figura 7.4. Ponderea sortimentală

Ponderea țagelor țevi cu Ø310mm este foarte mică, deoarece, această tipodimensiune se toarnă continuu din septembrie 2007, fiind încă în fază de experimentare. Ponderea privind tipodimensiunile și mărcile de oțel pentru țagle țevi diferă de la o lună la alta, funcție de cerințele beneficiarilor.

Compoziția chimică a celor 55 șarjelor este prezentată în tabelul 7.1

164 Cercetări și experimentări industriale referitoare la calitatea
semifabricatelor turnate continuu - 7

Tabelul 7.1.Compoziția chimică a șarjelor

Nr.crt.	Marca	C	Mn	Si	S	P	Cr	Cu	Mo	Ca	N	Al
1.	OLT35M	15	80	34	5	9	8	20	2	82	90	32/31
2.	OLT35M	16	68	29	4	17	10	23	2	91	93	56/54
3.	OLT35M	15	67	27	3	18	10	23	2	99	83	49/47
4.	OLT35M	14	63	23	5	14	7	22	2	>94	81	32/30
5.	OLT35M	15	61	30	6	10	8	20	2	163	83	40/37
6.	OLT35M	15	62	27	4	12	8	22	2	76	81	24/23
7.	OLT35M	17	62	21	3	12	8	20	2	132	76	46/43
8.	OLT35M	16	64	32	3	14	6	20	2	120	84	30/28
9.	OLT35M	14	64	35	4	12	6	20	2	77	66	28/26
10.	OLT35M	14	66	32	5	20	8	20	2	169	75	30/28
11.	OLT35M	15	66	32	6	18	6	20	2	120	70	35/33
12.	OLT35M	15	72	33	4	14	7	20	2	40	63	30/28
13.	OLT35M	15	70	25	4	16	8	22	2	60	70	43/41
14.	OLT35M	17	65	28	5	12	10	23	3	>63	68	30/28
15.	OLT35M	15	64	22	6	11	8	19	2	79	78	20/19
16.	OLT35M	16	61	34	9	18	9	20	2	148	76	34/32
17.	OLT35M	15	68	26	3	14	12	20	2	210	76	43/40
18.	OLT35M	15	65	26	4	16	8	20	2	83	77	26/24
19.	OLT35M	14	73	34	9	17	7	20	2	195	90	21/20
20.	OLT35M	14	63	30	7	15	7	20	2	105	81	46/45
21.	OLT35M	14	68	29	10	17	8	20	2	97	83	41/39
22.	OLT35M	15	74	32	10	17	9	20	2	168	80	41/39
23.	OLT35M	14	66	30	7	14	6	18	2	>150	82	37/35
24.	OLT35M	16	68	25	5	13	7	20	2	118	86	28/26
25.	OLT35M	16	68	29	7	10	4	15	2	187	87	43/41
26.	OLT35M	16	65	29	4	12	8	16	2	210	76	31/29
27.	OLT35M	14	63	25	9	10	6	16	3	188	82	31/29
28.	OLT35M	18	66	19	10	11	8	18	3	180	94	40/39
29.	OLT35M	14	63	29	7	11	8	20	4	200	85	32/29
30.	OLT35M	14	64	32	3	14	9	19	3	264	87	47/46
31.	OLT35M	17	70	26	7	13	7	14	3	128	87	33/31
32.	OLT35M	15	66	27	5	15	9	17	3	90	75	40/38
33.	OLT35M	15	62	32	10	17	10	18	2	178	73	46/44
34.	OLT35M	15	63	27	5	16	1M	17	5	105	85	47/45
35.	T52X	43	102	29	4	15	7	18	2	>54	-	21/19
36.	T52X	42	105	30	4	13	7	18	2	>93	-	27/25
37.	T52X	41	97	30	6	12	6	16	2	146	-	25/23
38.	T52X	41	99	32	4	18	9	20	2	>62	-	21/19
39.	T70	28	81	24	12	14	50	14	16	184	100	50/47
40.	T70S	31	79	25	6	15	54	16	15	120	34	29/27
41.	T70S	33	82	25	5	16	53	17	15	90	92	31/29
42.	T70S	31	85	24	7	15	53	16	16	240	92	32/30
43.	T70S	29	85	24	7	17	52	16	15	82	78	42/40
44.	OLT35	14	6	26	10	15	8	26	2	230	85	47/45
45.	OLT35	16	65	27	5	16	9	27	2	108	96	36/35
46.	OLT35	15	63	29	7	11	8	27	2	153	70	44/42
47.	OLT45M	19	107	35	3	11	5	18	2	32	79	12/10
48.	OLT45M	19	108	33	3	11	6	20	2	>96	85	33/30
49.	OLT45M	16	64	21	5	9	6	12	3	>88	87	38/36
50.	OLT45M	19	107	28	7	11	6	20	2	165	85	48/46
51.	G52M	15	116	24	3	10	7	18	2	93	82	8
52.	G52M	15	121	26	10	10	10	16	2	112	79	6
53.	G52M	15	115	26	3	9	7	13	2	72	94	8
54.	G52M	16	125	24	3	9	6	14	2	90	90	9
55.	G52M	16	117	22	3	10	6	15	2	110	82	8

Defectele de material la turnarea continuă a oțelului apar în timpul solidificării semifabricatului turnat continuu și a răcirii acestuia, conducând adeseori la importante pierderi metalice. Pentru a preveni aceste pierderi, scopul tehnologiilor metalurgice și a soluțiilor constructive este de a depista cauzele de apariție, de prevenire și îndepărtare a lor.

Conform literaturii de specialitate, defectul poate fi definit ca fiind orice abatere de la aspectul exterior, formă, dimensiune, macrostructură, caracteristici chimice, prescrise în standarde sau alte documente tehnice normative în vigoare. Defectele sunt constatate la recepția țagtelor prin controlul vizual al calității suprafeței acestora pe paturile de inspecție sau la controlul macrostructurii probelor în laborator.

Un defect nu este întotdeauna consecința unei cauze unice. De multe ori defectul este rezultatul interacțiunii mai multor cauze, acestea depinzând de un număr variabil de parametri.

Defecte similare, ca aspect exterior pot avea una sau mai multe cauze diferite, după cum defecte aparent diferite pot avea, între cauze, una sau mai multe cauze comune. De aceea 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, să ne reamintim câteva noțiuni teoretice principale privind modul de definire a acestor tipuri de defecte, subliniind deasemenea, cauzele generatoare precum și măsurile corecte de prevenire și remediere a acestora, acolo unde este cazul.

7.2.1. Defecte de suprafață

7.2.1.1. Crăpături

Crăpăturile sunt deschideri pe suprafața țaglei de lungime și adâncime variabile care uneori se extind pe toată țagla, pe un fir sau chiar pe o șarjă întreagă. Crăpăturile nu sunt întotdeauna drepte, uneori sunt întrerupte și continuă în zig-zag.

După direcția în care se formează pot fi:

a. *Crăpături longitudinale* (figura 7.5.) - se formează în direcția de extragere a firului din cristalizor, bara care prezintă acest defect de regulă rebutându-se integral.[65]

Cauzele care conduc la apariția crăpăturilor longitudinale sunt:

- 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);
- curgerea turbulentă a metalului și o variație a nivelului meniscului în cristalizator;
- răcirea secundară prea intensă sau neuniformă;
- uzura inegală și avansată a cristalizatorului care are ca urmare un coeficient de conductibilitate termic diferit;
- temperatura de turnare ridicată (nerespectare ΔT);
- viteza mare de extracție a firului;
- comportarea necorespunzătoare a prafului de turnare.[66]

Posibilele măsuri de remediere ale acestui tip de crăpături ar fi:

- centrarea jetului de turnare în cristalizor; menținerea unui debit de apă constant sau cu aceeași viteză de circulație pentru apă (controlul transferului de căldură în cristalizor);
- utilizarea unui praf de ungere adecvat mărcii și vitezei de turnare, pentru a crea un film uniform între crusta firului și peretele cristalizatorului și astfel să se obțină un transfer de flux termic uniform;
- reducerea la minimum a turbulenței și agitării suprafeței metalului prin optimizarea poziției duzei de intrare și a suportului acesteia;
- menținerea nivelului meniscului în cristalizor în limitele prescrise;
- răcirea prin spray-ere; corelarea debitului de răcire cu viteza de turnare;
- menținerea ΔT în limitele stabilite;
- corelarea vitezei de turnare, a ΔT , a debitului de apă de pulverizare (intensitatea și uniformitatea răcirii secundare);
- verificarea înainte sau după utilizare a gradului de uzură al cristalizatoarelor și a uniformității uzurii; monitorizarea uzurii/cristalizator;
- utilizarea corectă a prafului de ungere, infiltrarea uniformă a acestuia între cristalizor și stand.[67]



Figura 7.5. Crăpături longitudinale

b. Crăpături transversale (figura 7.6.) - sunt mai rar întâlnite la profile rotunde, ele apărând datorita tensiunilor pe direcția longitudinală a firului.

Se polizează dacă nu sunt adânci (în limitele admise de abaterile prescrise pentru diametru și ovalitate).

Cauzele care conduc la apariția crăpăturilor (fisuri) transversale sunt:

- tensiuni termice datorate nesolidificării uniforme a crustei precum și tensiuni adiționale datorate curgerii turbulente sub menisc, variația nivelului meniscului;
- adâncimea mărcii de oscilații, prezența pe fundul mărcii de oscilație a segregațiilor care se răcesc mai lent și slăbesc limitele grăuntelui austenitic;
- frecarea firului în cristalizor (la viteze de turnare mari, fluxul topit cuprins între peretele cristalizorului și crustă descrește, frecarea la margine crește proporțional cu vâscozitatea prafului utilizat) sau în segmentele cilindrilor.[68]

Măsurile de remediere ale acestor crăpături sunt următoarele:

- asigurarea unei răcirii primare și secundare uniforme, flux de praf topit uniform;
- controlul turbulenței 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, distribuția uniformă a prafului în cristalizor;
- întreținerea corectă a mașinii de turnare (aliniere corectă, calibrarea corectă a roților de extragere și neutilizarea de role de extracție uzate).



Figura 7.6. Crăpături transversale

c. *Crăpături stelare* (figura 7.7.) 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 adânc).

Cauzele care conduc la apariția crăpăturilor stelare sunt:

- răcirea locală intensă care induce tensiuni locale;
- prezența cuprului la limita grăuntelui austenitic.[69]

Câteva măsuri de remediere a crăpăturilor stelare sunt:

- reglarea corectă a orificiilor duzelor de pulverizare precum și corelarea debitului de pulverizare cu viteza de turnare (controlul automat al debitului);
- asigurarea unui strat (film) uniform de praf de turnare topit între fir și cristalizor;
- răcirea cu o intensitate moderată la ieșirea firului din cristalizator pentru a nu mări tensiunile termice determinând astfel dezvoltarea de crăpături.

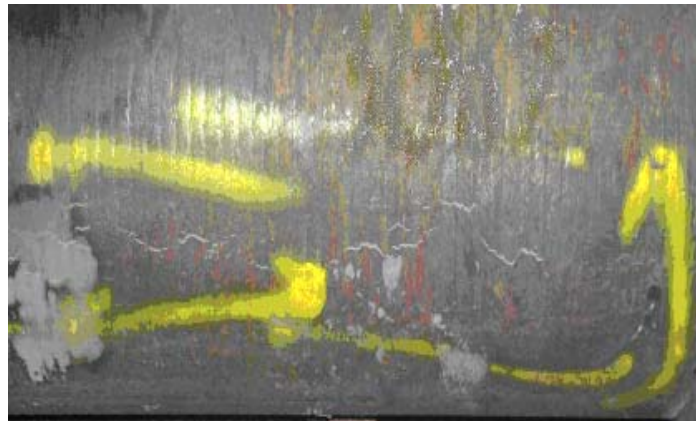


Figura 7.7 Crăpături stelare

7.2.1.2. Depresiuni

Depresiunile sunt deformații locale ale suprafeței firului turnat continuu și se pot dezvolta fie în direcția de tragere a firului (depresiuni longitudinale) fie în lungul mărcii de oscilație (depresiuni transversale).

Depresiunile longitudinale apar în general la țagtele rotunde din oțel carbon peritectic și au aspectul unor șanțuri superficiale orientate pe direcția de extragere a firului. Uneori acest defect este însoțit de zgura rezultată din praful folosit în cristalizor, fiind cunoscut și sub numele de banda de zgură.[77]

a. *Depresiunile longitudinale* (figura 7.8.) – apar datorita următoarelor cauze:

- transferul termic neuniform în cristalizor care determină dezvoltarea inegală a crustei marginale;
- 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 submeniscului;
- uzura inegală și avansată a cristalizorului care are ca urmare un coeficient de conductibilitate termică diferit.

Principalele măsuri de remediere a depresiunilor longitudinale sunt :

- răcire 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 minimă a turbulenței și agitării suprafeței prin optimizarea poziției duzei de intrare și a suportului acesteia;
- verificarea înainte sau după utilizare, a gradului de uzură al cristalizoarelor și a uniformității uzurii.



Figura 7.8. Depresiuni longitudinale

b. *Depresiunile transversale* (figura 7.9.) –se formează în direcția transversală și pot să apară ciclic în raport cu lungimea firului. Lățimea depresiunilor

poate să acopere câteva mărci de oscilație, iar adâncimea poate să ajungă la câțiva mm. Oțelurile peritectice cu %C scăzut și %Mn ridicat și cele inoxidabile sunt sensibile la formarea acestui tip de defect datorită contracțiilor mult mai mari intervenite la solidificare.[76]

Depresiunile preced apariția crăpăturilor longitudinale de contracție și a fisurilor interne marginale (subcutanate). Materialul cu acest defect se polizează local și ciclic pentru a verifica prezența fisurilor subcutanate. Se prelevează proba macro.

Cauzele care conduc la apariția depresiunilor transversale pot fi determinate de:

- fluctuația nivelului oțelului în cristalizor;
- cantitate prea mare de flux topit cuprinsă în spațiul dintre peretele cristalizorului și fir;
- curgerea turbulentă a oțelului la nivelul submeniscului.

Câteva măsuri de remediere propuse:

- controlul fluctuației nivelului oțelului în cristalizor, utilizarea unui cristalizor cu conicitate parabolică;
- utilizarea unui praf de ungere cu viteza de topire și vâscozitate adecvată;
- reducerea minimă a turbulenței și agitării suprafeței prin optimizarea poziției duzei de intrare și a suportului acesteia.

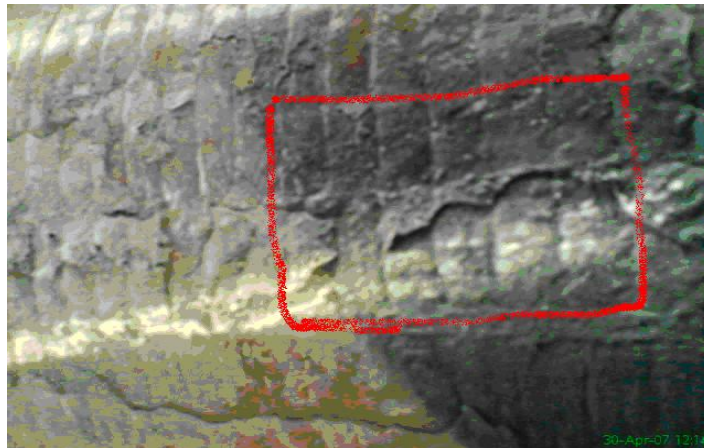


Figura 7.9. Depresiuni transversale

7.2.1.3 Găuri

Găurile (figura 7.10.) sunt cavități pe suprafața exterioară sau în zona subcutanată a țaglei la câteva zecimi de milimetri de suprafața standului. Au un diametru de până la 3mm și o lungime (adâncime) care poate să ajungă până la 25mm. Uzual ele conțin CO, relativ puțin H₂, Ar și de cele mai multe ori sunt asociate cu incluziuni. [87]

În cazul în care sunt superficiale și/sau puține, acestea se polizează (a nu se depăși valoarea permisă pentru abatere dimensională, după polizare).Sunt determinate de următoarele cauze:

- dezoxidare insuficientă a oțelului (prezența gazelor: hidrogen, azot, oxigen);

- umiditatea prafului de turnare, calitatea prafului de turnare (% carbon, vâscozitate, bazicitate), cantitatea și omogenitatea distribuției acestuia.
- variația nivelului oțelului în cristalizor;
- existența umidității în zidăria refractară a distribuitorului;
- prezența argonului intrat în cristalizor la injectarea cu argon pentru astuparea duzei.

Câteva măsuri de remediere a acestor defecte ar putea fi:

- dezoxidarea suficientă a oțelului prin utilizarea de materiale și adaosuri uscate precum și protejarea oalei și a distribuitorului;[85]
- utilizarea de praf de turnare uscat (și preîncălzit dacă este posibil) eventual alegerea unui praf de turnare compatibil cu marca de oțel, cu temperatura și viteza de turnare și bineînțeles corelarea cantității de praf de turnare cu viteza de turnare;
- controlul fluctuației nivelului oțelului în cristalizor pentru a preveni curgerea oțelului peste praful de turnare și înglobarea acestuia, controlul adâncimii duzei de imersie, utilizarea de duze fără defecte;
- evitarea temperaturilor înalte de turnare;
- menținerea debitului de argon sub valoarea critică, pentru a evita captarea de către menisc a bulelor de argon, zgura și spuma care se dezvoltă în jurul duzei.



Figura 7.10. Găuri

7.2.1.4. Întrerupere turnare

Întrerupere turnare (figura 7.11.) – acest defect este determinat de o scurtă întrerupere a procesului de turnare, iar defectul se elimină prin scurtarea barei care îl conține. Acest defect apare datorită variației bruște a vitezei de turnare datorate fie variațiilor de temperatură ale oțelului în distribuitor, fie variației nivelului în cristalizor fie modului de turnare (în mod manual).[84]

Principala măsură de remediere constă în menținerea constantă a vitezei de turnare prin asigurarea unui interval restrâns de variație a temperaturii în distribuitor, prin menținerea nivelului în cristalizor în limite prescrise precum și prin turnarea pe mod automat.



Figura 7.11. Întrerupere turnare

7.2.1.5. Retasura de capăt

Retasura de capăt (figura 7.12.) - 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 intensă.[86]

Măsuri de remediere folosite pentru acest tip de defect sunt următoarele:

- menținerea ΔT în limitele stabilite;
- corelarea vitezei de turnare, a ΔT și a regimului de răcire;
- reducerea vitezei de turnare;
- reducerea intensității răcirii, menținerea debitului de apă la limita minimă stabilită.



Figura 7.12. Retasură de capăt

7.2.2. Defecte interne

7.2.2.1. Fisuri

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

a. Fisuri interne marginale (figura 7.13.) - sunt fisuri scurte foarte aproape de suprafață, sub depresiune și pot fi cauzate de :

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



Figura 7.13. Fisuri interne marginale

Remedierea acestor tipuri de defecte poate fi făcută prin:

- respectarea valorilor maxime impuse pentru ΔT ;
- corelarea vitezei de turnare cu ΔT și debitul apei de răcire;
- reglarea corectă a orificiilor de pulverizare a apei de răcire pentru răcirea secundară;
- infiltrarea uniformă a prafului de ungere între cristalizor și stand.

b. Fisuri interne longitudinale - apar în zona centrală ca separații interdentrice.

c. Fisuri la centru (figura 7.14.) – fisuri interne care se extind în miez și care apar datorită următoarelor cauze:

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

Aceste defecte pot fi remediate dacă se respectă următoarele:

- menținerea ΔT în limitele stabilite;
- corelarea vitezei de turnare, ΔT și regim de răcire;
- reducerea vitezei de turnare.



Figura 7.14. Fisuri interne la centru

7.2.2.2. Microretasura

Microretasura (figura 7.15.) - reprezintă un gol de material în partea centrală a unei secțiuni transversale (proba), prelevate dintr-o bară de oțel. Apare ca urmare a contracției metalului la trecerea din stare lichidă în stare solidă.



Figura 7.15. Microretasura

Dacă diametrul golului nu depășește 5mm, intră în categoria imperfecțiunilor de material. Cauzele care conduc la apariția acestui defect sunt:
- temperatura de turnare ridicată;

- viteza de extracție ridicată;
- răcire secundară intensă;
- menținerea ΔT în limitele stabilite;
- corelarea vitezei de turnare, ΔT și regim de răcire;
- reducerea vitezei de turnare;
- reducerea intensității răcirii prin menținerea debitului de apă la limita minima stabilită.

7.2.2.3. Porozitate centrala

Porozitate centrala (figura 7.16.) – este o neomogenitate interioară a firului turnat continuu și poate fi însoțită uneori de retasură, având aceleași cauze de apariție. La încălzirea ulterioară se sudează și 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.

Remedierea acestor tipuri de defecte poate fi făcută prin:

- menținerea ΔT în limitele stabilite;
- corelarea vitezei de turnare, ΔT și regim de răcire ;
- reducerea vitezei de turnare;
- reducerea intensității răcirii prin menținerea debitului de apă la limita minima stabilită.



Figura 7.16. Porozitate centrală

7.2.2.4. Incluziuni

Incluziuni (figura 7.17.) – sunt impurități macroscopice și microscopice înglobate în mod nedorit în oțel.



Figura 7.17. Incluziuni

Apariția incluziunilor poate fi preîntâmpinată prin:

- dezoxidarea atentă a oțelului;
- protejarea jetului de oțel împotriva reoxidării;
- controlul fluctuației nivelului oțelului în cristalizor pentru a preveni curgerea oțelului peste praful de turnare și înglobarea acestuia în oțel;
- utilizarea de praf de turnare adecvat;
- evitarea variațiilor mari și dese ale vitezei de turnare;
- evitarea temperaturilor înalte de turnare;
- utilizarea de material refractar adecvat.

7.2.2.5. Segregațiile

Sunt generate de creșterea conținutului de C, Mn, P, S în miezul barelor de oțel și reprezintă neomogenități ale materialului rezultate la solidificarea oțelurilor ce conțin procente ridicate de carbon, mangan, fosfor, sulf.

Evitarea completă a segregațiilor nu este posibilă deoarece sunt condiționate de fenomene fizice la solidificare. Se poate atenua printr-o compoziție chimică omogenă, dezoxidarea cu siliciu, aluminiu, temperatura joasă de turnare. Atâta timp cât nu depășește anumite limite segregația nu este periculoasă.

Se pune în evidență prin metoda amprentei de sulf și se evaluează prin compararea cu anumite etaloane stabilite convențional.

7.2.3. Defecte de formă

7.2.3.1. Ovalizarea

Ovalizarea (figura 7.18.) – acest defect se concretizează prin abaterea de la forma geometrică ideală a țaglei și este însoțit adesea de fisuri interne. Se verifică încadrarea în dimensiunile stabilite pentru diametru și ovalitate.

Cauzele care produc acest defect sunt:

- răcire primară neuniformă precum și răcire secundară neuniformă și intensă;
- profilul cristalizatorului neadecvat sau uzura avansată a profilului cristalizatorului;
- nealinierea corectă a mașinii de turnare (cristalizer-role de susținere-cilindrii de extragere);
- poziția necorespunzătoare a rotelor, decalajul sau lipsa rotelor în stand.

Remedierea acestor tipuri de defecte poate fi făcută prin:

- centrarea jetului de turnare în cristalizer menținerea unui debit de apă constant sau cu aceeași viteză de circulație pentru apă, precum și verificarea orificiilor de pulverizare a apei pentru a asigura o distribuție uniformă a acesteia, corelarea debitului de pulverizare a apei cu viteza de turnare;
- verificarea înainte sau după utilizare a gradului de uzură al cristalizoarelor și a uniformității uzurii;
- alinierea corectă a mașinii de turnare precum și verificarea periodică a acestui aliniament;
- așezarea corectă a rotelor în stand.



Figura 7.18. Bare ovalizate

7.2.3.2. Curbura

Curbura (figura 7.19.) - acest defect este rezultatul unei încovoieri a barei de oțel sub propria greutate și este determinată de așezarea necorespunzătoare a barelor pe paturile de răcire.

Acest defect poate fi preîntâmpinat prin așezarea corectă a barelor pe paturile de răcire.



Figura 7.19. Bare prezentând defectul de curbura

7.2.4. Defecte mecanice

7.2.4.1. Urma de rolă

Urma de rolă (figura 7.20.) - acest defect se concretizează prin zgârieturi și imprimări continue sau periodice a rozelor pe suprafața materialului.

Dacă urma de rola nu este adâncă materialul se polizează cu condiția că după polizare să se verifice încadrarea țagei în dimensiunile stabilite pentru diametru și ovalitate.



Figura 7.20. Urma de rolă

Cauzele care conduc la apariția acestui defect sunt determinate pe de o parte fie de poziția necorespunzătoare a rozelor în stand fie de blocarea rozelor inferioare ale cajelor de tragere în tunder.

Poate fi posibilă și blocarea lagărelor rolor cajelor de tragere a firului, de asemeni s-au întâlnit și cazuri în care rolele au fost strunjite parțial (necorespunzător).

7.2.4.2. Presare rolă

Presare rolă (figura 7.21.) - depresiune longitudinală a materialului datorită presiunii exercitate de role.

Se verifică diametrul și ovalitatea, se prelevează proba macro și dacă materialul nu prezintă defecte interne și se încadrează dimensional se poate livra, bineînțeles, numai după polizarea marginilor ascuțite ale depresiunii. Acest defect apare datorită presiunii prea mare în cilindrul hidraulic (de pe cajă).



Figura 7.21. Presare rolă

Se poate remedia prin :

- monitorizarea presiunilor din cabina MTF pentru asigurarea unei presiuni optime de lucru a cajelor;
- reactualizarea schemei hidraulice a stației și înlocuirea actualelor distribuitoare cu altele fiabile.

7.2.5. Abateri de la compoziția chimică

Acest defect se întâlnește ca și o analiză chimică necorespunzătoare, adică neîncadrarea unuia sau a mai multor elemente în limita stabilită printr-un document tehnic în vigoare.

Abaterile pot proveni fie din fierul vechi utilizat (Cr, Ni, Mo, Cu, Sn) fie din elaborarea necorespunzătoare (S, P, N).

Materialul care prezintă acest tip de defect se livrează numai cu acceptul beneficiarului, iar dacă beneficiarul nu își dă acordul, materialul se rebutează.

7.3. Concluzii

Analizând factorii care determină apariția defectelor țagtelor țevi turnate continuu, rezultă că ponderea maximă o dețin, atât parametrii de turnare precum și compoziția chimică și gradul de puritate al oțelului. Pentru realizarea acestora, pe parcursul întregii turnări continue, trebuie sincronizați un număr mare de factori tehnologici, cei mai importanți fiind:

Compoziția chimică și gradul de puritate ale oțelului. Deoarece reprezintă unul din factorii principali (determină viteza de tragere a semifabricatului și previne apariția defectelor), compoziția chimică a oțelului care urmează a fi turnat continuu, trebuie să fie conform euronormelor actualizate pentru fiecare marcă de oțel, elementele chimice componente urmând să se încadreze în limite precise, prescrise de aceste standarde în vigoare. Astfel, conținuturile de S și P trebuie să fie foarte scăzute, fiind necesar să se asigure un conținut de $S < 0,015 \div 0,020$ % (respectiv o valoare a raportului $Mn/S > 25 \div 30$), un conținut de $P < 0,020 \div 0,025$ %, iar cele de As și Cu de max. 0,03 %.

Totodată, suma acestor patru elemente nu trebuie să depășească 0,067 %, respectarea acestor restricții conducând la reducerea cât mai mult posibilă a tendinței de formare a fisurilor. În cazul carbonului, se impune menținerea unor valori în limite foarte restrânse și cât mai apropiate de limita inferioară admisă, pentru marca de oțel elaborată.

Este necesară deasemenea, o dezoxidare avansată a oțelului cu siliciu, precum și limitarea conținutului de aluminiu din oțel (0,007 %), în scopul prevenirii depunerii de incluziuni Al_2O_3 în orificiul pâlniei de turnare (la intrarea oțelului în tubul protector) pentru a evita obturarea acestuia precum și pentru evitarea apariției microretasurilor în profilele turnate continuu.

Realizarea unui grad de puritate avansat cu un conținut scăzut de incluziuni oxidice în oțel, se obține dacă oțelul se dezoxidează și cu aluminiu în timpul tratării în oala de turnare, dacă se creează condițiile necesare pentru creșterea flotabilității Al_2O_3 solid format și dacă se iau măsuri de protecție a jetului de oțel lichid.

În urma dezoxidării cu aluminiu rezultă incluziuni de Al_2O_3 cu capacitate mai mare de decantare deci, cu posibilități mărite de reținere în zgura creată în timpul tratamentului de metalurgie secundară sau în distribuitor. Dimensiunea maximă a incluziunilor nemetalice remanente în oțelul lichid este determinată de timpul de staționare a oțelului în distribuitor, adică de viteza de turnare. Un nivel ridicat al oțelului în distribuitor favorizează flotarea acestor incluziuni.

Pentru a se asigura omogenizarea și ajustarea compoziției chimice a oțelului care urmează a fi turnat continuu, precum și omogenitatea termică, reglarea temperaturii de turnare și reglarea timpului de sosire a șarjei la turnarea continuă este foarte importantă respectarea parametrilor tehnologici specifici tratamentului în oală. Referitor la compoziția chimică a oțelului, se observă că fisurile longitudinale de suprafață ilustrate în figurile prezentate sunt mai frecvente la oțelurile carbon de uz general (exemplu OLT35 și OLT35MOD în cazul nostru), susceptibile la apariția acestui defect fiind oțelurile cu conținutul de carbon în intervalul 0,08...0,14 % adică acele din domeniul peritectic și oțelurile microaliate).

Tendința de fisurare longitudinală se accentuează (pe lângă faptul de creștere a vitezei și temperaturii de turnare) și datorită realizării unui raport mai scăzut Mn/C împreună cu un conținut mai ridicat de S în oțel obținându-se astfel și un raport scăzut Mn/S, pentru conținuturi de $S > 0,020$ %.

Temperatura de turnare. 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 ca, 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. Prin urmare, 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.

Menționez că temperatura de turnare trebuie să fie cu cel mult 40..60 °C mai mare decât temperatura lichidus, 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 răcitorilor consumabili.

Viteza de tragere. Valoarea vitezei de tragere v_{tr} trebuie să fie egală cu valoarea vitezei de umplere v_u și se fixează în corelație cu diametrul cercului înscris în secțiunea semifabricatului D_m înălțimea cristalizatorului, grosimea crustei marginale dorite și durata turnării. Cercetările experimentale efectuate și calculele statistice au arătat că v_{tr} scade cu creșterea D_m . Alegerea unei viteze mari de tragere conduce la scurtarea duratei turnării deci la creșterea productivității instalației dar și la micșorarea grosimii crustei marginale, la creșterea înălțimii cristalizatorului, a lungimii conului de oțel lichid.

Pentru evitarea acestor dezavantaje ar trebui mărită intensitatea de răcire, care ar favoriza și micșorarea zonei de transcristalizare. Pe de altă parte, o intensitate prea mare de răcire poate conduce la apariția fisurilor interne.

În alta ordine de idei, în urma experimentărilor industriale s-a observat că defectele cele mai frecvente sunt fisurile (crăpăturile) urmate apoi, ca și pondere din totalul defectelor înregistrate, de găurile de turnare. Prin urmare, pentru obținerea unor semifabricate competitive, de calitate superioară, se cere acordarea unei atenții deosebite, pe tot parcursul fluxului de fabricație a țagelilor, începând cu elaborarea oțelului lichid, tratamentul metalului în oală, protejarea acestuia împotriva oxidării până la pătrunderea în cristalizor, aplicarea unei tehnologii optime de turnare continuă (urmărirea comportării oțelului atât în distribuitor cât și în cristalizator) precum și așezării corespunzătoare a țagelilor turnate continuu pe paturile de răcire pentru a preveni încovoierea barei de oțel sub propria-i greutate.

De asemenea, 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.

8. CONCLUZII FINALE

Procesul de turnare continuă a oțelului, atât sub aspect tehnologic cât și a celui referitor la parametrii instalației de turnare continuă, a fost și reprezintă în continuare o preocupare de bază a tuturor specialiștilor din marile firme producătoare de oțel.

Crizele energetice mondiale, pretențiile asupra calității impuse de consumatori, necesitatea adaptării prețurilor la cererea pieții, au fost principalii factori care au stimulat dezvoltarea și generalizarea procesului tehnologic de turnare continuă, în ultimii 60-70 de ani.

Este de remarcat și faptul că la noi în țară s-a manifestat aceeași tendință, astfel că în anul 2000 producerea oțelului turnat continuu a reprezentat 73.1% din producția totală de oțel, cu mențiunea că producția totală de oțel din România a scăzut mult în ultimii ani.

Rezultatele experimentărilor, în mare parte aplicate în practică, sunt prezentate periodic la diverse manifestări internaționale, fapt ce constituie o baza solida de date pentru documentare, conducând implicit și la creșterea eficienței cercetărilor în acest domeniu. Câteva dintre principalele direcții de cercetare, abordate și prezentate la diverse manifestări științifice, se referă la:

- optimizarea prafurilor folosite la turnarea țagelor din oțel, având ca obiectiv studiul proceselor de lubrifiere și infiltrare a fluxului topit în cristalizator.

Acest proiect de cercetare a fost sponsorizat parțial de Comunitatea Europeană a Oțelului și Cărbunelui (CECO), actualmente EUROFER și realizat de firma spaniolă SIDENOR. În cadrul acestui proiect, s-a fost studiat mecanismul de lubrifiere a cristalizatorului pentru a preveni defectul de lipire a crustei de oțel și au fost propuse prafuri noi, performante, pentru a reduce forța de frecare în cristalizator precum și un nou model de oscilație.

Tehnologia de agitare electromagnetică a cristalizatorului a fost dezvoltată pentru a preveni separarea (închiderea, captarea) prafurilor în cristalizator, iar tehnologia de deformare mecanică ușoară pentru a reduce segregarea axei centrale.

- fenomenul macrosegregării fluctuante în turnarea continuă a făcut, de asemeni, obiectul unor cercetări intense în ultimele decenii, cercetări care s-au axat pe modelarea forțelor de antrenare ale fluxului de fluid interdendritic.

Un model general de macrosegregare a fost propus pentru prima dată de Flemings și Nero pentru a anticipa distribuția soluției solubile, pentru a trata sistemele multicomponente în vederea anticipării formării segregăției de tip canal și dezvoltat ulterior pentru a cuprinde efectele penetrării fluxului de lichid din regiunea complet lichidă din fața izotermei lichidus, în zona de interferență;

- îmbunătățirea porozității centrale prin agitare electromagnetică, deformare termică și mecanică ușoară, experiențe în acest domeniu fiind realizate în firma suedeză AB Sandvik Steel, Sandviken. Factorul cheie în aplicarea cu succes a acestei metode constă în controlarea procesului final al solidificării semifabricatelor turnate continuu.

- studiul mecanismelor de formare a microstructurilor în zona rece a oțelurilor turnate continuu.

Efectele parametrilor de proces și a mărcii de oțel asupra structurii de solidificare sunt teme de cercetare și în prezent.

Concernul francez USINOR SACILOR este preocupat de realizarea unor experimente care să analizeze transferul de căldură și fenomenul de subrăcire la contactul dintre oțelul lichid și stratul de sub suprafață.

Principiul acestor experimente constă în picurarea stropilor de oțel lichid pe straturile de sub suprafață instrumentate. Utilizarea modelelor numerice pentru a stimula creșterea grăunților în peliculă este de asemenea o problemă aflată în atenția specialiștilor;

- realizarea unor simulatoare matematice pentru anticiparea comportamentului metalurgic al oțelului în timpul turnării continue.

Cercetările au pus în evidență faptul că un cristalizor în formă de pâlnie prezintă mai multe puncte critice în adaptarea la turnare a diferitelor mărci de oțel, decât un plan convențional, în care doar conicitatea feței înguste trebuie corectată.

Pot fi de asemenea amintite și îmbunătățiri ale procesului de turnare continuă realizate de institute de cercetare

- La ISPAT SIDBEC INC., CONTRECOEUR WORKS din Canada a fost realizat un studiu al efectelor concurente ale agitării electromagnetice, intensității răcirii secundare și a supraîncălzirii distribuitorului asupra structurii de solidificare și a segregării carbonului în țagle din oțel cu conținut ridicat de carbon.

Îmbunătățiri marcante au fost obținute în ceea ce privește calitatea sârmei și a țagelor din oțel cu conținut ridicat de carbon ca rezultat al implementării în 1994 a agitării electromagnetice cu spiră dublă. Aceste experimente au demonstrat că o intensitate mărită a răcirii secundare modifică structura de solidificare realizată prin agitarea electromagnetică a cristalizorului și o răcire ușoară, de asemenea o creștere a intensității de răcire secundară are ca rezultat o reducere a segregării axei centrale.

- Studiul frecvenței de undă naturală ale fluctuației nivelului în cristalizator a fost realizat de Michel Cervantes și Haragan Gustavsson de la University of Technology Division of Fluid Mechanics din Suedia. Frecvența undelor naturale în cristalizator pentru turnarea continuă au fost derivate utilizând teoria undelor gravitaționale.

Controlul continuu al grosimii crustei de oțel, se pare că, este posibil în timpul procesului, printr-o analiză spectrală a fluctuației de nivel.

- Efectul fluxului de topire în cristalizator și a condițiilor de turnare asupra calității produselor turnate continuu a preocupat cercetători din Slovacia, țară cu tradiție de peste 100 de ani în elaborarea și laminarea oțelului.

Cercetările evidențiază modificarea conținutului de oxigen în țagle în funcție de modul de turnare și de construcția distribuitorului cu diferite praguri și deversoare.

- Studiul formării retasurii dispersate și a segregățiilor centrale în țagelile turnate continuu a preocupat pe specialiștii de Institutul Royal de Tehnologie din Stockholm.

Segregarea liniei centrale în țagle, blumuri și sleburi din oțel turnat continuu este o problemă vastă. Formarea retasurilor de dispersie este influențată de condițiile de turnare și de răcire, contracția termică având un efect extraordinar asupra formării retasurii dispersate.

- Turnarea fără personal este un obiectiv pe termen lung.

Nici o companie nu a atins acest obiectiv, dar există numeroase realizări în acest sens. Majoritatea acestora se bazează pe dezvoltarea mecanizării și automatizării la turnătoriile continue.

- Turnarea în secvențe lungi (peste 100 șarje) practică în America a fost aplicată și de producătorii de oțel din Europa, în special la turnătoriile de brame, dar cu intenția de extindere a procedurii și la țagle.

Turnarea în secvențe lungi permite o utilizare maximă a timpilor și capacităților de lucru, conducând astfel, la costuri de producție reduse.

- În timpul procesului de turnare, se pot forma fisuri datorită deformărilor mecanice sau tensiunilor cauzate de temperatură în crusta de oțel solidificat.

Pe baza experienței în funcționare, atenția s-a îndreptat spre controlul mai exact al transferului termic, în special în zona de răcire primară dar și în zona secundară de răcire.

Producătorii de oțel din Europa au extins modele tehnice deja existente pentru a reduce riscul de apariție a fisurilor și pentru un control mai bun al adânciturilor la suprafață.

O metodă de bază este monitorizarea termică a cristalizorului care, în multe cazuri, constă în extinderea sistemului de detectare a întreruperilor în semifabricat prin adăugarea mai multor termocuple. British Steel utilizează un sistem de monitorizare termică a cristalizorului.

Noile concepte au prezentat interes, spre exemplu în Japonia, unde prin aplicarea unui câmp magnetic de curent continuu în zona meniscului, se poate măări spațiul de infiltrare a pulberilor și adâncimea fisurilor de oscilare.

- În Europa, procesul de turnare cu cap de alimentare s-a dezvoltat pe scară industrială. Prin introducerea capului de alimentare (fabricat din material refractar) deasupra cristalizorului, se separă meniscul de momentul solidificării. Procesul a fost testat la turnarea continuă țagelilor, având ca rezultat reducerea adâncimii urmelor de oscilare (de 2 sau 3 ori).

- În ultimii ani în Europa și Asia, atenția s-a îndreptat spre controlul debitului de lichid din cristalizor. Frâna electromagnetică este o modalitate de a obține acest control.

Producătorii de oțel turnat continuu din Asia de Sud-Est au aplicat acest dispozitiv pe scară largă, atât la instalațiile cu fir curb cât și la cele verticale.

- Pentru a îmbunătăți separarea incluziunilor, Kawasaki Steel a dezvoltat distribuitorul rotativ. Prin aplicarea unui câmp magnetic rotativ, este regenerată o curgere turbională. Există astfel posibilitatea de a îndepărta aproximativ 50% din incluziunile introduse în distribuitor.

Distribuitorul rotativ se aplică acum la producția de oțel inoxidabil.

O altă metodă de îmbunătățire a purității oțelului care părăsește distribuitorul este aplicată și de Kawasaki Steel.

Prin utilizarea unui radiator cu jet de N_2 , rata de apariție a incluziunilor a fost redusă. Prin trecerea la duze imersate din material refractar cu mai puțin siliciu se introduc bule mici de argon în cristalizor, obținându-se astfel o reducere notabilă a defectelor. Această metodă se aplică acum la instalația de turnare continuă din cadrul Nippon Steel Nagoya Works.

Analizând datele și informațiile rezultate, se poate spune că, în domeniul turnării continue, îmbunătățirea tehnologiei este o condiție obligatorie, dar trebuie evidențiat și faptul că adesea costurile și calitatea sunt părți ale aceleiași monede, asigurarea unei calități corespunzătoare fiind strâns legată de reducerea costurilor.

Au existat importante preocupări la nivel mondial pentru perfecționarea procesului tehnologic de turnare continuă, preocupări în primul rând în domeniul cercetării. Aceste cercetări pot fi grupate astfel:

1. Preocupări care se referă la construcția agregatelor de turnare continuă, cum sunt:

- sisteme de producție a jetului de oțel între oala de turnare și distribuitor, între distribuitor și cristalizor;
- realizarea de mașini de turnare continuă cu fir curb;
- sisteme de susținere a oalei de turnare cu turn rotitor, cu sau fără brațe basculante;
- distribuitoare de construcție complexă care permite controlul temperaturii și presiunii operației de rafinare și modificare;
- cristalizoare cu sisteme automate de lubrifiere, dispozitive de oscilare, de măsurare a nivelului oțelului, de agitare electromagnetică;
- bare false rigide și role de susținere care măresc suprafața de răcire secundară;
- caje de tragere dotate cu aparatură de măsură și monitorizarea parametrilor de lucru;
- soluții de tăiere oxi-gaz și mașini automate de marcat, etc.

2. Preocupări care se referă la îmbunătățirea tehnologiei și a calității produselor:

- creșterea productivității prin mărirea vitezei de tunare;
- controlul calității structurii interne și a suprafeței, toleranțele dimensionale în limite foarte strânse;
- în domeniul turnării, turnarea deschisă, care permite adăugarea diferitelor elemente de aliere și modificare, inclusiv alierea cu aluminiu în cristalizor prin introducerea progresivă a aluminiului sub formă de sârmă;
- optimizarea prafurilor și a întregului mecanism de lubrifiere a cristalizorului;
- agitarea electromagnetică;
- fenomenul segregării a polarizat multe cercetări, ajungându-se până la crearea unui model care să permită anticiparea formării segregatei;
- studii referitoare la formarea microstructurii în zona rece a semifabricatului;
- probleme legate de răcirea primară și secundară și corelația acestora cu formarea structurii de solidificare;
- realizarea unor modele matematice pentru anticiparea comportamentului metalurgic al oțelului;
- probleme legate de automatizarea și robotizarea unor operații tehnologice (pornirea automată a turnării, alimentarea automată a turnării cu praf de lubrifiere, schimbarea robotizată a duzelor, măsurarea continuă a temperaturii în distribuitor și cristalizor, detectarea automată a avariilor, debavurarea automată, etc.).

Multe din preocupările enumerate sunt încă confidențiale, literatura de specialitate oferind îndeosebi date generale și mai puține soluții concrete.

În România metalurgia s-a dezvoltat în mod eșalonat, ca o necesitate a susținerii celorlalte ramuri.

Părerea exprimată uneori că industria siderurgică nu era necesară, trebuie reconsiderată, deoarece oțelul este încă un produs care determină puterea economică a unui stat.

Dacă în țările vest-europene, prin re tehnologizare s-a îmbunătățit structura producției, majorându-se ponderea oțelului aliat, inox și a produselor cu valoare adăugată mare, în România ponderea oțelurilor aliate a scăzut de la 8.5% în anul 1989, la 3.4% în anul 2001.

În privința cercetării științifice experimentale, datorită faptului că este un domeniu greu abordabil din cauza acurateții maxime care trebuie acordată experimentului, a costurilor deosebit de ridicate, realizările la noi în țară sunt modeste.

În stabilirea liniei de cercetare proprie am plecat de la concluziile pe care le-am desprins în urma cercetării bibliografice, ținând cont de următoarele:

- conform studiilor de cercetare efectuate pe plan mondial, a experimentelor industriale, precum și a opiniilor avizate ale specialiștilor, calitatea semifabricatelor turnate continuu din oțel este influențată în mod deosebit de doi parametri de turnare, temperatura oțelului lichid și răcirea secundară;
- parametrii procesului de turnare continuă a oțelului reprezintă factorul definitoriu al conceptului, influențând întreaga tehnologie de lucru cu repercursiuni nemijlocite asupra calității semifabricatelor și asupra indicatorilor tehnico-economici;
- în contextul unei concurențe acerbe pe piața oțelului, cunoașterea modalităților de influențare a factorilor tehnologici asupra calității semifabricatelor turnate continuu este de foarte mare importanță.

În concluzie a fost adoptată următoarea linie de cercetare:

- transferul de căldură;
- lubrifierea;
- evoluția frontului de solidificare;
- solidificarea cu adaos de microrăcitori.

Având în vedere părerile emise de cercetători, în urma preocupărilor în domeniul dezvoltării tehnologiei turnării continue și ținând cont de rezultatele experimentărilor industriale de la S.C. ArcelorMittal Hunedoara se pot concluziona următoarele:

- în vederea obținerii unor semifabricate turnate continuu de bună calitate, nu se poate accepta turnarea oțelului cu compoziție chimică neomogenă, cu grad ridicat de supraîncălzire și respectiv, cu conținut ridicat de incluziuni nemetalice, în special oxidice. În acest sens sunt necesare următoarele:

- controlul procesului de turnare pentru a obține valori totale reduse de oxigen în distribuitor ($O_2 \text{ tot} < 20 \text{ ppm}$);
- minimizarea antrenării zgurii de la oală la distribuitor și de la distribuitor la cristalizator;
- minimizarea reoxidării în distribuitor, duză și cristalizator;
- îmbunătățirea fluxului de lichid din cristalizator pentru o plutire maximă și captare minimă a pulberilor din cristalizator.
- defectele de material, la turnarea continuă a oțelului, apar în timpul solidificării și răcirii semifabricatului turnat continuu și de aceea este necesar să se asigure toate condițiile necesare desfășurării unui proces de solidificare corespunzător;
- o intensitate mărită a răcirii secundare modifică structura de solidificare realizată prin agitarea electromagnetică a cristalizatorului și o răcire ușoară;
- o creștere a intensității de răcire secundară are ca rezultat o reducere a segregării axei centrale;
- pentru produse turnate continuu de bună calitate este necesară o îmbunătățire a porozității centrale care poate fi realizată prin agitare electromagnetică și/sau deformare termică;
- este necesară optimizarea prafurilor de turnare în cristalizator, pentru a preveni defectul prin lipire la turnarea semifabricatelor.

Se indică utilizarea prafurilor noi, performante pentru care cu cât va fi mai scăzută temperatura lichidului a oțelului și mai mare viteza de turnare, cu atât va trebui să se topească mai repede praful (acesta însemnând o viteză înaltă și o temperatură scăzută de topire).

În studiul efectuat privind influența prafurilor asupra procesului de turnare continuă, s-au evidențiat factorii ce determină caracteristicile acestor prafuri, în mod deosebit vâscozitatea. Am ales acest parametru calitativ, deoarece el influențează în cea mai mare parte calitatea ungerii și prin aceasta calitatea semifabricatului turnat continuu.

- barbotarea cu argon a oțelului, atât pentru degazare cât și pentru eliminarea incluziunilor nemetalice. La turnarea continuă, dacă conținutul de gaze este foarte ridicat, există pericolul apariției porilor în proporție mare pe centrul semifabricatului, motiv pentru care oțelurile turnate continuu trebuie să fie barbotate.
- ecartul valorilor de exploatare a parametrilor constructivi și funcționali ai instalației de turnare continuă prezintă o importanță deosebită asupra calității suprafeței semifabricatului cât și asupra calității interne a acestuia.
- prin adaosul de microrăcitori se obține o reglare a temperaturii în cristalizor în funcție de calitatea și cantitatea de microrăcitori administrată.60

BIBLIOGRAFIE

1. Guțu M., Takacs O. - Turnarea continuă și emicontinuă a materialelor metalice, Editura Tehnică București 1977
- 2.*** - Documentația tehnică a firmei Manesmann, 2000
- 3.*** - Turnarea continuă. Limite calitative ale extinderii procedurii. Studiu de sinteză. Oficiul de documentare Publicații Tehnice ale industriei metalurgice 1973
4. Chira I. ș.a. - Procedee speciale de turnare, EDT București 1980
5. Butnariu I., Geantă V., ș.a.- Turnarea continuă a semifabricatelor de oțel, ET București 2000
6. Gh. Iorga, A. Iancu - Stage in exploitation practice of the continuous moulding proceeding, Metalurgia Nr.7, 1999
7. M Bordej, A Ciurea - Influence of the cooling process on the evolution of the solidified crust during the continuous casting of the steel slabs, Metalurgia Nr.4, 2004
8. Birat J. - The continuous casting steel, Ecole d'été Carry-le Rouët, France, 1985
9. Ferguson H. - Physical modelling of continuous casting - Steel Technology, Anglia 1995
10. Chițu Ghe. - Realizări în domeniul turnării continue la nivel mondial și în România Metalurgia Nr. 5, 2004
11. Chițu Ghe. - Cercetări privind îmbunătățirea structurii producției de oțel în România și la nivel mondial, Metalurgia Nr. 5. 2003
12. Dragomir I. - Teoria proceselor siderurhice, Editura didactică și Pedagogică, 1985
13. Ardelean, E. - Turnarea semifabricatelor de oțel, Ed. Mirton Timișoara, 2004.
14. Socalici, A. - Structura lingourilor de oțel, Ed. Mirton Timișoara, 2004
15. Ardelean, E., Hepuț, T., Ardelean, M. - Turnarea continuă a oțelului, Ed. Politehnica Timișoara, 2001
- 16.*** - "Stadiul tehnologic actual și tendințe de viitor in turnarea continuă", în Sinteze - Documentare, 1973.

-
17. Oprea, I., ș.a. – Optimizarea proceselor metalurgice, E.D.P., București, 1982.
 18. Rutes, V.S., Evteev, D.P. – Cercetarea procesului de turnare continuă a oțelului, în Turnarea continuă a oțelului, Traduceri din literatura sovietică de specialitate și articole românești, Seria Tehnică
 19. Luca, A. - Considerații teoretice asupra prafurilor pentru turnarea continuă a oțelurilor, în revista Metalurgia nr.5/1979
 20. Oprea, F. - Teoria proceselor metalurgice, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1978
 21. Rău, A., Tripsa, I. - Metalurgia oțelului, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1973
 22. Teoreanu, I. - Bazele tehnologiei lianților, Ed. Tehnică, București, 1983
 23. *** Prospect Concast AG, Zurich
 24. Kunico, K., ș.a. - Proprietățile fizice și chimice ale prafurilor pentru turnarea continuă, Nippon Steel Technical Report, nr.34/1987
 25. Thomas, B. G. - "Continuous Casting: Modeling", The Encyclopedia of Advanced Materials (Dantzig, J., Greenwell, A., Michalczyk, J., eds.), Pergamon Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, Vol. 2, 1999
 26. Fic, A., Nowak, A. J., Bialecki, R. - "Heat Transfer Analysis of the Continuous Casting Process by the Front Tacking BEM", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 24, p. 215-223, 2000
 27. *** - Instrucțiuni tehnologice pentru turnarea continuă a blumurilor
 28. S.Kumar, J.A.Meech, I.V.Samarasekera - Development of intelligent mould for online detection of defects in steel billets, Iron & Steelmaking, 1999 vol.26.
 29. M.Réger - A folyamatos öntés modellezése V/3 részjelentés, Dunaújváros, 1999
 30. G.Fehérvári - Acélok folyamatos öntésének matematikai szimulációja, Poszterelőadás, BAYATI, 2001.
 31. M Bordei, A Ciurea – Influența regimului de răcire asupra evoluției crustei solidificate la turnarea continuă a bramelor din oțel, Metalurgia Nr. 4, 2004
 - 32.***- International Iron and Steel Institute-Steel Statistical Yearbook 2002, Committee on Economic Studies, Brussels 2002
 33. *** - Continuous casting of steel 1985 – A Second Study, International Iron and Steel Institute, Brussels, 1986

34. *** - Continous Casting Conference, Linz, 1996
35. *** - La Revue de Metalurgie, nr.4, 1997
36. *** - Revista Metalurgia, nr.3, 2001
37. *** - Revista Metalurgia, nr. 12, 2001
38. *** - Revista Metalurgia, nr. 8, 2002
39. *** - Revista Metalurgia, nr. 9, 2002
40. *** - Revista Metalurgia, nr.10, 2002
41. *** - Revista Metalurgia, nr.1, 2003
42. *** - Sthal un Eisen 103, No.10, 1983
43. *** - Steel Times International, Sew\pt. 1981
44. *** - Steel Tehnology Styhal Internațional, 1998
45. Iancu A. - Soluții de proiectare a jetului de oțel lichid la turnarea continuă în relație cu calitatea semifabricatelor, București 1998
46. Iancu A. - Experimentări industriale de evaluare a variantelor tehnologice de protecție a jetului de oțel la turnarea continuă, București
47. Iancu A. - Experimentări industriale de corelare a parametrilor tehnologici cu indicatorii de calitate ai semifabricatelor turnate continuu, 1994
48. Zirbo G., Piper N., Piper M. - Mathematical Modeling of Heat Transfer in Continous Casting of Steel Billet, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, 2001
49. Zirbo G., Piper N. - Turnarea continuă cu solidificare sub menisc, Revista de turnătorie nr. 2, 2002
50. Zirbo G., Piper N., Piper M. - Considerații asupra procesului de lubrifiere la turnarea continuă a oțelului , Sebeș 2002
51. *** - Eurofer, anual report, Bruxelles, 2000
52. Ivănescu Al., Albu I. - Model matematic al distribuției temperaturilor la produsele obținute prin turnare continuă, Metalurgia nr.9, 1983
53. *** - Documentația tehnică a firmei Danieli, 2002
54. Ardelean E, Hepuț T., Ardelean M., Josan A. - Mathematicl solidification model of continous casting steel product, International Symposium Young people and multidisciplinary researc România -Serbia & Montenegro - Hungaty, Timișoara, 2004

-
55. Thevoz, P., Gaumann, M., Gremaud, M. - The Numerical Simulation of Continuous and Investment Casting, An Article from the JOM-e: A Web-Only Supplement to JOM, January 2002
56. Bratu, C. - Stabilirea parametrilor tehnologici la turnarea oțelurilor cu microrăcitori, *Metalurgia*, Nr.12, 1979, pag.603
57. Socalici A. , Abrudean C. Ardelean E., Hepuț T. - Researches concerning the influence of solidification process about the quality of Semi-manufactured good continous casting, *Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timișoara*, 2005
58. Ardelean E, Socalici A., Hepuț T., Ardelean M. - Research regarding the temperature influence on continuous casting process, *Scientific Bulletin of the „Politehnica” University of Timișoara*, 2005
59. Varga B., Varga I. - Studiu asupra formei conului de solidificare la turnarea continuă , *Metalurgia* , nr.4, 1982
60. Suzana Gâdea - Manualul inginerului metalurg, Editura Tehnică București 1979
61. Kodaman Hideyo - Solidificarea unei țagle de oțel din cristalizorul unei mașini de turnat continuu de tip rotativ, *Transaction of the Iron and Steel Institute of Japan*, nr.2, 1983
62. Hepuț T., Petre D., Karsai E., Socalici A. - Research work concerning the improvement of special technological characteristics, *Buletinul UPT, Tom 39 (53)*, fascicola 2, 1999
63. Ilca I., Hepuț T., Karsai E., Oargă N. - Research of the metal consumption, wwith continous casting, *Buletinul UPT, Tom 42 (26)*, fascicola 1, 1997
64. Socalici A. , Abrudean C., Hepuț T. - Simulation solidification of continous casting steel product using micro-coolers in crystallize, *Annals of the Oradea Univrsty, Volume V(XV)* 2006
65. *** - Proiectarea și punerea în funcțiune a mașinii de turnare continuă a bramelor, *Revue de Mettalurgie nr.1*, 1998
66. *** - Buletin tehnic informativ nr.1, 1998
67. *** - Buletin tehnic informativ nr.1, 1995
68. *** - *Economic Studies, Brusses*, 2001
69. Hepuț T., Ardelean E, Socalici A., Popa E. - Experimentări și rezultate cu privire la lubrefierea la interfața cristalizor - semifabricat turnat continuu, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Tomul III, Fascicola 1*, 2001

70. Oargă N., Hepuț T., Ardelean E, Popa E. – Studiu privind defectele interne a semifabricatelor turnate continuu, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Tomul III, Fascicola 1, 2001
71. Oargă N., Hepuț T., Ardelean E, Popa E. – Studiu privind defectele de suprafață a semifabricatelor turnate continuu, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Tomul III, Fascicola 1, 2001
72. Popa E., Mihuț G. – Simulation of the continuously cast semi-products in the case of introduction of consumable micro-coolers, Novi Sad, 2008.
73. Asimilarea în fabricație a prafurilor de turnare, folosite la turnarea continuă a oțelului, Program CD ORIZONT 2000/2001 Nr.1455.
74. Popa E.M., Kiss I., Danciu A. - The thermal regime in the continuous casting process- in mathematical interpretations - ANNALS OF FACULTY OF ENGINEERING Hunedoara, 2005, Tome III, Fasc 3, Pp 235...242, ISSN 1584 – 2673
75. Popa E., Kiss I. - Mathematical Modelling Of The Thermal Regime In The Continous Casting Process - Popa E., Kiss I. ANALELE UNIVERSITĂȚII "Eftimie Murgu" Reșița, 2005, Pp 231-237, ISSN 1453 – 7394
76. Popa E., Kiss I., Danciu A. - Research Of Experiments Regarding The Influence Of Casting Parameters Upon The Surface Temperature Of The Continous Caste Semiproduct. - ANNALS OF ORADEA UNIVERSITY, Fascicle Of Management And Technological Engineering, 2005, CD, ISSN 1583 – 0691
77. Hepuț T., Kiss I., GavanescuA., Ardelean M., Popa E. - Improving the processing easiness of steels for metal constructions-Scientific Conference Research And Development Of Mechanical Elements And Systems Jahorina – Irmes, Sarajevo, 2002, BOSNIA, Pp 343...348
78. Hepuț T., Kiss I., Popa E.,Ardelean E., Ardelean M. - Research and experiments regarding the quality of continuous cast steel- Scientific Conference Research And Development Of Mechanical Elements And Systems Jahorina – Irmes, Sarajevo, 2002, BOSNIA, Pp 349...354
79. *** - Morga Construction Company, 1995
80. Popa E., Kiss I., Mihuț G. - Researches regarding the quality of the continous cast semi-finished products- Management Of Manufacturing Systems MMS-2008 – 3rd Conference With International Participation, Presov, SLOVAKIA, 187...190 ISBN: 978 – 80 – 553 – 0069 – 6
81. Popa E., Kiss I. -" Mathematical modelling of the thermal regime in the continous casting process- TINERII SI CERCETAREA", Al Vii-Lea Simpozion International – Resita, 2005, ISSN 1453 – 7394
82. Erika POPA - Transferul de masa în stratul de praf de turnare în cristalizorul instalatiei de turnare continuă, Analele Facultatii de Inginerie Hunedoara, 2003, Tomul V, Fascicola 3, pg.225-228

-
83. Erika POPA Imre KISS, Adrian DANCIU - Influenta parametrilor turnarii asupra temperaturii suprafetei semifabricatului turnat continuu, Analele Facultatii de Inginerie Hunedoara, 2003, Tomul V, Fascicola 3
84. Erika POPA - Rezultate experimentare privind influența parametrilor turnării asupra temperaturii suprafeței semifabricatului turnat continuu A X-a Sesiune de comunicări științifice cu participare internațională, SIBIU 2005.
85. Erika POPA - Considerations on the mass transfer in and above the layer of casting powder, in the crystallizing vessel of the continuous casting machine, Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timișoara Transactions on Mechanics Special Issue, 2005
86. Erika POPA - Study regarding the mass and heat transfer in the crystallizing vessel of the continuous casting machine, ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY 2006, Vol. V
87. Erika POPA Gabriela MIHUIJ - The influences of the casting parameters upon the surface temperatures of the continuous cast semiproducts, Analele Universitatii "EFTIMIE MURGU" Reșita 2006.
88. Socalici, A. - Contract de cercetare nr.3196/13.10.2005, Programul CEEEX 2005, Cercetări și experimentări privind îmbunătățirea structurii semifabricatelor turnate continuu, director de grant.
89. Ardelean, E., ș.a., Technological parameters interaction over quality of continuous cast semi-finished products, Industrial Practical Conference „Machines, Technologies, Materials 06”, Sofia, Bulgaria.
90. Socalici, A., Respects regarding the usage micro-cooler to casting steel, 10th International Research Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”TMT2006, Barcelona-Loret de Mar, Spain, 2006.
91. Socalici, A., ș.a. Settlement possibilities of steel temperature in crystallize, 10th International Research Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”TMT2006, Barcelona-Loret de Mar, Spain, 2006.
92. Socalici, A., Simulation of the continuous cast blank solidification using micro-coolers in crystallizer, Fourth International Conference on Materials and Manufacturing Technologies MATEHN'06, Cluj- Napoca.
- 93.. Socalici, A., Simularea solidificării semifabricatelor turnate continuu cu adaos uniform de microracitori in cristalizor, Sesiunea anuală de comunicări științifice „IMT ORADEA 2006”.
94. Oprea, C., Ristea, M. – Bazele contabilității, Ed. Didactică și pedagogică, București 2003.
95. Brian, G. T. - Casting Process Simulation and Visualization, A JOM-e Perspective, JOM: HTML Enhanced Articles, January 2002, pag. 33.

96. Cross, M., Bailey, C., Pericleous, K., Williams, A. - The Multiphysics Modeling of Solidification and Melting Processes, An Article from the JOM-e: A Web-Only Supplement to JOM, January 2002, pag. 50.
97. Thevoz, P., Gaumann, M., Gremaud, M. - The Numerical Simulation of Continuous and Investment Casting, An Article from the JOM-e: A Web-Only Supplement to JOM, January 2002, pag. 65.
98. Byrne, P., ș.a. - Solidification control by numerical optimization, Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
99. Chelu, Gh. - Modelarea și optimizarea proceselor de prelucrare plastică la cald, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 2002.
100. Raj, B., ș.a. - Assessment of microstructures and mechanical behaviour of metallic materials through non-destructive characterization, International Materials Reviews, vol. 48, iss. 5, 2003, pag.273.
101. Porter, D. - Modelling of structural materials, International Materials Reviews, vol. 47, iss. 5, 2002, pag.225.
102. Beckermann, C - Modelling of macrosegregation: applications and future needs, International Materials Reviews, vol. 47, iss. 5, 2002, pag.243.
103. Boccalini, H., Goldstein, H. - Solidification of high speed steel, International Materials Reviews, vol. 46, iss. 2, 2001, pag.92.
104. Socalici, A. - Contract de cercetare nr.3196/13.10.2005, Programul CEEEX 2005, Cercetări și experimentări privind îmbunătățirea structurii semifabricatelor turnate continuu.
105. Ioan Mărginean, ș.a. - Procedee speciale și neconvenționale în turnătorii, Vol I 2002
106. Faur, S., Hepuț, T. - Tehnologia eleborării oțelului, vol. I, II, III, Litografia UPT, Hunedoara, 1984.
107. Nicolae, A., ș.a. - Elemente de analiză tehnico-economică a întreprinderilor metalurgice, Editura Fair Parteners, București, 2002.
108. Ioan Mărginean, ș.a. - Procedee speciale și neconvenționale în turnătorii, Vol II 2002
109. Ioan Mărginean, ș.a. -Procedee performante de punere în formă, Vol I 2008
110. Ioan Mărginean, ș.a. -Procedee performante de punere în formă, Vol II 2008
111. Ioan Mărginean, ș.a. -Turnătoria de artă, Editura EUROPLUS, Vol I 2008
112. Ioan Mărginean, ș.a. -Turnătoria de artă, Editura EUROPLUS, Vol II 2008

-
113. Nicolae, M., ș.a. – Proceduri de analiză în managementul ecometalurgic, Editura Fair Partners, București, 2002.
114. Nicolae, M., ș.a. – Dezvoltarea durabilă în siderurgie prin valorificarea materialelor secundare, Editura Printech, București, 2004.
115. Nicolae, A., ș.a. – Conducerea optimală a cuptoarelor cu arc electric, Editura Fair Partners, București, 2002.
116. Socalici, A. - Structura lingourilor de oțel, Editura Mirton Timișoara, 2004.
117. Nica, Gh., Socalici, A., Ardelean, E., Hepuț, T. - Tehnologii pentru îmbunătățirea calității oțelului, Editura Mirton Timișoara, 2003.
118. Hepuț, T., Nica, Gh., Socalici, A., Ardelean, E. - Defectele lingourilor și semifabricatelor din oțel, Editura Politehnica Timișoara, 2001.
119. Hepuț, T., Nica, Gh., Socalici, A., Ardelean, E., Makşay, St. - Turnarea și solidificarea oțelului sub formă de lingouri, Editura Destin Deva, 2000.
120. Socalici, A., Makşay, St., Considerații termice în metalurgie, Editura Sigma Plus Deva, 2000.
121. Brown, S., Spittle, J., James, J. - Solidification of a Complex Foundry Casting, A JOM-e Perspective, JOM: HTML Enhanced Articles, January 2002, pag. 55.
122. Davis, S.H. - Theory of solidification, Cambridge Univ. Press, 2001, ISBN 0-521-65080.
123. x x x – La Metallurgia Italiana, nr. 11, 1988, pag. 879
124. x x x – CIT 4/1994, pag. 609
125. x x x – CIT 1/1998, pag. 39
126. x x x – CIT 5/1982, pag.459
127. x x x – The Summitorno Search, nr. 33/1986, pag. 63
128. x x x – ISIJ 2/1997 pag. 134
129. Contract de cercetare, Programul CEEX 2008 "Cercetari fundamentale si aplicative privind obtinerea produselor tubulare din oțeluri de calitate superioara in vederea reducerii costurilor si ecologizarii productiei" Proiect X2C22

130. Stanciu, C., ș.a. – Corelarea parametrilor tehnologici de răcire secundară a semifabricatelor turnate continuu pe baza măsurării temperaturii suprafeței, *Metalurgia nr.4*, 2000

131. Thomas, B. G., "Continuous Casting: Modeling", *The Encyclopedia of Advanced Materials* (Dantzig, J., Greenwell, A., Michalczyk, J., eds.), Pergamon Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, Vol. 2, 1999

132. Carslaw, M. S. and Jaeger, C. J., *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, Oxford, 1973

133. Rubinsky, B. and Cravalho, E. G., "Analysis for the temperature distribution during the thawing of a frozen biological organ", *Heat transfer – San Diego 1979*, A.I.Ch. E. sympl. Ser, 75 (189), 81-88 (1979)

134. Fic, A., Nowak, A. J., and Bialecki, R., "Heat Transfer Analysis of the Continuous Casting Process by the Front Tacking BEM", *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 24, p. 215-223, 2000

135. Choudhary, K. and Mazumdar, Dipak, "Mathematical modeling of fluid flow, heat transfer and solidification phenomena in continuous casting of steel", *Steel Research*, 66, No. 5, 1995

136. S.Kumar, J.A.Meech, I.V.Samarasekera, J.K.Brimmacombe, V.Rakocevic: Development of intelligent mould for online detection of defects in steel billets, *Iron & Steelmaking*, 1999 vol.26 No.4.

137. M.Réger: A folyamatos öntés modellezése V/3 részjelentés, Dunaújváros, 1999.

138. G.Fehérvári: Acélok folyamatos öntésének matematikai szimulációja, Poszterelőadás, BAYATI, 2001.

ANEXE

Fișierul MetalDataFile.h

```

////////////////////////////////////
// MetalDataFile.h - header file

#ifdef __METAL_DATA_FILE_H
#define __METAL_DATA_FILE_H

#include "HeatFlowCalculator.h"
#include "SequenceInterpolator.h"

typedef BOOL (*ProgressCallback)(LPVOID, HeatFlowCalculator*);

////////////////////////////////////
//class MetalDataFile
class MetalDataFile {
    friend class HeatFlowCalculator;
    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

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;               //fisierul 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(HeatFlowCalculator *hfc);
BOOL shouldAir(HeatFlowCalculator *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
MetalDataFile();
~MetalDataFile();

public: //functii publice
void close();
void assign(LPCTSTR filename);
void open();
BOOL isOpen() {return data.isOpen();}
CString getFileName() {return data.getName();}
static void defaults(MetalDataFile *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);
};

MetalDataFile *getMDF();

#endif//__METAL_DATA_FILE_H

```

Fişierul MetalDataFile.cpp

```

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// MetalDataFile.cpp - implementation file

#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"

MetalDataFile metalDataFile;
MetalDataFile *getMDF() {return &metalDataFile;}

MetalDataFile::MetalDataFile() {
    fileSignature= "MetalDataFile";
    defaults(this);
    calcFogged = FALSE;
    progressCallback = NULL;
    seqInt1 = seqInt2 = NULL;
    candraw = fileIsTemp = FALSE;
    fogSequence = -1;
}

MetalDataFile::~MetalDataFile() {
    close();
    if (fileIsTemp) data.remove();
}

#define XF 0.17
#define KF 0.1
void MetalDataFile::defaults(MetalDataFile *target) {
    target->nwir = 20; target->mwir = 18;
    target->ncry = 5;
    target->tini = 1600;
    target->tcryini = 20;
}

```

```

target->wirX = 0.135;
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->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 MetalDataFile::close() {
    if (data.canWrite()) writeHeader();
    candraw = FALSE;
    clearInterpolators();
    data.close();
}
void MetalDataFile::assign(LPCTSTR filename) {
    fileIsTemp = !filename;
    data.assign(filename);
}
BOOL MetalDataFile::writeHeader(DataFile *df) {
    bool full = (df == NULL);
    if (full) df = &(MetalDataFile::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(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 MetalDataFile::readHeader(DataFile *df) {
    if (!df) df = &(MetalDataFile::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();

    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 MetalDataFile::setProgressCallback(
    ProgressCallback pc, LPVOID param) {
    progressCallback = pc;
    progress_callback_param = param;
}
void MetalDataFile::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 MetalDataFile::clearInterpolators() {
    currentTime = -1; currentTimeStep = -1;
    DEL(seqInt1); DEL(seqInt2);
}
void MetalDataFile::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 MetalDataFile::shouldFog(HeatFlowCalculator *hfc) {
    if (!hfc) return FALSE;
    return fogImmediate || (hfc->time * flowSpeed > cryLength);
}
BOOL MetalDataFile::shouldAir(HeatFlowCalculator *hfc) {
    if (!hfc) return FALSE;
    return (hfc->time * flowSpeed <= cryLength / 2);
}

```

```

BOOL MetalDataFile::inWire(int i, int j) {
    return i < nwir;
}
BOOL MetalDataFile::inCrystallizer(int i, int j) {
    return (i >= nwir) && (i < nwir + ncry);
}
int MetalDataFile::calculateSeqSize() {
    return 7*sizeof(double) + 2*sizeof(int) +
        (nwir+ncry)*mwir*sizeof(float);
}
void MetalDataFile::seekSequence(int nseq) {
    data.seek(headerSize + nseq*seqSize);
}
BOOL MetalDataFile::copy(LPCTSTR name) {
    close();
    return data.copy(name);
}
void MetalDataFile::calculate() {
    iterations = 0; fogSequence = -1;
    candraw = FALSE; clearInterpolators();
    close(); if (fileIsTemp) data.remove();
    data.assign(NULL); data.openCreate();
    fileIsTemp = TRUE;
    writeHeader();
    HeatFlowCalculator *oldhfc, *hfc;
    hfc = new HeatFlowCalculator(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 HeatFlowCalculator(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 MetalDataFile::getFogTime() {
    return cryLength / flowSpeed;
}
double MetalDataFile::cryHeatFlow() {
    double p = cryPt / (cryLength * M_2_PI * (wirX + cryThick));
    return (1 + KF * (1 - 2 * cry_pos)) * p;
}
double MetalDataFile::wirHeatFlow() {
    if (cry_pos > 1) return fogPt / (fogLength * M_2_PI * wirX);
    else return cryHeatFlow();
}

float MetalDataFile::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 MetalDataFile::getValueWire(float x, float y, float time) {
    ASSERT(candraw);
    seekTime(time);
    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 MetalDataFile::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 MetalDataFile::findSolidusX(float time) {
return findTemperatureX(matSteel.solidus(), time);
}

```

Fişierul StdAfx.h

```

////////////////////////////////////
// stdafx.h : include file for standard system include files,
// or project specific include files that are used frequently, but
// are changed infrequently
//

#ifdef _AFXDLL
#include <afxwin.h>
#endif

#ifndef _AFX_NO_MFC_SUPPORT
#include <afx.h>
#endif

#ifndef _AFX_NO_OLE_SUPPORT
#include <afxole.h>
#endif

#ifndef _AFX_NO_AFXCMN_SUPPORT
#include <afxcmn.h>
#endif

// Exclude rarely-used stuff from Windows headers
#define VC_EXTRALEAN

#include <afxwin.h> // MFC core and standard components
#include <afxext.h> // MFC extensions
#include <afxdtctl.h> // MFC support for Internet Explorer 4 Common Controls
#ifdef _AFX_NO_AFXCMN_SUPPORT
#include <afxcmn.h> // MFC support for Windows Common Controls
#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 NAN (sqrt(-1)) //Not a Number

```

```
#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:\\tconr.log"
//#define MDF_RESET // to ignore saved config

#define SIMPLE_WIDTH 600
#define SIMPLE_HEIGHT 400
#define GL_WIDTH 600
#define GL_HEIGHT 500

//{{AFX_INSERT_LOCATION}}
// Microsoft Visual C++ will insert additional declarations immediately before the
previous line.

#endif //
!defined(AFX_STDAFX_H__3D7EA8A9_8F9C_11D7_80A6_E74500083360__INCLUD
ED_)
```


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);
}
```

Fişierul HeatFlowCalculator.h

```

////////////////////////////////////
// HeatFlowCalculator.h - header file

#ifdef __HEAT_FLOW_CALCULATOR_H
#define __HEAT_FLOW_CALCULATOR_H

class HeatFlowCalculator {
    friend class MetalDataFile;
    friend class CProgressDialog;
private:
    MetalDataFile *mdf;
    HeatFlowCalculator *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:
    HeatFlowCalculator *spawn();
    void init();
    void initCry();
    void finalize();
private:
    double calculateWir();
    double calculateCry();
    void normWir(double dtime);
    void normCry(double dtime);
    void calculateCryFull();
public:
    HeatFlowCalculator(MetalDataFile *mdf,
        HeatFlowCalculator *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_CALCULATOR_H

```

Fişierul HeatFlowCalculator.cpp

```

////////////////////////////////////
// HeatFlowCalculator.cpp - implementation file

#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"
extern BOOL calcul_signal_stop;

HeatFlowCalculator::HeatFlowCalculator(
    MetalDataFile *mdf, HeatFlowCalculator *prev, BOOL calcStrip) {
    HeatFlowCalculator::mdf = mdf;
    HeatFlowCalculator::prev = prev;
    int n = mdf->nwir + mdf->ncry;
    int m = mdf->mwir;
    dat.alloc(n, m);
    daf.alloc(n, m);
    dah.alloc(n, m);
    if (calcStrip) {
        stripped = mdf->calcFogged && (prev != NULL);
        if (!stripped)
            mdf->calcFogged = stripped = mdf->shouldFog(prev);
    } else stripped = FALSE;
}

HeatFlowCalculator *HeatFlowCalculator::spawn() {
    HeatFlowCalculator *hfc = new HeatFlowCalculator(mdf, this, FALSE);
    hfc->stripped = stripped;
    hfc->dat.copy(dat.getBuffer());
    hfc->daf.copy(daf.getBuffer());
    hfc->dah.copy(dah.getBuffer());
    return hfc;
}

void HeatFlowCalculator::writeToFile() {
    mdf->data.writeDouble(time);
    mdf->data.writeDouble(tmin);
    mdf->data.writeDouble(tmed);
    mdf->data.writeDouble(tmax);
    mdf->data.writeDouble(tcrymin);
    mdf->data.writeDouble(tcrymed);
    mdf->data.writeDouble(tcrymax);
    dat.writeToFileAsFloatArray(&mdf->data);
}

double HeatFlowCalculator::transfer(double tw, double tc) {
    if (tw == tc) {
        return 0;
    } else if (mdf->dzg <= 0) {
        return 15 * ((tw < tc) ? -1 : 1) * pow(fabs(tw - tc), 1.5);
    } else if (mdf->shouldAir(this)) {
        return (tw - tc) * mdf->lambdazg / (mdf->dzg + 0.002);
    } else {
        return (tw - tc) * mdf->lambdazg / mdf->dzg;
    }
}

```

```

    }
}
double HeatFlowCalculator::flowWir(double t) {
    int s = (t < 0) ? -1 : 1; return s * pow(fabs(t), 2);
    //t = fabs(t); return pow(t, 1.5);
}
double HeatFlowCalculator::flowCry(double t) {
    //t -= 100; return (t <= 0) ? 0 : pow(t, 2);
    t -= 100;
    if (t <= 0) {
        return 1e-20;
    } else {
        return pow(t, 2);
    }
}
double HeatFlowCalculator::calculateWir() { //returns max(dh/dt)
    int i, j;
    double max_dhdt = 0, t;
    double ddfix, dfix, ddfiy;
    double pfix1, pfix2, pfy1, pfy2;
    double W, tamb = 0;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf->mwir;
    double r, x = mdf->wirX / nwir, y = M_2_PI / mwir;
    int jplus, jminus;
    Material *mats = &mdf->matSteel;

    DoubleVector w;
    w.alloc(mwir);
    for (j = 0; j < mwir; j++) {
        w[j] = flowWir(prev->dat(nwir - 1, j));
    }
    w.multiply(mdf->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->lambada_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 = (mats->lambada_0()/mats->ro())*(ddfix + dfix + ddfiy);
t = fabs(t); if (max_dhdt < t) max_dhdt = t;
}
}
return max_dhdt;
}

```

```

double HeatFlowCalculator::calculateCry() {
    int i, j;
    double max_dhdt = 0, t;
    double ddfix, ddfiy, dfix;
    double pfix1, pfix2, pfy1, pfy2;
    double W = mdf->cryHeatFlow(), tamb = 20;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf->mwir;
    int ncry = mdf->ncry;
    int nfull = nwir + ncry;
    int jplus, jminus;
    double r, x = mdf->cryThick / ncry, y = M_2_PI / mwir;
    Material *matc = &mdf->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(mdf->cryHeatFlow() / W);

for (i = nwir; i < nfull; i++) {
    r = mdf->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 HeatFlowCalculator::normCry(double dtime) {
    int i, j; double t;
    int npoints = 0; tcrymed = 0;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf->mwir;
    int ncry = mdf->ncry;
    Material *matc = &mdf->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 HeatFlowCalculator::normWir(double dtime) {

```

```

int i, nwir = mdf->nwir;
int j, mwir = mdf->mwir;
double t;
Material *mats = &mdf->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 HeatFlowCalculator::init() {
int i, j;
double max_dhdt = 0, t;
int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf->mwir;
Material *m = &mdf->matSteel;
DoubleArray ta; ta.alloc(nwir, mwir);
double t_ini, ff;
if (mdf->fillfactor >= 0.1) {
    ff = mdf->fillfactor; t_ini = 20;
} else {
    ff = 0.1;
    t_ini = mdf->tini + 10 * mdf->fillfactor * (20 - mdf->tini);
}
ta.fill(mdf->tini);

if (mdf->filltype == FILLTYPE_NONE) {
    // do nothing
} else if (mdf->filltype == FILLTYPE_UNIFORM) {
    int nx, ny, ii, jj;
    double N = ff * nwir * mwir;
    double F = mdf->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;
            ta(ii, jj) = t_ini;
        }
    }
} else {
if (mdf->filltype == FILLTYPE_URANDOM) srand(1);
else srand(: : time(NULL));
double xrand, yrand;
double f = ff;

```

```

int ii, jj;
while (f > 0) {
    xrand = (double)rand() / RAND_MAX;
    yrand = (double)rand() / RAND_MAX;
    xrand = pow(xrand, mdf->fillconc);
    ii = round(xrand * (nwir - 1));
    jj = round(yrand * (mwir - 1));
    if (ta(ii, jj) == 20) continue;
    if ((ii > 0) && (ta(ii - 1, jj) == t_ini)) continue;
    if ((jj > 0) && (ta(ii, jj - 1) == t_ini)) continue;
    if ((ii < nwir - 1) && (ta(ii + 1, jj) == t_ini)) continue;
    if ((jj < mwir - 1) && (ta(ii, jj + 1) == t_ini)) continue;
    ta(ii, jj) = t_ini;
    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 = mdf->tini;
time = 0;
}
void HeatFlowCalculator::initCry() {
    int i, j;
    double t;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf->mwir;
    int ncry = mdf->ncry;
    Material *m = &mdf->matCopper;
    if (stripped || mdf->fogImmediate) t = mdf->tcryini;
    else t = mdf->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 HeatFlowCalculator::calculateCryFull() {
    if (mdf->fogImmediate) return;
    int i, j;
    double dt, max_dhdt;
    HeatFlowCalculator *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,
    // adica sa intre in bucle infinite...
    if (max_dhdt < 100) break;
    // that shouldn't be necessary
    if (hfc->tcrymin < 150) break;
    hfc = hfc->spawn();
}
for (i = mdf->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 HeatFlowCalculator::calculate() {
    double max_dhdt = 0, dt;
    if (!prev) {
        init();
        calculateCryFull();
        finalize();
        return;
    }

    max_dhdt = calculateWir();
    dt = mdf->max_dh / max_dhdt;
    time = prev->time + dt;
    normWir(dt);

    if (!stripped) {
        calculateCry();
        normCry(dt);
        calculateCryFull();
    } else initCry();
    finalize();
}
void HeatFlowCalculator::finalize() {
    int i, j; double t, npwir, npcry;
    int nwir = mdf->nwir, mwir = mdf->mwir;
    int ncry = mdf->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 (mdf->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 {
    MetalDataFile *mdf; int nseq;
    double time;
    double tmin, tmed, tmax;
    double tcrymin, tcrymed, tcrymax;
    FloatArray array;
public:
    SequenceInterpolator(MetalDataFile *mdf, 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(MetalDataFile *mdf, int nseq) {
    mdf->seekSequence(nseq);
    time = mdf->data.readDouble();
    tmin = mdf->data.readDouble();
    tmed = mdf->data.readDouble();
    tmax = mdf->data.readDouble();
    tcrymin = mdf->data.readDouble();
    tcrymed = mdf->data.readDouble();
    tcrymax = mdf->data.readDouble();
    array.readFromFile(&mdf->data);
    SequenceInterpolator::mdf = mdf;
    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 = mdf->wirX;
    float crythick = mdf->cryThick;
    if (x <= wirx) {
        i = (mdf->nwir-1)*x/wirx;
        x1 = i*(wirx / (mdf->nwir-1));
        x2 = (i+1)*(wirx / (mdf->nwir-1));
    } else {
        i = mdf->nwir + (mdf->ncry - 1) * (x - wirx) / crythick;
        if (i == mdf->nwir + mdf->ncry - 1) i--;
        x1 = wirx + (i - mdf->nwir) * (crythick / (mdf->ncry-1));
        x2 = wirx + (i + 1 - mdf->nwir)*(crythick / (mdf->ncry-1));
    }
    j = (int)(y * mdf->mwir / M_2_PI);
    while (j < 0) j += mdf->mwir;
    j %= mdf->mwir;
    jplus = (j + 1) % mdf->mwir;
    y1 = M_2_PI * j / mdf->mwir;
    y2 = M_2_PI * (j + 1) / mdf->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*(mdf->wirX+mdf->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*mdf->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

```

Fişierul Buffers.cpp

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// Buffers.cpp - implementation file

#include "stdafx.h"
#include "DataFile.h"
#include "Buffers.h"

#define BUF2(i, j) buf[(i)*m + (j)]
#define BUF3(i, j, k) buf[((i)*m + (j))*p + (k)]

bool isFloatPart(char ch) {
    return isdigit(ch) || (ch == '.') || (tolower(ch) == 'e');
}

/////////////////////////////////////////////////////////////////
//class FloatBuffer
FloatBuffer::FloatBuffer() {
    n = 0; buf = NULL;
}
FloatBuffer::FloatBuffer(FloatBuffer& fb) {
    n = 0; buf = NULL;
    fromFloatBuffer(fb);
}
FloatBuffer::FloatBuffer(float *fb, int count) {
    n = 0; buf = NULL;
    fromArray(fb, count);
}
FloatBuffer::FloatBuffer(double *fb, int count) {
    n = 0; buf = NULL;
    fromArray(fb, count);
}
FloatBuffer::~FloatBuffer() {
    if (buf) delete buf;
}

```

```

}
void FloatBuffer::setSize(int size) {
    if (size <= 0) {
        if (buf) delete buf; n = 0; buf = NULL;
        return;
    }
    if (buf == NULL) {
        buf = new float[size]; n = size;
        memset(buf, 0, sizeof(float)*size);
        return;
    }
    int nx = (size < n) ? size : n;
    float *nwbuf = new float[size];
    memset(nwbuf, 0, sizeof(float)*size);
    memcpy(nwbuf, buf, sizeof(float)*nx);
    delete buf; buf = nwbuf;
    n = size; return;
}
void FloatBuffer::add(float x) {
    setSize(n+1);
    buf[n-1] = x;
}
void FloatBuffer::insert(float x, int pos) {
    setSize(n+1);
    memmove(buf+pos+1, buf+pos, sizeof(float)*(n-pos-1));
    buf[pos] = x;
}
void FloatBuffer::remove(int pos) {
    if (n <= 1) {setSize(0); return;}
    memmove(buf+pos, buf+pos+1, sizeof(float)*(n-pos-1));
    setSize(n-1);
}
void FloatBuffer::sort() {
    if (n <= 1) return;
    bool done;
    int k; float aux;
    do {
        done = true;
        for (k = 0; k < n-1; k++) {
            if (buf[k] > buf[k+1]) {
                done = false;
                aux = buf[k];
                buf[k] = buf[k+1];
                buf[k+1] = aux;
            }
        }
    } while (!done);
}
void FloatBuffer::multiply(float x) {
    if (!buf) return;
    for (int k = 0; k < n; k++) buf[k] *= x;
}

```

```

}
int FloatBuffer::binarySearch(float x) {
    if (!buf) return 0;
    int a = 0, b = n - 1, c = (a + b) >> 1;
    if (x >= buf[b]) return b-1;
    while (c != a) {
        if (x >= buf[c]) a = c;
        else b = c;
        c = (a + b) >> 1;
    }
    return c;
}
CString FloatBuffer::toString() {
    int k; CString res, cs;
    for (k = 0; k < n; k++) {
        cs.Format("%g", buf[k]);
        res += cs;
        if (k < n-1) res+=' ';
    }
    return res;
}
void FloatBuffer::fromString(LPCTSTR s) {
    float x;
    DEL(buf); n = 0;
    if (s == NULL) return;
    int j = 0, len = strlen(s);
    do {
        for (; j < len; j++) if (isFloatPart(s[j])) break;
        if (j < len) if (sscanf(s+j, "%g", &x)) add(x);
        for (; j < len; j++) if (!isFloatPart(s[j])) break;
    } while (j < len);
}
void FloatBuffer::fromFloatBuffer(FloatBuffer& fb) {
    empty();
    if (fb.buf == NULL) return;
    buf = new float[fb.n]; n = fb.n;
    memcpy(buf, fb.buf, sizeof(float)*n);
}
void FloatBuffer::fromArray(float *fb, int count) {
    empty();
    if (count <= 0) return;
    buf = new float[count]; n = count;
    memcpy(buf, fb, sizeof(float)*count);
}
void FloatBuffer::fromArray(double *fb, int count) {
    empty();
    if (count <= 0) return;
    buf = new float[count]; n = count;
    for (int k = 0; k < count; k++) buf[k] = (float)fb[k];
}
void FloatBuffer::writeToFile(DataFile *df) {

```

```

    df->writeInt(n);
    df->write(buf, n*sizeof(float));
}
void FloatBuffer::readFromFile(DataFile *df) {
    empty();
    n = df->readInt();
    setSize(n);
    df->read(buf, n*sizeof(float));
}
float FloatBuffer::interpolate(float x) {
    int k = (int)(x * n);
    if (k < 0) k = 0;
    if (k > n - 2) k = n - 2;
    float kx = x * n;
    return buf[k + 1] * (kx - k) + buf[k] * (k + 1 - kx);
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//class DoubleBuffer
DoubleBuffer::DoubleBuffer() {
    n = 0; buf = NULL;
}
DoubleBuffer::DoubleBuffer(DoubleBuffer& fb) {
    n = 0; buf = NULL;
    fromDoubleBuffer(fb);
}
DoubleBuffer::DoubleBuffer(float *fb, int count) {
    n = 0; buf = NULL;
    fromArray(fb, count);
}
DoubleBuffer::DoubleBuffer(double *fb, int count) {
    n = 0; buf = NULL;
    fromArray(fb, count);
}
DoubleBuffer::~DoubleBuffer() {
    if (buf) delete buf;
}
void DoubleBuffer::setSize(int size) {
    if (size <= 0) {
        if (buf) delete buf; n = 0; buf = NULL;
        return;
    }
    if (buf == NULL) {
        buf = new double[size]; n = size;
        memset(buf, 0, sizeof(double)*size);
        return;
    }
    int nx = (size < n) ? size : n;
    double *nwbuf = new double[size];
    memcpy(nwbuf, buf, sizeof(double)*nx);
    delete buf; buf = nwbuf;
}

```

```
n = size; return;
}
void DoubleBuffer::add(double x) {
    setSize(n+1);
    buf[n-1] = x;
}
void DoubleBuffer::insert(double x, int pos) {
    setSize(n+1);
    memmove(buf+pos+1, buf+pos, sizeof(double)*(n-pos-1));
    buf[pos] = x;
}
void DoubleBuffer::remove(int pos) {
    if (n <= 1) {setSize(0); return;}
    memmove(buf+pos, buf+pos+1, sizeof(double)*(n-pos-1));
    setSize(n-1);
}
void DoubleBuffer::sort() {
    if (n <= 1) return;
    bool done;
    int k; double aux;
    do {
        done = true;
        for (k = 0; k < n-1; k++) {
            if (buf[k] > buf[k+1]) {
                done = false;
                aux = buf[k];
                buf[k] = buf[k+1];
                buf[k+1] = aux;
            }
        }
    } while(!done);
}
void DoubleBuffer::multiply(double x) {
    if (!buf) return;
    for (int k = 0; k < n; k++) buf[k] *= x;
}
int DoubleBuffer::binarySearch(double x) {
    if (!buf) return 0;
    int a = 0, b = n - 1, c = (a + b) >> 1;
    if (x >= buf[b]) return b-1;
    while (c != a) {
        if (x >= buf[c]) a = c;
        else b = c;
        c = (a + b) >> 1;
    }
    return c;
}
CString DoubleBuffer::toString() {
    int k; CString res, cs;
    for (k = 0; k < n; k++) {
        cs.Format("%g", buf[k]);
```

```

    res += cs;
    if (k < n-1) res+=' ';
}
return res;
}
void DoubleBuffer::fromString(LPCTSTR s) {
    double x;
    DEL(buf); n = 0;
    if (s == NULL) return;
    int j = 0, len = strlen(s);
    do {
        for (; j < len; j++) if (isFloatPart(s[j])) break;
        if (j < len) if (sscanf(s+j, "%g", &x)) add(x);
        for (; j < len; j++) if (!isFloatPart(s[j])) break;
    } while(j < len);
}
void DoubleBuffer::fromDoubleBuffer(DoubleBuffer& fb) {
    empty();
    if (fb.buf == NULL) return;
    buf = new double[fb.n]; n = fb.n;
    memcpy(buf, fb.buf, sizeof(double)*n);
}
void DoubleBuffer::fromArray(float *fb, int count) {
    empty();
    if (count <= 0) return;
    buf = new double[count]; n = count;
    for (int k = 0; k < count; k++) buf[k] = (double)fb[k];
}
void DoubleBuffer::fromArray(double *fb, int count) {
    empty();
    if (count <= 0) return;
    buf = new double[count]; n = count;
    memcpy(buf, fb, sizeof(double)*count);
}
void DoubleBuffer::writeToFile(DataFile *df) {
    df->writeInt(n);
    df->write(buf, n*sizeof(double));
}
void DoubleBuffer::readFromFile(DataFile *df) {
    empty();
    n = df->readInt();
    setSize(n);
    df->read(buf, n*sizeof(double));
}
double DoubleBuffer::interpolate(double x) {
    int k = (int)(x * n);
    if (k < 0) k = 0;
    if (k > n - 2) k = n - 2;
    double kx = x * n;
    return buf[k + 1] * (kx - k) + buf[k] * (k + 1 - kx);
}

```



```

////////////////////////////////////
//class FloatArray
FloatArray::FloatArray() {
    buf = NULL; n = m = 0;
}
FloatArray::FloatArray(FloatArray& fa) {
    buf = NULL; n = m = 0;
    copy(fa);
}
FloatArray::~FloatArray() {
    clear();
}
void FloatArray::clear() {
    DEL(buf); n = m = 0;
}
void FloatArray::alloc(int n, int m) {
    clear();
    CHKNEW(buf = new float[n*m]);
    FloatArray::n = n; FloatArray::m = m;
    fill(0);
}
float& FloatArray::operator () (int i, int j) {
    ASSERT(buf && (i>=0)&&(i<n) && (j>=0)&&(j<m));
    return buf[i*m+j];
}
void FloatArray::fill(float x) {
    if (!buf) return; int nm = n*m;
    if (x == 0) {
        memset(buf, 0, nm * sizeof(float));
    } else {
        for (int k = 0; k < nm; k++) buf[k] = x;
    }
}
void FloatArray::copy(float *px) {
    memcpy(buf, px, sizeof(float)*n*m);
}
void FloatArray::copy(FloatArray& fa) {
    alloc(fa.n, fa.m);
    memcpy(buf, fa.buf, sizeof(float)*n*m);
}
void FloatArray::multiply(float x) {
    ASSERT(buf); int nm = n*m;
    for (int k = 0; k < nm; k++) buf[k] *= x;
}
float FloatArray::sum() {
    ASSERT(buf); int k, nm = n*m; float s = 0;
    for (k = 0; k < nm; k++) s += buf[k]; return s;
}
float FloatArray::average() {
    return sum()/(n*m);
}

```

```

void FloatArray::writeToFile(DataFile *df) {
    df->writeInt(n); df->writeInt(m);
    df->write(buf, n*m*sizeof(float));
}
void FloatArray::readFromFile(DataFile *df) {
    clear();
    n = df->readInt(); m = df->readInt();
    alloc(n, m);
    df->read(buf, n*m*sizeof(float));
}
void FloatArray::writeToFile(FILE *file) {
    int i, j;
    for (j = 0; j < m; j++) {
        for (i = 0; i < n; i++) {
            fprintf(file, "%g", buf[i*m+j]);
            if (i < n-1) fprintf(file, "\t");
        }
        if (j < m-1) fprintf(file, "\n");
    }
}
float FloatArray::interpolate(float x, float y) {
    int i = (int)(x*n), j = (int)(y*m);
    if (i < 0) i = 0; if (i > n - 2) i = n - 2;
    if (j < 0) j = 0; if (j > m - 2) j = m - 2;
    float nx = n * x, my = m * y;
    float px1 = BUF2(i+1,j) * (nx - i) + BUF2(i,j) * (i + 1 - nx);
    float px2 = BUF2(i+1,j+1) * (nx - i) + BUF2(i,j+1) * (i + 1 - nx);
    return px2 * (my - j) + px1 * (j + 1 - my);
}
////////////////////////////////////
//class FloatSpace
FloatSpace::FloatSpace() {
    buf = NULL; n = m = p = 0;
}
FloatSpace::FloatSpace(FloatSpace& fa) {
    buf = NULL; n = m = p = 0;
    alloc(fa.n, fa.m, fa.p);
    memcpy(buf, fa.buf, sizeof(float)*n*m*p);
}
FloatSpace::~FloatSpace() {
    clear();
}
void FloatSpace::clear() {
    DEL(buf); n = m = p = 0;
}
void FloatSpace::alloc(int n, int m, int p) {
    clear();
    CHKNEW(buf = new float[n*m*p]);
    FloatSpace::n = n; FloatSpace::m = m; FloatSpace::p = p;
}
float& FloatSpace::operator () (int i, int j, int k) {

```

```

    ASSERT(buf && (i>=0)&&(i<n) && (j>=0)&&(j<m) && (k>=0)&&(k<p));
    return buf[(i*m + j)*p + k];
}
void FloatSpace::fill(float x) {
    if (!buf) return; int nmp = n*m*p;
    for (int k = 0; k < nmp; k++) buf[k] = x;
}
void FloatSpace::copy(float *px) {
    memcpy(buf, px, sizeof(float)*n*m*p);
}
void FloatSpace::multiply(float x) {
    ASSERT(buf); int nmp = n*m*p;
    for (int k = 0; k < nmp; k++) buf[k] *= x;
}
float FloatSpace::sum() {
    ASSERT(buf); int k, nmp = n*m*p; float s = 0;
    for (k = 0; k < nmp; k++) s += buf[k]; return s;
}
float FloatSpace::average() {
    return sum()/(n*m*p);
}
void FloatSpace::writeToFile(DataFile *df) {
    df->writeInt(n); df->writeInt(m); df->writeInt(p);
    df->write(buf, n*m*p*sizeof(float));
}
void FloatSpace::readFromFile(DataFile *df) {
    clear();
    n = df->readInt(); m = df->readInt(); p = df->readInt();
    alloc(n, m, p);
    df->read(buf, n*m*p*sizeof(float));
}
float FloatSpace::interpolate(float x, float y, float z) {
    ASSERT((n > 1) && (m > 1) && (p > 1));
    int i = (int)(x*n), j = (int)(y*m), k = (int)(z*p);
    if (i < 0) i = 0; if (i > n - 2) i = n - 2;
    if (j < 0) j = 0; if (j > m - 2) j = m - 2;
    if (k < 0) k = 0; if (k > p - 2) k = p - 2;
    float t1, t2, in = i*n, jm = j*m, kp = k*p;
    t1 = kp - k; t2 = k + 1 - kp;
    float p00 = BUF3(i, j, k+1) * t1 + BUF3(i, j, k) * t2;
    float p01 = BUF3(i, j+1, k+1) * t1 + BUF3(i, j+1, k) * t2;
    float p10 = BUF3(i+1, j, k+1) * t1 + BUF3(i+1, j, k) * t2;
    float p11 = BUF3(i+1, j+1, k+1) * t1 + BUF3(i+1, j+1, k) * t2;
    t1 = jm - j; t2 = j + 1 - jm;
    float px0 = p00 * t2 + p01 * t1;
    float px1 = p10 * t2 + p11 * t1;
    t1 = in - i; t2 = i + 1 - in;
    return px0 * t2 + px1 * t1;
}
////////////////////////////////////
//class DoubleArray

```

```

DoubleArray::DoubleArray() {
    buf = NULL; n = m = 0;
}
DoubleArray::DoubleArray(DoubleArray& fa) {
    buf = NULL; n = m = 0;
    copy(fa);
}
DoubleArray::~DoubleArray() {
    clear();
}
void DoubleArray::clear() {
    DEL(buf); n = m = 0;
}
void DoubleArray::alloc(int n, int m) {
    clear();
    CHKNEW(buf = new double[n*m]);
    DoubleArray::n = n; DoubleArray::m = m;
    fill(0);
}
double& DoubleArray::operator () (int i, int j) {
    ASSERT(buf && (i>=0)&&(i<n) && (j>=0)&&(j<m));
    return buf[i*m+j];
}
void DoubleArray::fill(double x) {
    if (!buf) return; int nm = n*m;
    if (x == 0) {
        memset(buf, 0, nm * sizeof(double));
    } else {
        for (int k = 0; k < nm; k++) buf[k] = x;
    }
}
void DoubleArray::copy(double *px) {
    memcpy(buf, px, sizeof(double)*n*m);
}
void DoubleArray::copy(DoubleArray& fa) {
    alloc(fa.n, fa.m);
    memcpy(buf, fa.buf, sizeof(double)*n*m);
}
void DoubleArray::multiply(double x) {
    ASSERT(buf); int nm = n*m;
    for (int k = 0; k < nm; k++) buf[k] *= x;
}
double DoubleArray::sum() {
    ASSERT(buf); int k, nm = n*m; double s = 0;
    for (k = 0; k < nm; k++) s += buf[k]; return s;
}
double DoubleArray::average() {
    return sum()/(n*m);
}
void DoubleArray::writeToFile(DataFile *df) {
    df->writeInt(n); df->writeInt(m);
}

```

```

    df->write(buf, n*m*sizeof(double));
}
void DoubleArray::readFromFile(DataFile *df) {
    clear();
    n = df->readInt(); m = df->readInt();
    alloc(n, m);
    df->read(buf, n*m*sizeof(double));
}
void DoubleArray::writeToFileAsFloatArray(DataFile *df) {
    int nm = n*m; df->writeInt(n); df->writeInt(m);
    for (int k = 0; k < nm; k++) df->writeFloat((float)buf[k]);
}
void DoubleArray::writeToTextFile(FILE *file) {
    int i, j;
    for (j = 0; j < m; j++) {
        for (i = 0; i < n; i++) {
            fprintf(file, "%lg", buf[i*m+j]);
            if (i < n-1) fprintf(file, "\t");
        }
        if (j < m-1) fprintf(file, "\n");
    }
}
double DoubleArray::interpolate(double x, double y) {
    int i = (int)(x*n), j = (int)(y*m);
    if (i < 0) i = 0; if (i > n - 2) i = n - 2;
    while (j < 0) j += m; j %= m;
    int jp = (j == m - 1) ? 0 : (j + 1);
    double nx = n * x - i, my = m * y - j;
    double px1 = BUF2(i+1,j) * nx + BUF2(i,j) * (1 - nx);
    double px2 = BUF2(i+1,jp) * nx + BUF2(i,jp) * (1 - nx);
    return px2 * my + px1 * (1 - my);
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//class DoubleVector
DoubleVector::DoubleVector() {
    buf = NULL; n = 0;
}
DoubleVector::DoubleVector(DoubleVector& dv) {
    buf = NULL; n = 0;
    alloc(dv.n);
    memcpy(buf, dv.buf, sizeof(double)*n);
}
DoubleVector::~DoubleVector() {
    clear();
}
void DoubleVector::clear() {
    DEL(buf); n = 0;
}
void DoubleVector::alloc(int n) {
    clear();
    CHKNEW(buf = new double[n]);
}

```

```

    DoubleVector::n = n;
}
double& DoubleVector::operator[] (int i) {
    ASSERT(buf && (i>=0)&&(i<n));
    return buf[i];
}
void DoubleVector::fill(double x) {
    if (!buf) return; int k;
    for (k = 0; k < n; k++) buf[k] = x;
}
void DoubleVector::multiply(double x) {
    ASSERT(buf); int k;
    for (k = 0; k < n; k++) buf[k] *= x;
}
double DoubleVector::sum() {
    ASSERT(buf); int k; double s = 0;
    for (k = 0; k < n; k++) s += buf[k]; return s;
}
double DoubleVector::average() {
    return sum()/n;
}
double DoubleVector::interpolate(double x) {
    int k = (int)(x * n);
    if (k < 0) k = 0;
    if (k > n - 2) k = n - 2;
    double kx = x * n;
    return buf[k + 1] * (kx - k) + buf[k] * (k + 1 - kx);
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//class DoubleSpace
DoubleSpace::DoubleSpace() {
    buf = NULL; n = m = p = 0;
}
DoubleSpace::DoubleSpace(DoubleSpace& fa) {
    buf = NULL; n = m = p = 0;
    alloc(fa.n, fa.m, fa.p);
    memcpy(buf, fa.buf, sizeof(double)*n*m*p);
}
DoubleSpace::~DoubleSpace() {
    clear();
}
void DoubleSpace::clear() {
    DEL(buf); n = m = p = 0;
}
void DoubleSpace::alloc(int n, int m, int p) {
    clear();
    CHKNEW(buf = new double[n*m*p]);
    DoubleSpace::n = n; DoubleSpace::m = m; DoubleSpace::p = p;
}
double& DoubleSpace::operator () (int i, int j, int k) {
    ASSERT(buf && (i>=0)&&(i<n) && (j>=0)&&(j<m) && (k>=0)&&(k<p));

```

```

    return buf[(i*m + j)*p + k];
}
void DoubleSpace::fill(double x) {
    if (!buf) return; int nmp = n*m*p;
    for (int k = 0; k < nmp; k++) buf[k] = x;
}
void DoubleSpace::copy(double *px) {
    memcpy(buf, px, sizeof(double)*n*m*p);
}
void DoubleSpace::multiply(double x) {
    ASSERT(buf); int nmp = n*m*p;
    for (int k = 0; k < nmp; k++) buf[k] *= x;
}
double DoubleSpace::sum() {
    ASSERT(buf); int k, nmp = n*m*p; double s = 0;
    for (k = 0; k < nmp; k++) s += buf[k]; return s;
}
double DoubleSpace::average() {
    return sum()/(n*m*p);
}
double DoubleSpace::minimum() {
    ASSERT(buf); int k, nmp = n*m*p; double s = buf[0];
    for (k = 1; k < nmp; k++) if (s > buf[k]) s = buf[k];
    return s;
}
double DoubleSpace::maximum() {
    ASSERT(buf); int k, nmp = n*m*p; double s = buf[0];
    for (k = 1; k < nmp; k++) if (s < buf[k]) s = buf[k];
    return s;
}
void DoubleSpace::writeToFile(DataFile *df) {
    df->writeInt(n); df->writeInt(m); df->writeInt(p);
    df->write(buf, n*m*p*sizeof(double));
}
void DoubleSpace::readFromFile(DataFile *df) {
    clear();
    n = df->readInt(); m = df->readInt(); p = df->readInt();
    alloc(n, m, p);
    df->read(buf, n*m*p*sizeof(double));
}
void DoubleSpace::writeToFileAsFloatSpace(DataFile *df) {
    int k, nmp = n*m*p;
    df->writeInt(n); df->writeInt(m); df->writeInt(p);
    for (k = 0; k < nmp; k++) df->writeFloat((float)buf[k]);
}
double DoubleSpace::interpolate(double x, double y, double z) {
    ASSERT((n > 1) && (m > 1) && (p > 1));
    int i = (int)(x*n), j = (int)(y*m), k = (int)(z*p);
    if (i < 0) i = 0; if (i > n - 2) i = n - 2;
    if (j < 0) j = 0; if (j > m - 2) j = m - 2;
    if (k < 0) k = 0; if (k > p - 2) k = p - 2;
}

```

```

double t1, t2, in = i*n, jm = j*m, kp = k*p;
t1 = kp - k; t2 = k + 1 - kp;
double p00 = BUF3(i, j, k+1) * t1 + BUF3(i, j, k) * t2;
double p01 = BUF3(i, j+1, k+1) * t1 + BUF3(i, j+1, k) * t2;
double p10 = BUF3(i+1, j, k+1) * t1 + BUF3(i+1, j, k) * t2;
double p11 = BUF3(i+1, j+1, k+1) * t1 + BUF3(i+1, j+1, k) * t2;
t1 = jm - j; t2 = j + 1 - jm;
double px0 = p00 * t2 + p01 * t1;
double px1 = p10 * t2 + p11 * t1;
t1 = in - i; t2 = i + 1 - in;
return px0 * t2 + px1 * t1;
}

```

Fişierul DataFile.h

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// DataFile.h - header file

#ifdef __DATA_FILE_H
#define __DATA_FILE_H

class DataFile {
    FILE *file;
    CString filename;
    BOOL bWrite, bRead;
    void tempName();
public:
    DataFile();
    ~DataFile();
    void assign(LPCTSTR filename);
    CString getName() { return filename; }
    void openRead();
    void openWrite();
    void openExisting();
    void openCreate();
    void close();
    void remove();
    BOOL rename(LPCTSTR name);
    BOOL copy(LPCTSTR name);
    BOOL isOpen() { return (file != NULL); }
    FILE *getFile() { return file; }
    void flush();
    void seek(long pos);
    long tell();
    long size();
    BOOL canRead() { return bRead; }
    BOOL canWrite() { return bWrite; }

    void writeChar(char x);

```



```

void writeByte(BYTE x);
void writeShort(short x);
void writeWord(WORD x);
void writeInt(int x);
void writeDword(DWORD x);
void writeFloat(float x);
void writeDouble(double x);
void writeString(LPCTSTR x);
void write(LPVOID x, size_t length);

char readChar();
BYTE readByte();
short readShort();
WORD readWord();
int readInt();
DWORD readDword();
float readFloat();
double readDouble();
CString readString();
void read(LPVOID buf, size_t length);
};
#endif//__DATA_FILE_H

```

Fișierul DataFile.cpp

```

#include "stdafx.h"
#include "DataFile.h"

DataFile::DataFile() {
    file = NULL; bRead = bWrite = FALSE;
}
DataFile::~DataFile() {
    close();
}
void DataFile::close() {
    if (file) {fclose(file); file = NULL;}
    bRead = bWrite = FALSE;
}
void DataFile::remove() {
    close();
    DeleteFile(filename);
    filename.Empty();
}
BOOL DataFile::rename(LPCTSTR name) {
    close();
    BOOL res = MoveFileEx(filename, name,
        MOVEFILE_COPY_ALLOWED | MOVEFILE_REPLACE_EXISTING);
}

```

```

    if (res) filename = name;
    return res;
}
BOOL DataFile::copy(LPCTSTR name) {
    close();
    return CopyFile(filename, name, FALSE);
}
void DataFile::assign(LPCTSTR filename) {
    close();
    DataFile::filename = filename;
}
void DataFile::openRead() {
    close(); if (filename.IsEmpty()) tempName();
    file = fopen(filename, "rb");
    if (file) bRead = TRUE;
}
void DataFile::openWrite() {
    close(); if (filename.IsEmpty()) tempName();
    file = fopen(filename, "wb");
    if (file) bWrite = TRUE;
}
void DataFile::openExisting() {
    close(); if (filename.IsEmpty()) tempName();
    file = fopen(filename, "r+b");
    if (file) bRead = bWrite = TRUE;
}
void DataFile::openCreate() {
    close(); if (filename.IsEmpty()) tempName();
    file = fopen(filename, "w+b");
    if (file) bRead = bWrite = TRUE;
}
void DataFile::flush() {
    ASSERT(file); fflush(file);
}
void DataFile::seek(long pos) {
    ASSERT(file); fseek(file, pos, SEEK_SET);
}
long DataFile::tell() {
    ASSERT(file); return ftell(file);
}
long DataFile::size() {
    ASSERT(file);
    return _filelength(_fileno(file));
}
void DataFile::tempName() {
    char temppath[MAX_PATH], fn[MAX_PATH];
    GetTempPath(MAX_PATH, temppath);
    GetTempFileName(temppath, "ing", 0, fn);
    filename = fn;
}
}

```

```
//writing
void DataFile::writeChar(char x) {
    ASSERT(file); fwrite(&x, sizeof(char), 1, file);
}
void DataFile::writeByte(BYTE x) {
    ASSERT(file); fwrite(&x, sizeof(BYTE), 1, file);
}
void DataFile::writeShort(short x) {
    ASSERT(file); fwrite(&x, sizeof(short), 1, file);
}
void DataFile::writeWord(WORD x) {
    ASSERT(file); fwrite(&x, sizeof(WORD), 1, file);
}
void DataFile::writeInt(int x) {
    ASSERT(file); fwrite(&x, sizeof(int), 1, file);
}
void DataFile::writeDword(DWORD x) {
    ASSERT(file); fwrite(&x, sizeof(DWORD), 1, file);
}
void DataFile::writeFloat(float x) {
    ASSERT(file); fwrite(&x, sizeof(float), 1, file);
}
void DataFile::writeDouble(double x) {
    ASSERT(file); fwrite(&x, sizeof(double), 1, file);
}
void DataFile::writeString(LPCTSTR x) {
    ASSERT(file);
    size_t len = strlen(x);
    fwrite(x, 1+len, 1, file);
}
void DataFile::write(LPVOID x, size_t length) {
    ASSERT(file); fwrite(x, length, 1, file);
}

//reading
char DataFile::readChar() {
    ASSERT(file);
    char x; fread(&x, sizeof(char), 1, file); return x;
}
BYTE DataFile::readByte() {
    ASSERT(file);
    BYTE x; fread(&x, sizeof(BYTE), 1, file); return x;
}
short DataFile::readShort() {
    ASSERT(file);
    short x; fread(&x, sizeof(short), 1, file); return x;
}
WORD DataFile::readWord() {
    ASSERT(file);
    WORD x; fread(&x, sizeof(WORD), 1, file); return x;
}
```

```
int DataFile::readInt() {
    ASSERT(file);
    int x; fread(&x, sizeof(int), 1, file); return x;
}
DWORD DataFile::readDword() {
    ASSERT(file);
    DWORD x; fread(&x, sizeof(DWORD), 1, file); return x;
}
float DataFile::readFloat() {
    ASSERT(file);
    float x; fread(&x, sizeof(float), 1, file); return x;
}
double DataFile::readDouble() {
    ASSERT(file);
    double x; fread(&x, sizeof(double), 1, file); return x;
}
CString DataFile::readString() {
    ASSERT(file);
    CString cs; char ch;
    for (ch = fgetc(file); ch && (!feof(file)); ch = fgetc(file))
        cs += ch;
    return cs;
}
void DataFile::read(LPVOID buf, size_t length) {
    ASSERT(file); fread(buf, length, 1, file);
}
```

Fişierul MaterialGraphs.h

```
////////////////////////////////////
// MaterialGraphs.h - header file

#ifdef __MATERIAL_GRAPHS_H
#define __MATERIAL_GRAPHS_H
```

```
class MaterialGraph : public Abstract2DGraph {
public:
    MaterialGraph();
    virtual float getMinX() {return 0;}
    virtual float getMinY() {return 0;}
    virtual float getMaxY() {return 1;}
};
class MaterialLambdaTGraph : public MaterialGraph {
public:
    MaterialLambdaTGraph();
    virtual float getValue(float x, float y);
    virtual float getMaxX();
    virtual float getMinU() {return 0;}
    virtual float getMaxU();
};
class MaterialFITGraph : public MaterialGraph {
public:
    MaterialFITGraph();
    virtual float getValue(float x, float y);
    virtual float getMaxX();
    virtual float getMinU() {return 0;}
    virtual float getMaxU();
};
class MaterialTFiGraph : public MaterialGraph {
public:
    MaterialTFiGraph();
    virtual float getValue(float x, float y);
    virtual float getMaxX();
    virtual float getMinU() {return 0;}
    virtual float getMaxU();
};
class MaterialHTGraph : public MaterialGraph {
public:
    MaterialHTGraph();
    virtual float getValue(float x, float y);
    virtual float getMaxX();
    virtual float getMinU() {return 0;}
    virtual float getMaxU();
};
class MaterialTHGraph : public MaterialGraph {
public:
    MaterialTHGraph();
    virtual float getValue(float x, float y);
    virtual float getMinU() {return 0;}
    virtual float getMaxU();
    virtual float getMaxX();
};
#endif// __MATERIAL_GRAPHS_H
```

Fişierul MaterialGraphs.cpp

```

////////////////////////////////////
// MaterialGraphs.cpp - implementation file

#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"
#define TLMAX 1200
#define TFIMAX 1200
#define THMAX 1600

////////////////////////////////////
//class MaterialGraph
MaterialGraph::MaterialGraph() {
    yValues.fromString("0 1");
}
////////////////////////////////////
//class MaterialLambdaTGraph
MaterialLambdaTGraph::MaterialLambdaTGraph() {
    yValues.empty();
    labelX = "t [□C]"; labelU = "#SI #X[W/m□C]";
    setName("lambda(t)");
}
float MaterialLambdaTGraph::getValue(float x, float y) {
    return getMDF()->matSteel.lambda_t(x);
}
float MaterialLambdaTGraph::getMaxX() {
    return TLMAX;
}
float MaterialLambdaTGraph::getMaxU() {
    return getMDF()->matSteel.lambda_0();
}
////////////////////////////////////
//class MaterialFiTGraph
MaterialFiTGraph::MaterialFiTGraph() {
    labelX = "t [□C]"; labelU = "#SF #X[□C]";
    setName("fi(t)");
}
float MaterialFiTGraph::getValue(float x, float y) {
    if (y==0) return getMDF()->matSteel.fi_t(x);
    else return getMDF()->matCopper.fi_t(x);
}
float MaterialFiTGraph::getMaxX() {
    return TFIMAX;
}
float MaterialFiTGraph::getMaxU() {
    double m0 = getMDF()->matCopper.fi_t(TFIMAX);
    double m1 = getMDF()->matSteel.fi_t(TFIMAX);
    return MAX(m0, m1);
}
////////////////////////////////////

```

```

//class MaterialTFiGraph
MaterialTFiGraph::MaterialTFiGraph() {
    labelX = "#SF #X[□C]"; labelU = "t [□C]";
    setName("t(fi)");
}
float MaterialTFiGraph::getValue(float x, float y) {
    if (y==0) return getMDF()->matSteel.t_fi(x);
    else return getMDF()->matCopper.t_fi(x);
}
float MaterialTFiGraph::getMaxX() {
    double m0 = getMDF()->matCopper.fi_t(TFIMAX);
    double m1 = getMDF()->matSteel.fi_t(TFIMAX);
    return MAX(m0, m1);
}
float MaterialTFiGraph::getMaxU() {
    double m = getMaxX();
    double m0 = getMDF()->matCopper.t_fi(m);
    double m1 = getMDF()->matSteel.t_fi(m);
    return MAX(m0, m1);
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//class MaterialHTGraph
MaterialHTGraph::MaterialHTGraph() {
    labelX = "t [□C]"; labelU = "H [kJ/kg]";
    setName("H(t)");
}
float MaterialHTGraph::getValue(float x, float y) {
    if (y==0) return getMDF()->matSteel.h_t(x)/1000;
    else return getMDF()->matCopper.h_t(x)/1000;
}
float MaterialHTGraph::getMaxX() {
    return THMAX;
}
float MaterialHTGraph::getMaxU() {
    double m0 = getMDF()->matCopper.h_t(THMAX) / 1000;
    double m1 = getMDF()->matSteel.h_t(THMAX) / 1000;
    return MAX(m0, m1);
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
//class MaterialTHGraph
MaterialTHGraph::MaterialTHGraph() {
    labelX = "H [kJ/kg]"; labelU = "t [□C]";
    setName("t(H)");
}
float MaterialTHGraph::getValue(float x, float y) {
    if (y==0) return getMDF()->matSteel.t_h(x*1000);
    else return getMDF()->matCopper.t_h(x*1000);
}
float MaterialTHGraph::getMaxX() {
    double m0 = getMDF()->matCopper.h_t(THMAX) / 1000;
    double m1 = getMDF()->matSteel.h_t(THMAX) / 1000;
}

```

```

    return MAX(m0, m1);
}
float MaterialTHGraph::getMaxU() {
    double m = getMaxX() * 1000;
    double m0 = getMDF()->matCopper.t_h(m);
    double m1 = getMDF()->matSteel.t_h(m);
    return MAX(m0, m1);
}

```

Fişierul MetalGraphs.h

```

////////////////////////////////////
// MetalGraphs.h - header file

#ifndef __METAL_GRAPHHS_H
#define __METAL_GRAPHHS_H

////////////////////////////////////
// Metal 2D graphs
class MetalGraph : public Abstract2DGraph {
public:
    MetalGraph();
    virtual void build();
    virtual float getMinX() {return 0;}
    virtual float getMaxX();
    virtual float getMinY() {return 0;}
    virtual float getMaxY() {return 100;}
};
class MetalGraphWire : public MetalGraph {
public:
    MetalGraphWire();
    virtual float getValue(float x, float y);
};
class MetalGraphCrystallizer : public MetalGraph {
public:
    MetalGraphCrystallizer();
    virtual float getMaxX();
    virtual float getValue(float x, float y);
};
class MetalGraphFull : public MetalGraph {
public:
    MetalGraphFull();
    virtual float getValue(float x, float y);
};
class MetalGraphSolid : public MetalGraph {
public:
    MetalGraphSolid();
    virtual float getMaxY() {return 100;}
    virtual float getValue(float x, float y);
};
class MetalGraphSolSpeed : public MetalGraph {

```



```
public:
    MetalGraphSolSpeed();
    //virtual float getMaxY() {return 100;}
    virtual float getValue(float x, float y);
};
////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// Metal 3D graphs
class Metal3DGraph : public Abstract3DGraph {
public:
    virtual void build();
    virtual float getMinX() {return 0;}
    virtual float getMaxX();
    virtual float getMinY() {return 0;}
    virtual float getMaxY() {return 100;}
};
class Metal3DGraphSide : public Metal3DGraph {
    int ypos;
public:
    Metal3DGraphSide();
    virtual void build();
    virtual float getValue(float x, float y);
    virtual bool canSlide() {return true;}
    virtual void openSlider();
};
class Metal3DGraphDiag : public Metal3DGraph {
public:
    Metal3DGraphDiag();
    virtual float getValue(float x, float y);
};
class Metal3DGraphAtMoment : public Metal3DGraph {
    float time;
public:
    Metal3DGraphAtMoment();
    virtual void build();
    virtual float getValue(float x, float y);
    virtual float getMaxX() {return 100;}
    virtual float getMaxY() {return 360;}
    virtual bool canSlide() {return true;}
    virtual void openSlider();
};
#endif//__METAL_GRAPHS_H
```

Fişierul MetalGraphs.cpp

```

////////////////////////////////////
// MetalGraphs.cpp - implementation file

#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"
#define EPS 1e-6
#define ESPEED 10

////////////////////////////////////
//class MetalGraph
MetalGraph::MetalGraph() {
    labelX = "#St #X[s]"; labelY = "pt."; labelU = "t [□C]";
    //haveLegend = TRUE;
    catchZero = FALSE;
}
void MetalGraph::build() {
    if (!getMDF()->canDraw()) {array.clear(); return;}
    Abstract2DGraph::build();
}
float MetalGraph::getMaxX() {
    return getMDF()->max_time;
}
////////////////////////////////////
//class MetalGraphWire
MetalGraphWire::MetalGraphWire() {
    yValues.fromString("0 10 25 50 75 90 100");
    name = "MetalGraphWire";
}
float MetalGraphWire::getValue(float x, float y) {
    MetalDataFile *mdf = getMDF();
    return mdf->getValueWire(y / 100, 0, x);
}
////////////////////////////////////
//class MetalGraphCrystallizer
MetalGraphCrystallizer::MetalGraphCrystallizer() {
    yValues.fromString("1 5 10 50 100");
    name = "MetalGraphCrystallizer";
}
float MetalGraphCrystallizer::getMaxX() {
    return getMDF()->getFogTime() - 0.1;
}
float MetalGraphCrystallizer::getValue(float x, float y) {
    MetalDataFile *mdf = getMDF();
    return mdf->getValue(mdf->wirX + mdf->cryThick * y / 100, 0, x);
}
////////////////////////////////////
//class MetalGraphFull
MetalGraphFull::MetalGraphFull() {
    yValues.fromString("0 25 50 75 90 100 150 200");
}

```

```

    name = "MetalGraphFull";
}
float MetalGraphFull::getValue(float x, float y) {
    MetalDataFile *mdf = getMDF();
    if (y < 100) return mdf->getValueWire(y / 100, 0, x);
    else return mdf->getValue(mdf->wirX + mdf->cryThick * (y-100)/100, 0, x);
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//class MetalGraphSolid
MetalGraphSolid::MetalGraphSolid() {
    name = "MetalGraphSolid";
    labelU = "xs [%]";
    yValues.fromString("0");
}
float MetalGraphSolid::getValue(float x, float y) {
    return 100 * getMDF()->findSolidusX(x);
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//class MetalGraphSolSpeed
MetalGraphSolSpeed::MetalGraphSolSpeed() {
    name = "MetalGraphSolSpeed";
    labelU = "vs [%/s]";
    yValues.fromString("0");
}
float MetalGraphSolSpeed::getValue(float x, float y) {
    float dt = 5;
    return 100*(getMDF()->findSolidusX(x - dt) -
    getMDF()->findSolidusX(x + dt)) / (2*dt);
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//class Metal3DGraph
void Metal3DGraph::build() {
    if (!getMDF()->canDraw()) {array.clear(); return;}
    Abstract3DGraph::build();
}
float Metal3DGraph::getMaxX() {
    return getMDF()->max_time;
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//class Metal3DGraphSide
Metal3DGraphSide::Metal3DGraphSide() {
    name = "Metal3DGraphSide";
    labelX = "#St #X[s]";
    labelY = "r [%]";
    labelU = "t [□C]";
    ypos = 0;
}
float Metal3DGraphSide::getValue(float x, float y) {
    return getMDF()->getValueWire(y/100, (float)ypos/100, x);
}
void Metal3DGraphSide::build() {

```

```

if (!getMDF()->canDraw()) return;
name = "Metal3DGraphSide - " + Format("%d%%", ypos);
Metal3DGraph::build();
}
void Metal3DGraphSide::openSlider() {
    CSliderDialog dlg(wnd);
    int res = dlg.open(name + " - y [%]", 0,
        100, ypos);
    if (res == IDOK) {
        ypos = dlg.getValue();
        name = "Metal3DGraphSide - " + Format("%d%%", ypos);
        refresh();
    }
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//class Metal3DGraphDiag
Metal3DGraphDiag::Metal3DGraphDiag() {
    name = "Metal3DGraphDiag";
    labelX = "#St #X[s]";
    labelY = "d [%]";
    labelU = "t [□C]";
}
float Metal3DGraphDiag::getValue(float x, float y) {
    y /= 100;
    return getMDF()->getValueWire(y, y, x);
}
/////////////////////////////////////////////////////////////////
//class Metal3DGraphAtMoment
Metal3DGraphAtMoment::Metal3DGraphAtMoment() {
    name = "Metal3DGraphAtMoment";
    labelX = "r [%]";
    labelY = "#Sj #X[grd]";
    labelU = "t [□C]";
    time = -1;
}
float Metal3DGraphAtMoment::getValue(float x, float y) {
    return getMDF()->getValueWire(x/100, y/360, time);
}
void Metal3DGraphAtMoment::build() {
    if (!getMDF()->canDraw()) return;
    if ((time < 0) || (time > getMDF()->max_time))
        time = getMDF()->max_time;
    name = "Metal3DGraphAtMoment - " + hms(time);
    Metal3DGraph::build();
}
void Metal3DGraphAtMoment::openSlider() {
    CSliderDialog dlg(wnd);
    int res = dlg.open(name + " - time [s]", 0,
        getMDF()->max_time, time);
    if (res == IDOK) {
        time = dlg.getValue();    name = "Metal3DGraphAtMoment - " + hms(time);
    }
}

```

```
refresh();
```

Fişierul ProgressDialog.h

```

////////////////////////////////////
// ProgressDialog.h - header file

#ifdef AFX_PROGRESSDIALOG_H__00E8CDC1_9376_11D7_80A6_B9A565783660
__INCLUDED_
#define AFX_PROGRESSDIALOG_H__00E8CDC1_9376_11D7_80A6_B9A565783660__INCLU
DED_

#ifdef _MSC_VER > 1000
#pragma once
#endif // _MSC_VER > 1000

////////////////////////////////////
// ProgressDialog dialog
class ProgressDialog : public CDialog {
    friend class HeatFlowCalculator;
    friend class MetalDataFile;
private:
    volatile BOOL finished;
    DoubleArray *dat;
    double tmin, tmax;
    int imax, jmax, iing, jing;
    DWORD startTime, updateTime;
    BOOL separated, stripped;
    MetalDataFile *mdf;
public:
    static UINT thread(LPVOID param);
    static BOOL callback(LPVOID _this, HeatFlowCalculator *hfc);
    BOOL callbackHelper(HeatFlowCalculator *hfc);
    void attach(MetalDataFile *mdf);
    ProgressDialog(CWnd* pParent = NULL); // standard constructor

// Dialog Data
//{{AFX_DATA(ProgressDialog)
enum { IDD = IDD_PROGRESS_DIALOG };
// NOTE: the ClassWizard will add data members here
//}}AFX_DATA

// Overrides
// ClassWizard generated virtual function overrides
//{{AFX_VIRTUAL(ProgressDialog)
protected:
virtual BOOL OnCommand(WPARAM wParam, LPARAM lParam);
//}}AFX_VIRTUAL

```

```

// Implementation
protected:
    // Generated message map functions
   //{{AFX_MSG(CProgressDialog)
    virtual void OnCancel();
    virtual BOOL OnInitDialog();
    afx_msg void OnDrawItem(int nIDCtl, LPDRAWITEMSTRUCT
lpDrawItemStruct);
    afx_msg void OnDestroy();
    afx_msg void OnTimer(UINT nIDEvent);
   //}}AFX_MSG
    DECLARE_MESSAGE_MAP()
};

//{{AFX_INSERT_LOCATION}}
// Microsoft Visual C++ will insert additional declarations immediately before the
previous line.

#endif //
#ifdef(AFX_PROGRESSDIALOG_H__00E8CDC1_9376_11D7_80A6_B9A565783660
__INCLUDED_)

```

Fişierul ProgressDialog.cpp

```

////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
// ProgressDialog.cpp - implementation file

#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"

#ifdef _DEBUG
#define new DEBUG_NEW
#undef THIS_FILE
static char THIS_FILE[] = __FILE__;
#endif

#define WMC_TERMINATE 0xFFFF
BOOL calcul_signal_stop = FALSE;

COLORREF doColor(double t) {
    if (t < 0) {
        if (t > -0.0000001) t = 0;
        else return (COLORREF)0;
    } else if (t > 1) {
        if (t < 1.0000001) t = 1;
        else return (COLORREF)0;
    }
    int r, g, b;

```

```

if (t < 0.5) {
    r = 0; g = 510*t; b = 255*(1-2*t);
} else {
    r = 510*t-255; g = 510*(1-t); b = 0;
}
return RGB(r, g, b);
}

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// CProgressDialog dialog
CProgressDialog::CProgressDialog(CWnd* pParent /*=NULL*/)
: CDialog(CProgressDialog::IDD, pParent) {
    dat = NULL; finished = FALSE;
    //{{AFX_DATA_INIT(CProgressDialog)
    // NOTE: the ClassWizard will add member initialization here
    //}}AFX_DATA_INIT
}

BEGIN_MESSAGE_MAP(CProgressDialog, CDialog)
    //{{AFX_MSG_MAP(CProgressDialog)
    ON_WM_DRAWITEM()
    ON_WM_DESTROY()
    ON_WM_TIMER()
    //}}AFX_MSG_MAP
END_MESSAGE_MAP()

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// CProgressDialog message handlers
BOOL CProgressDialog::OnInitDialog() {
    CDialog::OnInitDialog();
    CheckDlgButton(IDCP_KEEP, BST_CHECKED);
    //CheckDlgButton(IDCP_OPEN_WINDOWS, BST_CHECKED);

    dat = NULL; finished = FALSE;
    SetOwnerDraw(GetDlgItem(IDC_GRAPH));
    startTime = updateTime = GetTickCount();
    calcul_signal_stop = FALSE;
    SetTimer(1, 1000, NULL);
    AfxBeginThread(thread, this, -2);
    return TRUE;
}
void CProgressDialog::OnCancel() {
    if (finished) CDialog::OnOK();
    calcul_signal_stop = TRUE;
    KillTimer(1);
}
void CProgressDialog::OnDestroy() {
    CDialog::OnDestroy();
    DEL(dat);
}
void CProgressDialog::OnTimer(UINT nIDEvent) {

```

```

    if (nIDEvent != 1) return;
    DWORD time = GetTickCount();
    SetWindowText(CString("Calcul - ") +
        hms((time - startTime)/1000));
}
void CProgressDialog::OnDrawItem(int nIDCtl,
LPDRAWITEMSTRUCT lpDrawItemStruct) {
    if (calcul_signal_stop) return;
    CDC dc; dc.Attach(lpDrawItemStruct->hDC);
    CRect crt, rt(lpDrawItemStruct->rclItem);
    if (!dat) {
        dc.FillRect(rt, &CBrush(RGB(255, 255, 255)));
        dc.Detach(); return;
    }
    int h, v;
    double t, x, y, r, fi;
    for (h = rt.left; h < rt.right; h++) {
        x = 2*(double)(h - rt.left) / rt.Width() - 1;
        for (v = rt.top; v < rt.bottom; v++) {
            y = 2*(double)(v - rt.top) / rt.Height() - 1;
            r = sqrt(x * x + y * y);
            if (r > 1) {
                dc.SetPixelV(h, v, RGB(255, 255, 255));
                continue;
            }
            fi = -atan2(y, x);
            while (fi < 0) fi += M_2_PI;
            t = (*dat).interpolate(r, fi / M_2_PI);
            t = (t - tmin) / (tmax - tmin);
            dc.SetPixelV(h, v, doColor(t));
        }
    }
    dc.Detach();
}
BOOL CProgressDialog::OnCommand(WPARAM wParam, LPARAM lParam) {
    if (wParam == WMC_TERMINATE) {
        KillTimer(1);
        getMainWindow()->PostMessage(WM_COMMAND,
            WMC_BUILD_METAL_GRAPHS);
        if (IsDlgButtonChecked(IDC_OPEN_WINDOWS))
            getMainWindow()->PostMessage(WM_COMMAND,
                IDC_MET_SHOW_ALL);
        if (!IsDlgButtonChecked(IDC_KEEP)) {
            SleepEx(250, 0); CDialog::OnOK();
        }
        return TRUE;
    }
    return CDialog::OnCommand(wParam, lParam);
}
////////////////////////////////////////////////////////////////////
// CProgressDialog functions

```



```

void CProgressDialog::attach(MetalDataFile *mdf) {
    CProgressDialog::mdf = mdf;
    mdf->setProgressCallback(callback, this);
}
UINT CProgressDialog::thread(LPVOID param) {
    CProgressDialog *cpd = (CProgressDialog*)param;
    cpd->mdf->calculate();
    if (::IsWindow(cpd->m_hWnd)) {
        cpd->GetDlgItem(IDCANCEL)->EnableWindow(TRUE);
        cpd->SetDlgItemText(IDCANCEL, "Close");
    }
    cpd->finished = TRUE;
    return 0;
}
BOOL CProgressDialog::callback(LPVOID _this, HeatFlowCalculator *hfc) {
    return ((CProgressDialog *)_this)->callbackHelper(hfc);
}
BOOL CProgressDialog::callbackHelper(HeatFlowCalculator *hfc) {
    if (!hfc) { // file is open for reading
        PostMessage(WM_COMMAND, WMC_TERMINATE);
        return FALSE;
    }
    if (!::IsWindow(m_hWnd)) return FALSE;
    if (calcul_signal_stop) return FALSE;
    DWORD time = GetTickCount();
    if (time - updateTime < 100) return TRUE;
    updateTime = time;
    tmin = 0; tmax = mdf->tini;
    imax = hfc->dat.nsize(); iing = mdf->nwir;
    jmax = hfc->dat.msize(); jing = mdf->mwir;
    stripped = hfc->stripped;
    SetDlgItemInt(IDC_STEP, mdf->iterations);
    SetDlgItemText(IDC_TIME, hms(hfc->time));
    if (hfc->prev) {
        SetDlgItemText(IDC_DTIME,
            msecods(hfc->time - hfc->prev->time));
    }
    SetDlgItemInt(IDC_TMIN, hfc->tmin);
    SetDlgItemInt(IDC_TMED, hfc->tmed);
    SetDlgItemInt(IDC_TMAX, hfc->tmax);
    if (!stripped) {
        SetDlgItemInt(IDC_TMLDMIN, hfc->tcrymin);
        SetDlgItemInt(IDC_TMLDMED, hfc->tcrymed);
        SetDlgItemInt(IDC_TMLDMAX, hfc->tcrymax);
    }
    DEL(dat); dat = new DoubleArray(hfc->dat);
    GetDlgItem(IDC_GRAPH)->Invalidate();
    return TRUE;
}

```

Fişierul MetalDialog.h

```

////////////////////////////////////
// MetalDialog.cpp - implementation file

#if
!defined(AFX_METALDIALOG_H__C0868821_977C_11D7_80A6_99D1C4AFEF63__I
NCLUDED_)
#define
AFX_METALDIALOG_H__C0868821_977C_11D7_80A6_99D1C4AFEF63__INCLUDED
-

#if _MSC_VER > 1000
#pragma once
#endif // _MSC_VER > 1000
// MetalDialog.h : header file

////////////////////////////////////
// CMetalDialog dialog
class CMetalDialog : public CDialog {
private:
    int nwir, mwir;
    int ncry, mcry;
    double tini;
    double tcryini;
    double wirX;
    double cryThick;
    double flowSpeed;
    double cryLength, fogLength;
    double cryPt, fogPt;
    double fillfactor;
    int filltype;
    double fillconc;
    double dzg, lambdazg, epsilon;
    double max_dh;
    Material matSteel, matCopper;

    CComboBox *cmbStrip, *cmbStop;
// Construction
public:
    CMetalDialog(CWnd* pParent = NULL); // standard constructor
    void readFromMDF(MetalDataFile *mdf);
    void writeToMDF(MetalDataFile *mdf);

// Dialog Data
//{{AFX_DATA(CMetalDialog)
enum { IDD = IDD_METAL_DIALOG };
// NOTE: the ClassWizard will add data members here
//}}AFX_DATA

```

```

// Overrides
// ClassWizard generated virtual function overrides
//{{AFX_VIRTUAL(CMetalDialog)
protected:
//}}AFX_VIRTUAL

// Implementation
protected:

// Generated message map functions
//{{AFX_MSG(CMetalDialog)
virtual BOOL OnInitDialog();
virtual void OnOK();
afx_msg void OnReset();
//}}AFX_MSG
DECLARE_MESSAGE_MAP()
};

//{{AFX_INSERT_LOCATION}}
// Microsoft Visual C++ will insert additional declarations immediately before the
previous line.

#endif //
!defined(AFX_METALDIALOG_H__C0868821_977C_11D7_80A6_99D1C4AFEF63__I
NCLUDED_)

```

Fişierul MetalDialog.cpp

```

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// MetalDialog.cpp - implementation file

#include "stdafx.h"
#include "Headers.h"

#ifdef _DEBUG
#define new DEBUG_NEW
#undef THIS_FILE
static char THIS_FILE[] = __FILE__;
#endif

#define MDFCOPY(x) x = mdf->x
#define COPYMDF(x) mdf->x = x

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// CMetalDialog dialog
CMetalDialog::CMetalDialog(CWnd* pParent /*=NULL*/)
: CDialog(CMetalDialog::IDD, pParent) {
//{{AFX_DATA_INIT(CMetalDialog)

```

```

    // NOTE: the ClassWizard will add member initialization here
    //}}AFX_DATA_INIT
}

BEGIN_MESSAGE_MAP(CMetalDialog, CDialog)
   //{{AFX_MSG_MAP(CMetalDialog)
    ON_BN_CLICKED(IDC_M_RESET, OnReset)
    //}}AFX_MSG_MAP
END_MESSAGE_MAP()

////////////////////////////////////
// CMetalDialog message handlers
void CMetalDialog::readFromMDF(MetalDataFile *mdf) {
    MDFCOPY(nwir); MDFCOPY(mwir);
    MDFCOPY(ncry);
    MDFCOPY(tini); MDFCOPY(tcryini);
    MDFCOPY(wirX);
    MDFCOPY(cryThick);
    MDFCOPY(max_dh);
    MDFCOPY(flowSpeed);
    MDFCOPY(cryLength); MDFCOPY(fogLength);
    MDFCOPY(cryPt); MDFCOPY(fogPt);
    MDFCOPY(fillfactor);
    MDFCOPY(filltype);
    MDFCOPY(fillconc);
    MDFCOPY(dzg);
    MDFCOPY(lambdazg);
    MDFCOPY(epsilon);

    mdf->matSteel.clone(&matSteel);
    mdf->matCopper.clone(&matCopper);

    SetDlgItemInt(IDC_M_TMLDINI, tcryini);
    SetDlgItemInt(IDC_M_TINI, tini);
    SetDlgItemInt(IDC_M_INGX, wirX*2000);
    SetDlgItemInt(IDC_M_MLDTHICK, cryThick*1000);
    SetDlgItemInt(IDC_M_NING, nwir);
    SetDlgItemInt(IDC_M_MING, mwir);
    SetDlgItemInt(IDC_M_NMLD, ncry);
    SetDlgItemInt(IDC_M_MMLD, mcry);
    SetDlgItemInt(IDC_M_MAXDH, max_dh);
    SetDlgItemInt(IDC_M_FLOWSPD, flowSpeed*60000);
    SetDlgItemInt(IDC_M_MLDLENGTH, cryLength*1000);
    SetDlgItemInt(IDC_M_FOGLLENGTH, fogLength*1000);
    SetDlgItemInt(IDC_M_MLDPT, cryPt/1000);
    SetDlgItemInt(IDC_M_FOGPT, fogPt/1000);
    SetDlgItemText(IDC_M_FILLFACTOR, Format("%lg", 100 * fillfactor));
    ((CComboBox*)GetDlgItem(IDC_M_FILLTYPE))->SetCurSel(filltype);
    SetDlgItemText(IDC_M_FILLCONC, Format("%lg", 1 / fillconc));
    SetDlgItemText(IDC_M_DZG, Format("%lg", dzg * 1000));
    SetDlgItemText(IDC_M_LAMBDAZG, Format("%lg", lambdazg));
}

```

```

    SetDlgItemText(IDC_M_EPSILON, Format("%lg", epsilon));
}
void CMetalDialog::writeToMDF(MetalDataFile *mdf) {
    COPYMDF(nwir); COPYMDF(mwir);
    COPYMDF(ncry);
    COPYMDF(tini); COPYMDF(tcryini);
    COPYMDF(wirX);

    COPYMDF(cryThick);
    COPYMDF(max_dh);
    COPYMDF(flowSpeed);
    COPYMDF(cryLength); COPYMDF(fogLength);
    COPYMDF(cryPt); COPYMDF(fogPt);
    COPYMDF(fillfactor);
    COPYMDF(filltype);
    COPYMDF(fillconc);
    COPYMDF(dzg);
    COPYMDF(lambdazg);
    COPYMDF(epsilon);
    matSteel.clone(&mdf->matSteel);
    matCopper.clone(&mdf->matCopper);
}
BOOL CMetalDialog::OnInitDialog() {
    CDialog::OnInitDialog();
    cmbStrip = (CComboBox*)GetDlgItem(IDC_M_STRIP_TYPE);
    cmbStop = (CComboBox*)GetDlgItem(IDC_M_STOP_TYPE);
    readFromMDF(getMDF());
    return TRUE;
}
void CMetalDialog::OnOK() {
    tcryini = GetDlgItemInt(IDC_M_TMLDINI);
    tini = GetDlgItemInt(IDC_M_TINI);
    wirX = GetDlgItemInt(IDC_M_INGX) / 2000.0;
    cryThick = GetDlgItemInt(IDC_M_MLDTHICK) / 1000.0;
    nwir = GetDlgItemInt(IDC_M_NING);
    mwir = GetDlgItemInt(IDC_M_MING);
    ncry = GetDlgItemInt(IDC_M_NMLD);
    mcry = GetDlgItemInt(IDC_M_MMLD);
    max_dh = GetDlgItemInt(IDC_M_MAXDH);
    flowSpeed = GetDlgItemInt(IDC_M_FLOWSPEED) / 60000.0;
    cryLength = GetDlgItemInt(IDC_M_MLDLENGTH) / 1000.0;
    fogLength = GetDlgItemInt(IDC_M_FOGLENGTH) / 1000.0;
    cryPt = GetDlgItemInt(IDC_M_MLDPT) * 1000.0;
    fogPt = GetDlgItemInt(IDC_M_FOGPT) * 1000.0;
    CString cs; double x;
    GetDlgItemText(IDC_M_FILLFACTOR, cs);
    if (sscanf(cs, "%lg", &x) == 1) fillfactor = x / 100;
    filltype = ((CComboBox*)GetDlgItem(IDC_M_FILLTYPE))->GetCurSel();
    GetDlgItemText(IDC_M_FILLCONC, cs);
    if (sscanf(cs, "%lg", &x) == 1) if (x != 0) fillconc = 1 / x;
    GetDlgItemText(IDC_M_DZG, cs);
}

```

```
if (sscanf(cs, "%lg", &x) == 1) dzg = x / 1000;
GetDlgItemText(IDC_M_LAMBDZG, cs);
if (sscanf(cs, "%lg", &x) == 1) lambdazg = x;
GetDlgItemText(IDC_M_EPSILON, cs);
if (sscanf(cs, "%lg", &x) == 1) epsilon = x;

writeToMDF(getMDF());
DataFile df; df.assign(getDefaultsFile());
getMDF()->writeHeader(&df);
CDialog::OnOK();
}
void CMetalDialog::OnReset() {
    MetalDataFile _mdf;
    readFromMDF(&_mdf);
}
```