

UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ TIMIȘOARA
FACULTATEA DE INGINERIE HUNEDOARA
CATEDRA DE METALURGIE

Ing. ANA VIRGINIA SOCALICI

TEZĂ DE DOCTORAT

*CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA
CALITĂȚII PENTRU PIESELE DIN OȚEL
OBȚINUTE PRIN FORJARE DIN LINGOURI MARI*

369^{642.441}
E

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof. univ. dr. ing. IOAN ILCA

Membru corespondent al Academiei de Științe Tehnice din România

HUNEDOARA

2004

CUPRINS

Scopul lucrării	4
Capitolul 1 – Analiză cu privire la factorii care influențează calitatea lingourilor din oțel	6
1.1. Posibilități de îmbunătățire a calității oțelului	6
1.2. Formarea structurii de turnare a lingourilor din oțel	14
1.2.1. Zona cristalelor echiaxiale mici	16
1.2.2. Zona cristalelor columnare	17
1.2.3. Zona cristalelor echiaxiale mari	18
1.3. Neomogenitatea fizică și structurală a lingourilor din oțel	21
1.4. Neomogenitatea chimică a lingourilor din oțel	22
1.5. Influența factorilor tehnologici asupra calității lingourilor din oțel	29
1.6. Considerații privind dirijarea solidificării lingourilor din oțel	31
1.7. Concluzii	39
Capitolul 2 – Analiza procesului de încălzire a lingourilor din oțel în vederea prelucrării plastice	41
2.1. Variante de încălzire a lingourilor mari din oțel în vederea deformării plastice	45
2.2. Tensiunile termice la încălzire	50
2.3. Optimizarea regimurilor de încălzire a lingurilor mari din oțel	54
2.3.1. Regimurile de încălzire a lingourilor mari din oțel	54
2.3.2. Rezolvarea numerică a ecuației conducției termice prin metoda diferențelor finite	55
2.3.3. Contribuții privind distribuția câmpului de temperaturi în lingouri prin metoda diferențelor finite	59
2.4. Considerații cu privire la încălzirea lingourilor mari din oțel aliat destinate forjării	66
2.5. Concluzii	72
Capitolul 3 – Cercetări experimentale cu privire la dirijarea solidificării lingourilor. Prelucrarea și interpretarea rezultatelor	74
3.1. Experimentări în fază de laborator	75
3.2. Experimentări la scară industrială	82
3.3. Prelucrarea și interpretarea rezultatelor experimentale	89
3.4. Concluzii	95
Capitolul 4 – Modelarea matematică a factorilor de influență asupra calității oțelurilor	98
4.1. Contribuții privind modelarea solidificării lingourilor în cazul utilizării de microrăcitori	99

4.2. Contribuții privind modelarea matematică a factorilor tehnologici cu influență asupra proprietăților mecanice la oțelurile carbon	108
4.3. Concluzii	125
Capitolul 5 – Concluzii finale și contribuții personale	127
Bibliografie	133
Anexe	139
Anexa 1.1. Interacțiunea complexă a microrăcitorilor cu oțelul lichid ...	140
Anexa 2.1. Distribuția unidimensională a temperaturii prin metoda diferențelor finite	141
Anexa 2.2. Distribuția bidimensională a temperaturii prin metoda diferențelor finite	146
Anexa 2.3. Diagrama de normalizare-recoacere	147
Anexa 3.1. Programul SIDHD 3	148
Anexa 3.2. Valorile medii ale parametrilor urmăriți, dispersia, abaterea standard, valorile pentru punctele staționare respectiv valoarea coeficientului de corelație	156
Anexa 4.1. Programul SIDHD 4	161
Anexa 4.2. Programul SIDHD 5	164
Anexa 4.3. Tabelele cu compararea datelor experimentale cu cele teoretice, matricea punctelor staționare, coordonatele punctelor staționare ale suprafețelor respectiv matricea liniilor de contur pentru suprafețele de regresie	169
Anexa 4.4. Delimitarea volumului de variație pentru caracteristicile mecanice	192

SCOPUL LUCRĂRII

Unul din obiectivele principale ale restructurării metalurgiei din România îl constituie îmbunătățirea calității și realizarea produselor după normele internaționale. De asemenea, un alt obiectiv important îl constituie desfășurarea activității în “sistem de asigurare a calității” și ridicarea competitivității produselor.

În această etapă pentru țara noastră este necesar ca metalurgia să-și diversifice structura, să ridice nivelul calitativ al fabricației și să realizeze produse la prețuri practice pe piața internațională, întrucât cererea și rentabilitatea sunt factorii cei mai dinamici ai nivelului de producție de oțel.

Industria metalurgică din România este structurată în mod eșalonat pentru a asigura necesarul de produse metalurgice solicitate de ramurile economice dar și pentru a participa la schimburile internaționale de produse din oțel în vederea compensării importului de materii prime.

Odată cu dezvoltarea tehnicii și respectiv a dotării industriale, cerințele asupra calității pieselor forjate devin din ce în ce mai mari. O astfel de manifestare este impusă și de parametrii economiei de piață, care prin pârghiile ei elimină din competiția concurențială tot ce nu este competitiv.

Pe lângă elementele de orientare, în procesul de deformare plastică prin forjare trebuie analizați și parametrii tehnologici care joacă un rol important în transformările structurale dinamice care au loc pe parcursul prelucrării și care de fapt hotărăsc calitatea produsului. Aceasta înseamnă în primul rând obținerea unei structuri continue, cât mai omogene și cu granulație uniformă în întreg volumul materialului, ceea ce corespunde unor proprietăți calitative ridicate.

Integritatea structurii prezintă două aspecte: o integritate provenită de la materia primă, respectiv de la lingou care la prelucrare prin deformare trebuie menținută respectiv o integritate asigurată de însuși procesul deformării plastice datorită faptului că materia primă prezintă zone cu discontinuități, inevitabile specifice lingourilor de dimensiuni mari. De aici concluzia că defectele interioare sub formă de discontinuități apărute inevitabil la lingouri, trebuie eliminate prin aplicarea unei prelucrări corespunzătoare.

Datorită exigențelor crescânde privind calitatea pieselor mari, în ultima vreme, aceste piese se obțin aproape în exclusivitate prin forjare, turnarea fiind folosită doar pentru piesele la care cerințele de calitate sunt mai reduse.

Opțiunea pentru forjare se datorează proprietăților mecanice mai bune pe care le posedă piesele forjate comparativ cu cele turnate. La rândul său îmbunătățirea proprietăților mecanice ale pieselor și semifabricatelor forjate este

condiționată pe de o parte de respectarea parametrilor termomecanici, de deformare plastică la cald, iar pe de altă parte de tehnologia adoptată.

Calitatea semifabricatului presupune atât aspectul suprafeței exterioare cât și structura internă (inclusiv porozități, gaze, segregatii, incluziuni nemetalice, etc), caracteristici fizico-mecanice și tehnologice. În acest scop, este necesară o analiză detaliată a întregului flux de fabricație (elaborare, tratarea în oală, turnare, forjare, tratament termic, prelucrări mecanice).

Necesitatea abordării temei rezidă din importanța cunoașterii în detaliu a fenomenelor și proceselor care au loc la solidificarea oțelului turnat cu microrăcitori.

Scopul tezei constă în creșterea calității pieselor, prin îmbunătățirea structurii de turnare a lingourilor mari din oțel, utilizând microrăcitori în timpul turnării acestora.

În lucrarea de față se prezintă pe baza studiului literaturii de specialitate, stadiul actual cu privire la creșterea calității pieselor obținute prin forjare din lingouri mari, prin îmbunătățirea structurii de turnare, precum și cercetările și rezultatele acestora în fază de laborator și industrială privitoare la utilizarea microrăcitorilor pentru dirijarea solidificării lingourilor mari din oțel.

Autoarea își exprimă întreaga sa recunoștință conducătorului științific Prof.univ.dr.ing. ILCA IOAN, Membru corespondent al Academiei de Științe Tehnice din România, adresându-i mulțumiri pentru îndrumările primite la realizarea acestei lucrări.

De asemenea, mulțumește pe această cale colegilor din Catedra de Metalurgie a Facultății de Inginerie Hunedoara pentru sugestiile date la redactarea lucrării precum și domnului Ing. Faur Sabin pentru sprijinul acordat în realizarea părții experimentale la scară industrială la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara.

CAPITOLUL 1

ANALIZĂ CU PRIVIRE LA FACTORII CARE INFLUENȚEAZĂ CALITATEA LINGOURILOR DE OȚEL

Lingourile de oțel destinate forjării variază ca dimensiuni și greutate de la câteva sute de kilograme la câteva sute de tone, iar nivelul calitativ poate varia de la calitatea cea mai înaltă la calități obișnuite. Lingourile mici nu constituie o problemă majoră în comparație cu lingourile mari. La lingourile mici segregarea rezultată în urma solidificării, nu este prea pronunțată iar când acest fenomen trebuie diminuat se recurge la tehnici speciale de retopire a oțelului. Accesibilitatea acestor metode speciale se reduce o dată cu creșterea greutății lingourilor. Problemele care apar la lingourile mari constau în puritatea metalului și a repartizării uniforme a incluziunilor pe toată secțiunea lingoului, probleme care se complică odată cu creșterea duratei de solidificare. Această durată crește de la aproximativ 10 ore, în cazul unui lingou de 40 tone la circa 80-90 ore pentru lingourile de 400 tone [1]. Zonele de segregare se formează în urma frontului de solidificare care avansează încet și sunt pronunțate în cazul lingourilor mari.

Lingourile cele mai mari cântăresc 500 tone și sunt turnate în oțelăriile japoneze. Cererea de astfel de lingouri nu este foarte mare, dar lingouri cu greutatea până la 200-300 tone se produc în mod curent în lume [2]. Constructorii solicită piese cu structură internă compactă și proprietăți de rezistență și plasticitate îmbunătățite. O bună parte din probleme trebuie rezolvate în oțelării. În această fază trebuie să se asigure o segregare și o porozitate redusă, un conținut mic de incluziuni nemetalice și gaze, iar conținutul de hidrogen trebuie să se afle la nivelul de 1,5-1,8 ppm, în scopul preîntâmpinării tratamentului termic de dehidrogenare.

Ponderele majoră a oțelurilor pentru lingourile mari de forjă se elaborează în cuptoarele electrice cu arc, cu căptușeală bazică, urmată de prelucrarea în vid.

1.1. Posibilități de îmbunătățire a calității oțelului

Procedeele, tehnologiile și agregatele de elaborare a oțelului sunt într-o permanentă perfecționare și dezvoltare, urmărindu-se îmbunătățirea calității și condițiilor de lucru. Cerințele crescânde de oțeluri de înaltă puritate au determinat realizarea unui număr mare de procedee și tehnici de lucru, în etapa de elaborare secundară, diversificarea acestora fiind impusă, în afară de prescripțiile de calitate a oțelului și de o serie de alți factori ca: procedeul de elaborare primară, dotarea cu utilaje, economia de energie și materiale precum și organizarea fluxurilor tehnologice.

Procedeele de îmbunătățire a calității oțelurilor pot fi clasificate astfel: barbotarea cu gaze inerte cu adaosuri în oala de turnare și reîncălzirea oțelului lichid,

tratarea cu zgure sintetice, injecția de pulberi reactive în oțelul lichid, tratarea în vid a oțelului lichid și alte procedee [3].

Alegerea procedurii cel mai potrivit de tratare în vid a oțelului este o problemă destul de complexă, având în vedere pe de o parte diversitatea metodelor folosite în industrie, iar pe de altă parte faptul că performanțele fiecărei metode sunt în măsură importantă influențate de experiență, asupra căreia de regulă în literatura de specialitate informațiile sunt sumare.

Proprietățile unui oțel depind în cea mai mare parte de o serie de factori, dintre care: compoziția chimică a oțelului, natura, forma, distribuția și cantitatea incluziunilor nemetalice, conținutul de gaze, temperatura de turnare, viteza de turnare, gradul de deformare plastică și tratamentul termic aplicat.

În cazul lingourilor mari din oțel, una din cauzele care conduce la înrăutățirea calității acestora, se datorează conținutului de hidrogen. Acesta se află în oțel în stare atomică, moleculară și sub formă de combinații simple. Având raza atomică mai mică decât a fierului se plasează interstițial și formează o soluție solidă cu masa de bază. Nu formează combinații chimice cu fierul și nici cu alte elemente dizolvate în oțel. În stare moleculară se amplasează în sufluri și microcavități, contribuind chiar la formarea acestora. Cantitatea de hidrogen care se dizolvă în oțel depinde de o serie de factori, dintre care amintim [4]: temperatura oțelului, presiunea de lucru în cuptor și în instalația de tratament a oțelului lichid, compoziția chimică a oțelului, procedeul de elaborare și turnare, etc.

În mod practic, la elaborarea obișnuită conținutul de hidrogen al oțelului variază frecvent între 1,8-10 ppm, iar dacă oțelul este supus metalurgiei secundare de tratare și turnare sub vid conținutul de hidrogen este de maxim 1,8-2,2 ppm (de exemplu la tratarea prin recirculare conținutul de hidrogen se reduce la 1,5 ppm iar pentru un oțel elaborat în cuptor cu inducție în vid sau retopire cu arc în vid conținutul de hidrogen este maxim 1 ppm) [5].

Sursele principale din care hidrogenul poate trece în oțel în stare lichidă, sunt: încărcătura metalică și toate celelalte materiale utilizate la elaborare și turnare, materialele refractare, elementele răcite ale cuptoarelor și a instalațiilor pentru tratamentul oțelului lichid, umiditatea atmosferei în care se lucrează, etc. Conținutul de hidrogen trebuie limitat în oțel deoarece are efecte negative asupra lingourilor sau produselor finite. În stare lichidă, oțelul poate dizolva cantități mari de hidrogen, care la solidificare se separă din soluție și în anumite stadii de prelucrare a metalului pot apărea unele defecte ca: sufluri, linii de umbră și fulgi. La un oțel cu mult hidrogen dacă mai conține și azot pot apărea sufluri la o adâncime de 20-30 mm sub crusta exterioară a lingoului care la forjare, în unele cazuri se deschid, ducând la apariția așchiilor pe suprafața pieselor.

Influența hidrogenului asupra calității oțelurilor poate fi prezentată sintetic astfel: formare de porozități (sufluri), producerea de discontinuități (microscopice) de tipul fulgilor, fragilizarea masei de bază și diminuarea caracteristicilor fizico-mecanice, a proprietăților electrice, a deformațiilor la rece, a sudabilității, etc.

Fulgii apar cu precădere la oțelurile cu mult hidrogen și în situațiile de nerespectare a tratamentului de dehidrogenare și sunt amplasați în unele zone cu rezistență mai scăzută, determinată de prezența incluziunilor nemetalice, liniilor de

alunecare, limite de grăunți, segregării chimice, tensiuni cauzate de deformări sau răcire cu viteză mare a pieselor forjate. Prin tratament termic preliminar adecvat și răcire lentă se pot reduce cazurile de declasare sau rebutare a produselor din oțel cu sensibilitate la apariția fulgilor.

În cazul tratării oțelului prin recirculare în instalațiile DH sau RH rezultatele obținute privind îndepărtarea hidrogenului sunt bune. În fig.1.1 și fig.1.2 se constată influența duratei tratamentului în vid asupra cantității de gaze arse și a presiunii în camera de vidare.

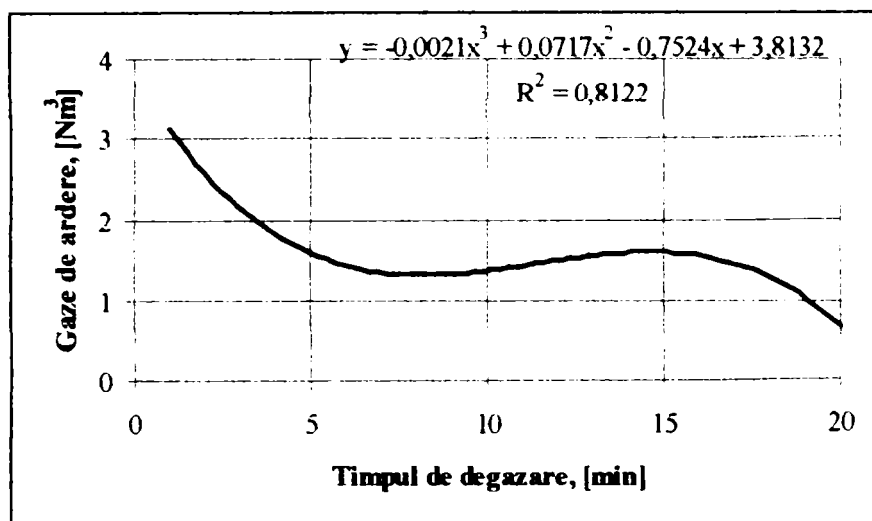


Fig.1.1. Influența timpului de degazare asupra cantității de gaze arse la tratarea oțelului lichid în instalații RH [6].

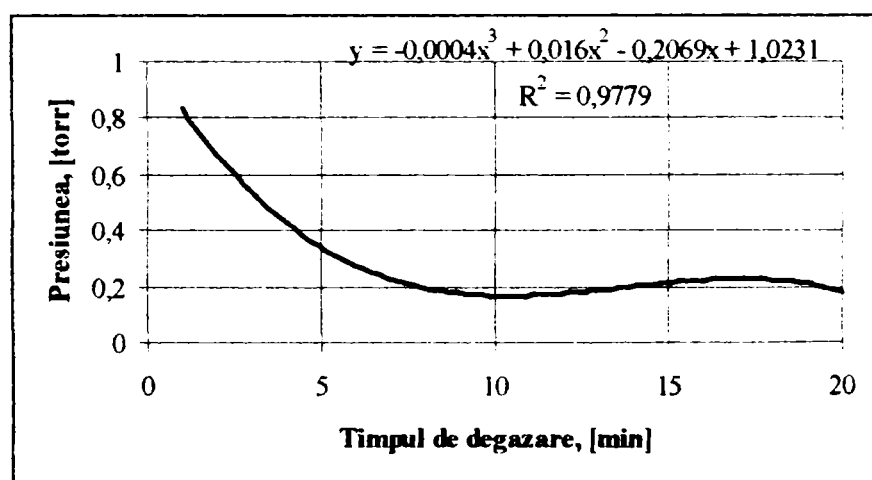


Fig.1.2. Influența timpului de degazare asupra presiunii în camera de vidare la tratarea oțelului lichid în instalații RH [6].

În fig.1.3 se prezintă influența duratei tratamentului în vid asupra cantităților de hidrogen respectiv în fig.1.4 asupra cantităților de monoxid de carbon rezultate în timpul procesului tratării oțelului în instalația RH.

Din analiza diagramelor se observă la început, în primele minute, o creștere rapidă a cantităților de hidrogen și oxid de carbon ce poate fi pusă pe seama intensificării, în stadiul inițial, a reacțiilor de degazare și de dezoxidare în vid, reacții care se încetinesc apoi, pe măsura diminuării conținuturilor de hidrogen, carbon și oxigen dizolvate în oțelul lichid.

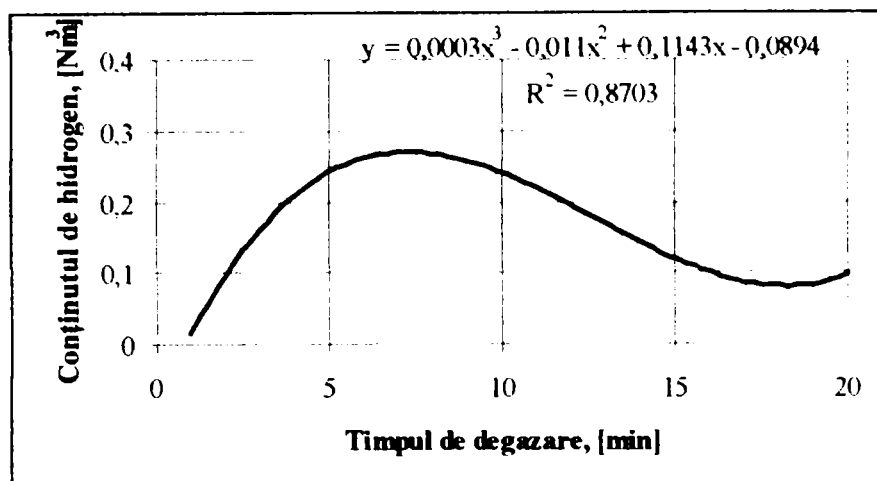


Fig.1.3. Influența timpului de degazare asupra cantității de hidrogen la tratarea oțelului lichid în instalații RH [6].

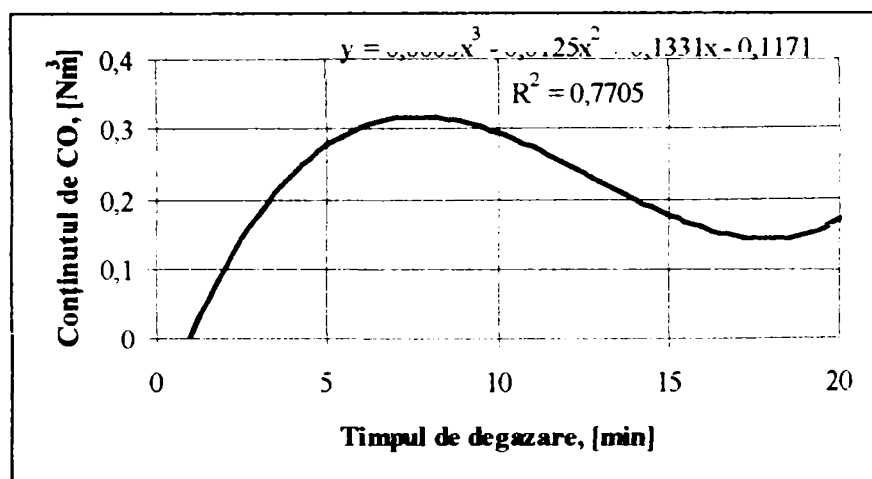


Fig.1.4. Influența timpului de degazare asupra cantității de monoxid de carbon la tratarea oțelului lichid în instalații RH [6].

Un factor determinant cu privire la calitatea oțelului lichid este temperatura acestuia, care după experiența practică, trebuie să depășească cu cel puțin 120°C temperatura lichidus, la evacuarea în oală, pentru compensarea pierderilor mari de căldură, fiind indicată încălzirea prealabilă a camerei de vidare cu ajutorul unor arzătoare sau pe timpul lucrului acesteia prin utilizarea barelor rezistive.

Pentru a studia efectul injecției de argon în instalațiile de tratare în vid prin recirculare asupra îndepărtării hidrogenului am prelucrat, în programul de calcul EXCEL, datele din literatura de specialitate [7] obținând o serie de corelații sub formă grafică și analitică.

Astfel, în fig.1.5 se prezintă variația conținutului de hidrogen, [H] în funcție de coeficientul de circulație (k) a oțelului în instalația de tratare a acestuia în două variante: fără injecție de argon și cu injecție de argon.

Din diagramă se observă existența a două domenii. Primul domeniu, delimitat de curbele de culoare verde (fig.1.5), reprezintă variația conținutului de hidrogen în funcție de coeficientul de circulație al oțelului în instalația de tratare fără injecție de argon iar ecuațiile de corelație sunt:

$$\begin{aligned} &\text{pentru limita superioară,} \\ &[H] = 0,0067 \cdot k^2 - 0,2338 \cdot k + 3,7316; \quad R^2 = 0,9669 \quad (1.1) \\ &\text{pentru limita inferioară,} \end{aligned}$$

$$|H| = 0,0012 \cdot k^2 - 0,1836 \cdot k + 3,3289; \quad R^2 = 0,9558 \quad (1.2)$$

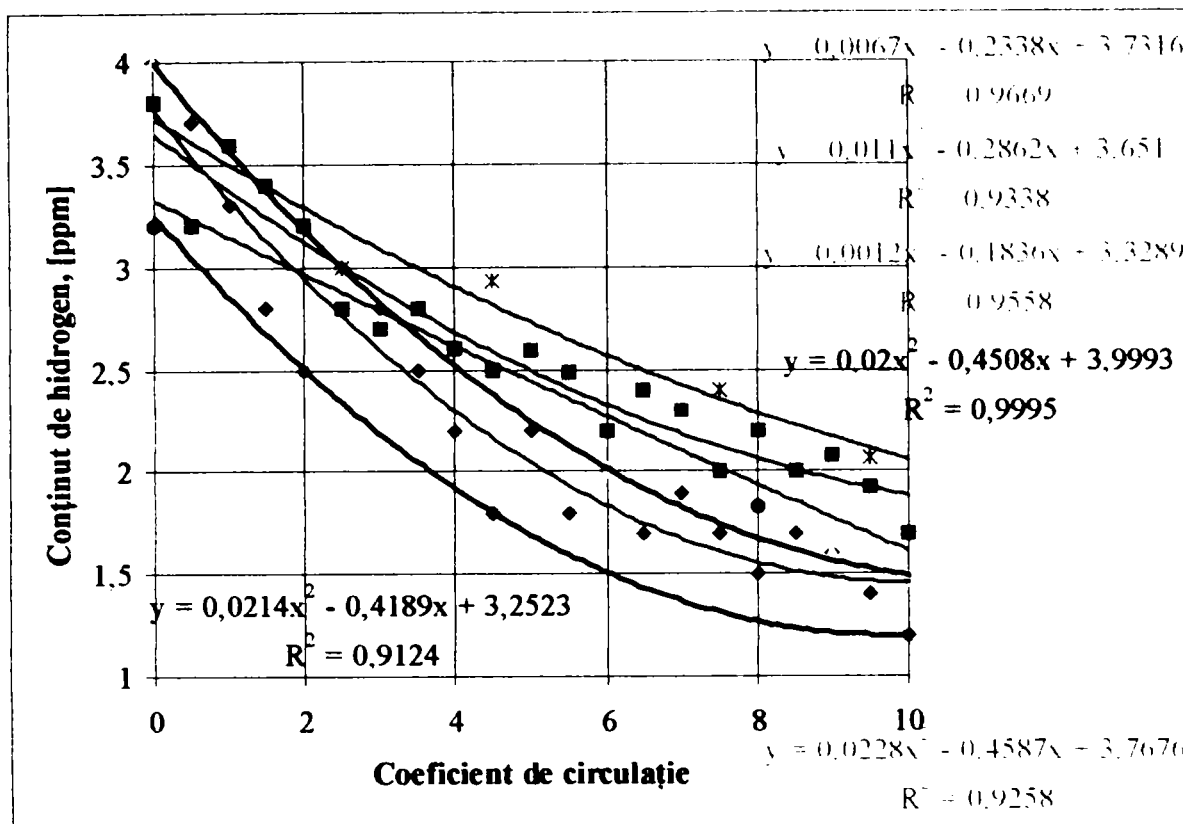


Fig.1.5. Efectul injectiei de argon asupra îndepărtării hidrogenului [8].

Cu excepția a trei valori, una foarte puțin peste limita superioară și două puțin sub limita inferioară, toate valorile pentru conținutul de hidrogen s-au încadrat în domeniul delimitat de cele două curbe. Având în vedere și valorile mari pentru coeficienții de corelație ($R > 0,93$), consider că acest domeniu este foarte bine delimitat de cele două ecuații. Curbele și ecuațiile de corelație corespunzătoare acestui domeniu sunt foarte apropiate și ca urmare este reprezentată cea mai simplă - curba de culoare roșie - cu ecuația:

$$|H| = 0,011 \cdot k^2 - 0,2862 \cdot k + 3,651; \quad R^2 = 0,9338 \quad (1.3)$$

Al doilea domeniu, delimitat de curbele de culoare neagră (fig.1.5), reprezintă variația conținutului de hidrogen în funcție de coeficientul de circulație al oțelului în instalația de tratare cu injectie de argon iar ecuațiile de corelație sunt:

$$\text{pentru limita superioară,} \\ |H| = 0,02 \cdot k^2 - 0,4508 \cdot k + 3,9993; \quad R^2 = 0,9995 \quad (1.4)$$

$$\text{pentru limita inferioară,} \\ |H| = 0,0214 \cdot k^2 - 0,4189 \cdot k + 3,2523; \quad R^2 = 0,9124 \quad (1.5)$$

Valorile pentru conținutul de hidrogen s-au încadrat bine în domeniul delimitat de cele două curbe doar două valori s-au situat puțin peste limita superioară. Având în vedere valorile pentru coeficienții de corelație ($R > 0,90$), consider că acest domeniu este bine delimitat de cele două ecuații. Curbele și ecuațiile de corelație corespunzătoare acestui domeniu sunt apropiate și ca urmare, de asemenea este reprezentată cea mai simplă - curba de culoare albastră - cu ecuația:

$$|H| = 0,0228 \cdot k^2 - 0,4587 \cdot k + 3,7676; \quad R^2 = 0,9258 \quad (1.6)$$

Se observă că în cazul însuflării de argon se obține o îndepărtare avansată a hidrogenului iar creșterea duratei tratamentului conduce la scăderea conținutului de hidrogen sub 1,5 ppm.

Ca și în cazul procedeului RH, procedeului DH i s-au adus în ultimii ani numeroase îmbunătățiri [8]. Pentru a intensifica procesul de degazare a oțelului lichid se practică barbotarea cu argon în oala de turnare cu ajutorul a două ajutaje distanțate pe verticală cu 300-400 mm. Prin acest procedeu se accelerează circulația oțelului lichid, ceea ce intensifică reacțiile de decarburare și dehidrogenare, aceasta din urmă fiind favorizată de apariția în baia metalică a bulelor fine de argon. Unele uzine din Japonia practică barbotarea băii cu argon prin intermediul a două duze distanțate pe verticală cu 300 - 450 mm (dublă injecție), ceea ce a permis intensificarea reacțiilor de dehidrogenare a oțelului (fig. 1.6). Se observă că se obține prin această dublă injecție cu argon un conținut scăzut de hidrogen în oțel, și anume sub 1 ppm.

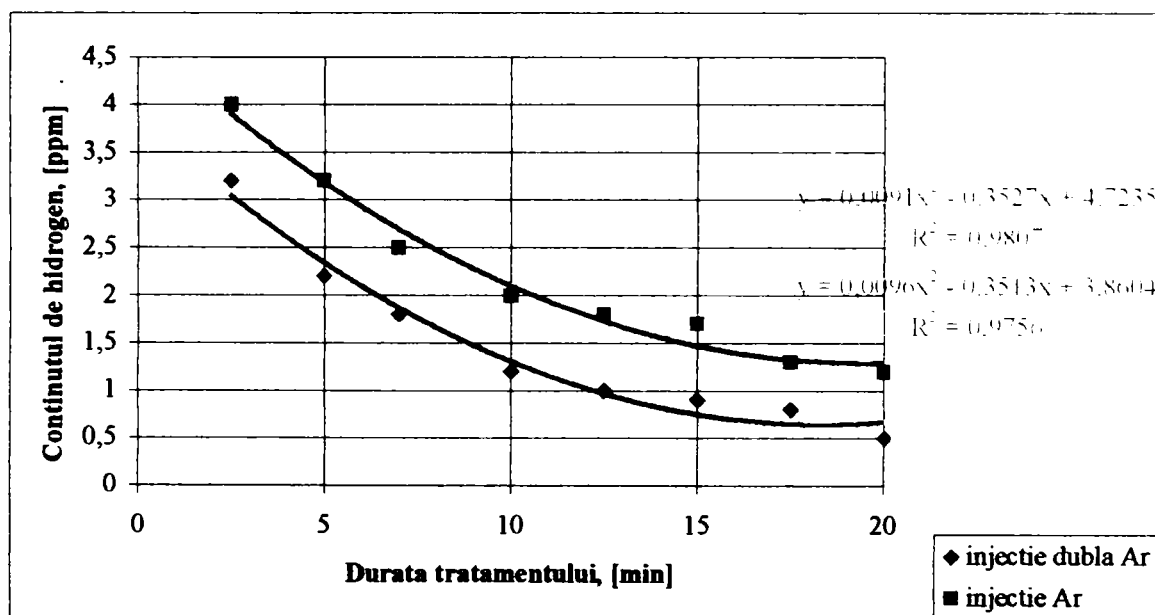


Fig.1.6. Efectul injecției duble cu argon asupra dehidrogenării oțelului lichid în instalația RH [9].

Ecuatiile de corelație cu privire la conținutul de hidrogen în oțelul lichid în instalația de tratament funcție de durata acestuia (t) sunt:

$$\text{pentru tratament și injecție cu argon,} \\ [H] = 0,0091 \cdot t^2 - 0,3527 \cdot t + 4,7235; \quad R^2 = 0,9807 \quad (1.7)$$

$$\text{pentru tratament și injecție dublă cu argon,} \\ [H] = 0,0096 \cdot t^2 - 0,3513 \cdot t + 3,8604; \quad R^2 = 0,9756 \quad (1.8)$$

Analizând reprezentarea grafică a acestor ecuații se observă un conținut de hidrogen mai scăzut cu circa 1 ppm în cazul injecției duble de argon comparativ cu injecția simplă de argon. De asemenea, creșterea duratei tratamentului în vid conduce la scăderea conținutului de hidrogen din oțelul lichid sub 1 ppm în cazul injecției cu argon prin două duze comparativ cu 1,5 ppm la injecția cu argon printr-o singură duză.

Gradul de dehidrogenare a oțelului este de 50-70% și practic este același pentru ambele metode (RH și DH). În urma tratării oțelului prin recirculare se obține o îndepărtare avansată a hidrogenului, o dezoxidare și o decarburare a băii metalice.

Ca o consecință a dezoxidării avansate se modifică, în mod favorabil, cantitatea și morfologia incluziunilor oxidice remanente în oțelul solidificat, ceea ce are drept urmare îmbunătățirea caracteristicilor mecanice ale oțelurilor.

În cazul oțelurilor care sunt tratate în vid prin recirculare cu și fără injecție de argon, întrucât timpul de staționare al oțelului în oală este foarte scurt sunt necesare mai multe recirculări ale oțelului. Prin prelucrarea datelor existente în literatura de specialitate [3, 8, 10], s-au obținut corelații (fig.1.7) cu privire la variația conținutului de hidrogen $[H]$ în funcție de coeficientul de recirculație (k) pentru tratarea prin recirculare a oțelului cu și fără injecție de argon.

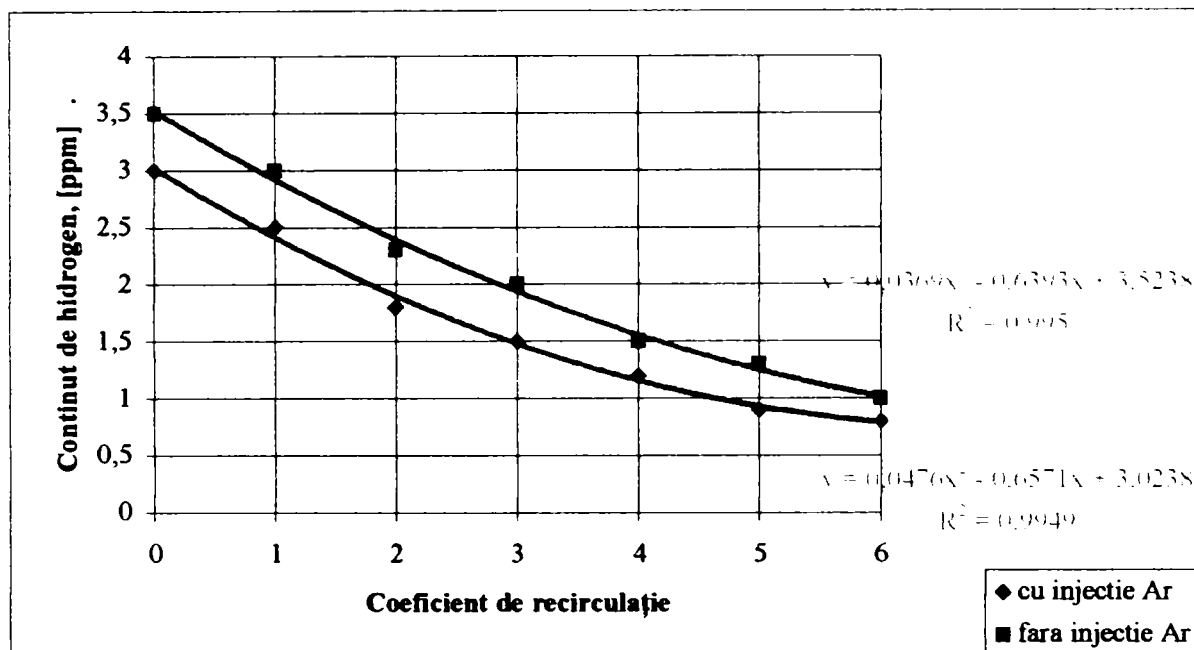


Fig.1.7. Variația conținutului de hidrogen în oțel în funcție de coeficientul de recirculație [10].

Ecuatiile de corelație referitoare la conținutul de hidrogen în oțelul lichid în instalația de tratament în vid prin recirculare funcție de coeficientul de recirculație sunt:

$$\text{pentru tratament în vid fără injecție de argon,} \\ [H] = 0,0369 \cdot k^2 - 0,6393 \cdot k + 3,5238; \quad R^2 = 0,9995 \quad (1.9)$$

$$\text{pentru tratament în vid cu injecție de argon,} \\ [H] = 0,0476 \cdot k^2 - 0,6571 \cdot k + 3,0238; \quad R^2 = 0,9949 \quad (1.10)$$

În urma analizei diagramei s-a constatat că prin recircularea de 5 ori a oțelului în camera de vidare conținutul de hidrogen scade sub 1 ppm.

În cazul tratării oțelului în instalații de vidare de tip VOD, prin prelucrarea datelor existente cu referire la conținutul de hidrogen în funcție de durata vidării s-au obținut corelații sub formă grafică și analitică (fig.1.8).

Ecuatiile de corelație sunt:

$$[H] = -0,0053 \cdot t^2 + 0,0322 \cdot t + 2,5828; \quad R^2 = 0,8556 \quad (1.11)$$

$$[H] = -1,4001 \cdot \ln(t) + 5,5723; \quad R^2 = 0,7817 \quad (1.12)$$

$$[H] = 4,3639 \cdot e^{-0,0608t}; \quad R^2 = 0,8391 \quad (1.13)$$

Analizând reprezentarea grafică a acestor ecuații se observă că sunt apropiate iar coeficienții de corelație unghiulari nu diferă foarte mult, astfel diferența între

variația conținutului de hidrogen este nesemnificativă și se poate lua în considerare pentru calcule ulterioare ecuația cea mai simplă. La acest procedeu conținutul de hidrogen scade sub 1,8 ppm după minim 15 minute de tratament. Din această cauză în practică se recomandă ca durata vidării să fie de circa 15 – 20 minute.

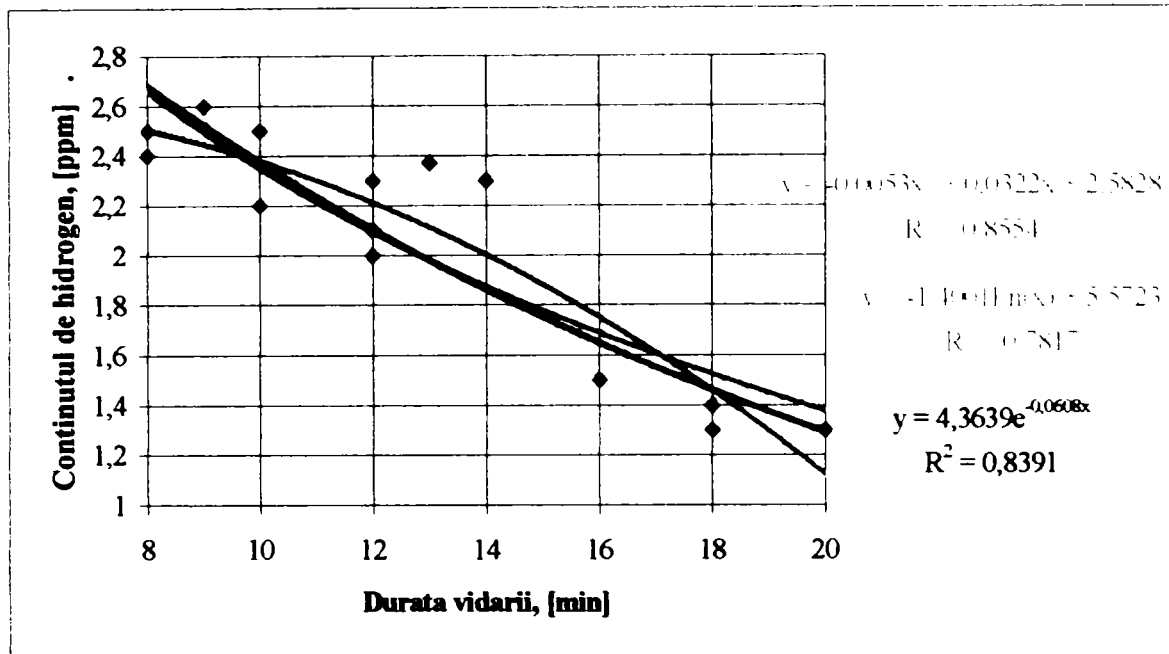


Fig.1.8. Variația conținutului de hidrogen în funcție de durata vidării la tratarea oțelului în instalații de vidare de tip VOD [10].

La procedeul VAD studiul variației conținutului de hidrogen este greu de realizat, din cauza dificultăților la prelevarea probelor de hidrogen din baia metalică. Din determinările efectuate în practica curentă s-a constatat că se pot obține conținuturi de hidrogen de 1-2 ppm.

Tratarea prin trecerea jetului de oțel în vid este realizată industrial în mai multe variante. Aceste metode urmăresc în primul rând micșorarea conținutului de gaze din oțelul lichid (în special a hidrogenului) pentru micșorarea reburilor la prelucrarea lingourilor mari de forje.

Turnarea în vid a lingourilor grele destinate forjării (fig.1.9) se realizează prin introducerea lingotierei într-o cameră în care se poate realiza depresiune. Oala de turnare se așează deasupra orificiului din capac prin intermediul unui dispozitiv de etanșare. După punerea în funcțiune a pompelor de vid, în incinta chesonului se creează o presiune scăzută, menținută înainte de începerea turnării, cu ajutorul unei plăci de aluminiu care etanșează orificiul de turnare. Jetul de oțel ajungând în mediul de presiune scăzută se desface în picături, datorită expansiunii gazelor dizolvate în oțelul lichid.

Dimensiunea picăturilor depinde pe de o parte de presiunea din interiorul chesonului și pe de altă parte de conținutul de gaze dizolvate în oțelul lichid. Desigur, cu cât picăturile sunt mai mici, cu atât suprafața expusă presiunii scăzute este mai mare și dehidrogenarea este avansată.

Trebuie ținut seama totodată de timpul cât picătura este în condiții de dehidrogenare, deci de înălțimea de cădere a picăturii.

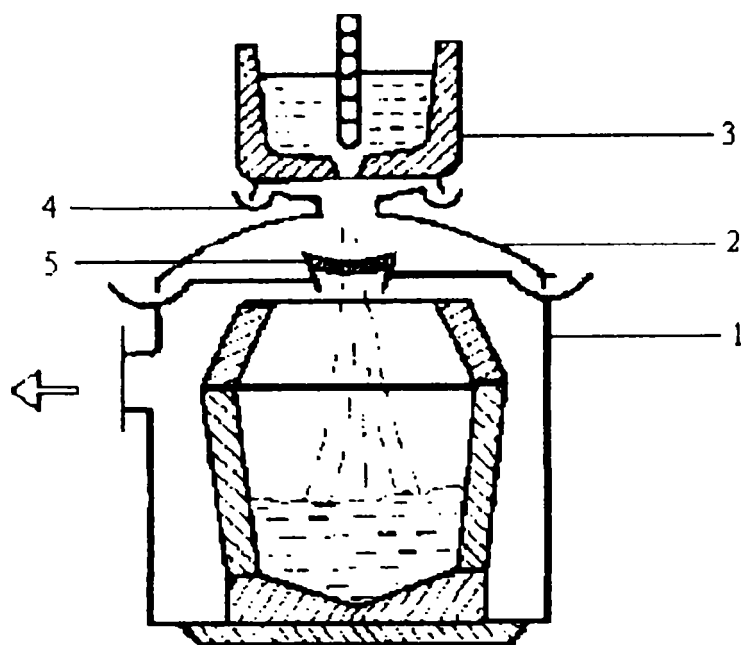


Fig. 1.9. Turnarea sub vid a unui lingou greu de forje [6]:
 1 - incinta vidată; 2 - capac; 3 - oala de turnare;
 4 - dispozitiv de etanșare; 5 - placă de aluminiu.

Alegerea procedurii cel mai potrivit de tratare în vid a oțelului este o problemă destul de complexă, având în vedere pe de o parte diversitatea metodelor folosite în industrie, iar pe de alta parte faptul că performanțele fiecărei metode sunt în măsură importantă influențate de experiență, asupra careia de regulă în literatura de specialitate informațiile sunt sumare. Tratarea oțelului în vid, prin diversele procedee analizate și nu numai, este utilizată frecvent în cadrul metalurgiei în oală, cu eficiență remarcabilă asupra proceselor care au loc ca urmare a tratării oțelului. Prin rafinarea oțelului în vid se obțin efecte metalurgice importante, dintre care se pot menționa: degazarea, omogenizarea termică și chimică, flotația incluziunilor nemetalice, accelerarea reacțiilor de rafinare (desulfurare, dezoxidare) a topiturii metalice. Realizarea acestor efecte este dependentă de metoda utilizată precum și de felul în care sunt corelați parametri tehnologici ai procesului cu principalul scop urmărit.

1.2. Formarea structurii de turnare a lingourilor din oțel

Mecanismul procesului de solidificare a lingoului este determinat în mare măsură de fenomenele termice, deoarece în timpul solidificării căldura înmagazinată în oțelul lichid se transmite mediului exterior. Această transmitere depinde în special de raportul dintre volumul lingoului și suprafața sa, raport care reglează viteza cu care se poate evacua căldura din lingou.

Imaginea obișnuită a solidificării constă în a considera că în lingou se deplasează un front de solidificare cu o temperatură determinată și că acest front desparte zona lichidă de cea complet solidificată a lingoului. Înaintarea frontului este legată exclusiv de fenomene termice și se efectuează în sens invers fluxului de căldură. Această imagine reflectă într-un mod foarte aproximativ procesul real, în special în momentul în care nu mai există un important gradient de temperatură în lichid. În realitate, fenomenele termice nu reprezintă decât aspectul exterior al

procesului de solidificare a lingoului. Solidificarea este de fapt rezultatul complex al diferitelor fenomene fizice care condiționează formarea cristalelor.

În fig. 1.10 este prezentată schema unui lingou în curs de solidificare.

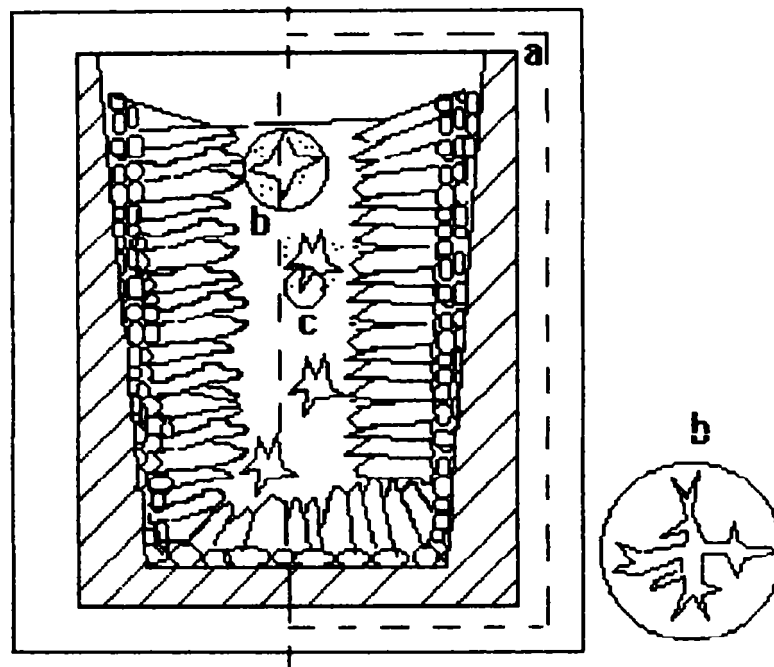


Fig.1.10. Prezentarea schematică a unui lingou în curs de solidificare [45]:
a - zona exterioară; b - zona cristalelor columnare; c - zona centrală.

După cum se știe, în lingoul solidificat se disting următoarele zone:

a) o zonă exterioară, subțire, cu grăunți mici, orientați dezordonat, formată pe perețele rece al lingotierei numită zona marginală. Această zonă rezultă din solidificarea practic instantanee a oțelului în contact cu lingotiera rece. Cum în acest caz răcirea este foarte rapidă, oțelul este puternic subrăcit înainte ca aceste cristale să se poată dezvolta. Ele iau naștere fie prin germinare omogenă, fie prin germinare eterogenă, folosind germeni care nu ar fi fost activi dacă subrăcirea nu ar fi de valori ridicate. Se formează simultan un număr mare de cristale și acestea îi împiedică să se dezvolte reciproc, natura lor dendritică fiind din această cauză greu de distrus. Grăunții din stratul marginal au orientare dezordonată și se dezvoltă în mod egal pe cele trei direcții axiale;

b) o zonă cu cristale columnare crescute paralel între ele și având orientarea exclusiv perpendiculară pe perețele lingotierei numită zona columnară. O dată cu înaintarea frontului de solidificare se produc următoarele fenomene: se acumulează cantități importante de elemente însoțitoare la interfața solid-lichid, scăzând temperatura de topire la interfață iar prin stratul solid se evacuează spre exterior nu numai căldura latentă de solidificare, ci și o parte din supraîncălzirea lichidului, astfel încât gradientul de temperatură scade repede;

c) o zonă de cristale mari, echiaxe și dezordonate în centrul lingoului numită zonă echiaxă. Acest tip de cristalizare este caracteristic solidificării ce are loc într-un lichid fără gradient de temperatură apreciabil, în care cristalele se pot dezvolta liber.

Explicația genezei acestor zone este dată de fenomenele fizico-chimice (termice, segregatie, etc) din lingou.

Particularitățile structurale ale lingourilor se datorează interacțiunii a trei factori importanți și anume: caracteristicile cristalografice ale oțelului, distribuția temperaturii în oțelul lichid și solid respectiv a elementelor însoțitoare.

1.2.1. Zona cristalelor echiaxiale mici

Când oțelul lichid ajunge în lingotieră, zonele apropiate, adiacente acestuia se răcesc imediat până la o anumită temperatură a suprafeței interioare a lingotierei T_L . Distribuția temperaturii în stratul solidificat este prezentată în fig.1.11.

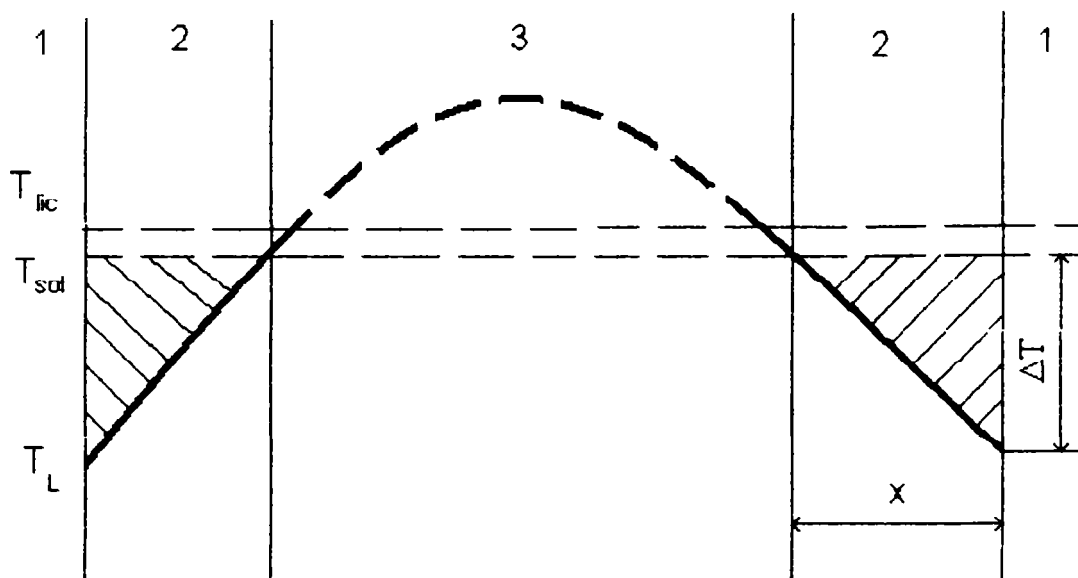


Fig. 1.11. Distribuția temperaturii la o anumită perioadă după începutul solidificării [24]:

1 – zona exterioară a lingoului; 2 – zona de crustă a lingoului;
3 – zona interioară a lingoului.

Gradientul de temperatură care asigură evacuarea căldurii de supraîncălzire a oțelului, a căldurii latente de cristalizare și a căldurii fizice de răcire a stratului solidificat sub temperatura solidus este aproximativ egal cu $\Delta T = T_{sol} - T_L$. Se realizează astfel răcirea topiturii învecinate și încălzirea peretelui lingotierei. Deci procesul de răcire a lingoului constă în această fază din preîncălzirea pereților lingotierei și răcirea oțelului. Astfel, temperatura din planul de separație lingotieră-oțel depinde de proprietățile termofizice ale materialului lingotierei și ale oțelului solidificat. Din fig.1.11 rezultă că în zonele hașurate în metalul lichid subrăcit apar concomitent multe centre de cristalizare care asigură formarea de zone cu cristale echiaxiale mici.

Grosimea crustei exterioare (x) a lingoului de oțel se determină conform datelor lui S.M.Adams [11] cu relația:

$$x = 0,361\sqrt{t} - \frac{\lambda}{2K} \quad (1.14)$$

unde: t este durata de solidificare, în h;

λ - conductivitatea termică a stratului solidificat de oțel, în $W/m^{\circ}C$;

K – coeficient de transport de căldură prin limita de separație lingotieră-lingou, în $W/m^2 \cdot ^\circ C$.

Analiza condițiilor de formare a crustei exterioare a lingoului demonstrează că, grosimea acesteia depinde de conductivitatea termică a oțelului solidificat precum și de coeficientul de transport de căldură prin limita de separație lingou-lingotieră

1.2.2. Zona cristalelor columnare.

După solidificarea crustei exterioare a lingoului format din cristale echiaxiale mici scade intensitatea de evacuare a căldurii datorită creșterii rezistenței termice în procesul de răcire ulterioară a oțelului. Acest lucru determină reducerea numărului de centri de cristalizare, iar evacuarea căldurii de supraîncălzire și cristalizare se realizează numai prin aceste relativ puține cristale. Energia termică se transmite unidirecțional, spre perețele lingotierei. Această evacuare dirijată a căldurii rămâne constantă pe toată perioada necesară formării unei zone de transcristalizare. În această zonă există un gradient de temperatură, încă destul de accentuat, care asigură acea viteză de cristalizare la care zona de subrăcire maximă dinaintea limitei de solidificare este încă destul de restrânsă. Solidificarea unidirecțională încetează în momentul în care în zona de subrăcire maximă apar centre de cristalizare ale cristalelor individuale. Apariția acestor cristale este o consecință a acumulării la interfața în cauză a unui strat însemnat de impurități care segregă. Acest fenomen produce o "întârziere" deoarece viteza de evacuare a căldurii din strat este mai mare decât difuzia incluziunilor care segregă în situația de bază, temperatura acestui strat scade rapid și când devine egală cu temperatura de solidificare a segregățiilor, în acest moment apar centre de cristalizare a dendritelor echiaxiale centrale.

Creșterea zonei cu structura de transcristalizare este influențată de temperatura metalului turnat, viteza de cristalizare, conținutul de adaosuri (incluziuni) care segregă, introducerea de diferiți agenți de cristalizare care stimulează formarea centrelor de cristalizare și de dimensiunile secțiunii transversale a lingoului [12].

Deși creșterea gradului de supraîncălzire a oțelului turnat determină reducerea vitezei de cristalizare, zona de transcristalizare în lingoul turnat din acest oțel crește. Acest fenomen se explică prin aceea că, în cazul cristalizării oțelului supraîncălzit, numărul centrilor de cristalizare este mai mic, iar creșterea lor unidirecțională nu se întrerupe nici chiar în cazul cristalizării lente, deoarece nucleele de cristale echiaxiale care se formează în zona de subrăcire maximă sunt antrenate și după aceea topite de jeturile puternice convective de oțel supraîncălzit. De aceea, viteza critică de cristalizare la care se produce trecerea de la zona columnară la cea echiaxială se schimbă în funcție de temperatura oțelului turnat. În fig.1.12. este prezentată variația vitezei critice de cristalizare în corelație cu gradul de supraîncălzire la un oțel carbon, conform datelor prezentate de W. Poopmeyer [13].

Prin prelucrarea, în programul de calcul EXCEL, a datelor din literatura de specialitate [14], privind viteza de solidificare s-au obținut ecuațiile de corelație:

$$v_s = -0,1542 \cdot \Delta T + 16,034; \quad R^2 = 0,72 \quad (1.15)$$

$$v_s = 0,0034 \cdot \Delta T^2 - 0,5102 \cdot \Delta T + 21,329; \quad R^2 = 0,8097 \quad (1.16)$$

$$v_s = -0,0001 \cdot \Delta T^3 + 0,0199 \cdot \Delta T^2 - 1,1919 \cdot \Delta T + 28,094; \quad R^2 = 0,875 \quad (1.17)$$

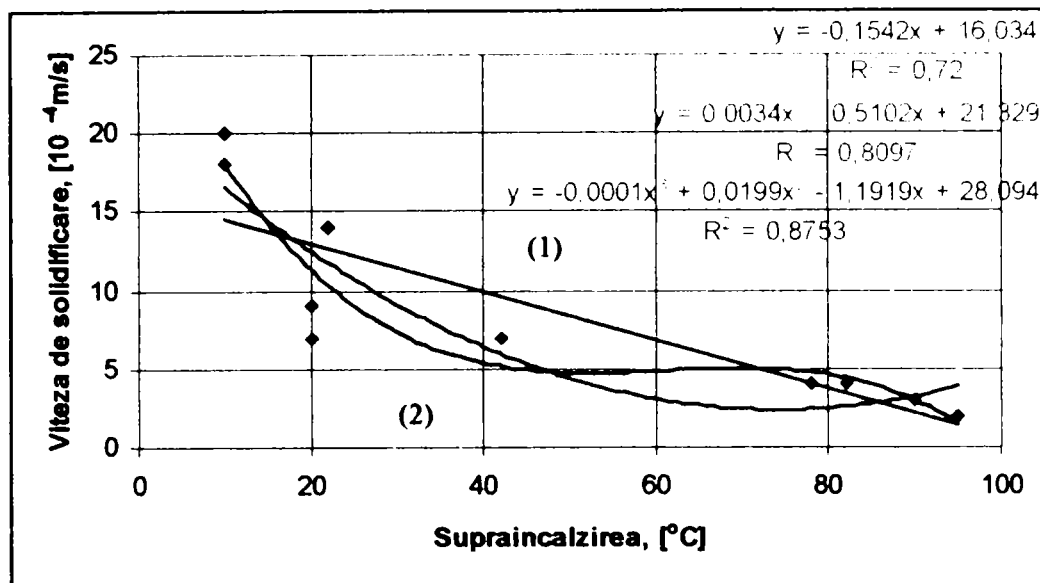


Fig.I.12. Variația vitezei de solidificare a oțelului carbon în funcție de gradul de supraîncălzire la trecerea de la zona columnară (1) la cea echiaxială (2).

Analizând reprezentarea grafică a celor trei ecuații se observă valorile apropiate a coeficienților unghiulari astfel încât diferența între variația vitezei de solidificare determinată de ecuațiile respective este ne semnificativă și ca urmare poate fi luată în considerare ecuația cea mai simplă.

1.2.3. Zona cristalelor echiaxiale mari

Dendritele columnare cresc până în momentul în care nu se vor întâlni în zona axială cu cristale echiaxiale. Mecanismul de formare al acestei zone, care se caracterizează printr-o structură echiaxială dendritică grosolană, nu a fost suficient de clar explicat până în prezent. Spre sfârșitul procesului de formare a zonei columnare pe straturile superioare se formează o zonă de subrăcire maximă. Datorită faptului că viteza de cristalizare scade considerabil în acest timp, în zonă se formează o mare concentrare de impurități și scade brusc temperatura lor de solidificare. Dacă se ține seama că evacuarea căldurii prin zona de transcristalizare este încă destul de accentuată, este evident faptul că zona de subrăcire maximă și volumele învecinate de oțel lichid, suficient răcit, se subrăcesc sub temperatura lichidus, formând germeni de cristale echiaxiale. În prima fază, când în interiorul lingoului există încă metal supraîncălzit, partea inferioară a zonei axiale se formează pe baza sedimentării cristalelor care apar în zona inferioară a lingoului, iar apoi când temperatura cantității de oțel rămas nesolidificat este mai joasă decât cea lichidus, are loc formarea de centre de cristalizare și creșterea lentă a cristalelor mari pe întreg volumul de oțel semilichid rămas. Cristalele depuse prin deplasare gravitațională în partea inferioară a lingoului sunt mici ca dimensiuni și curate din punct de vedere al conținutului de incluțiuni, lucru care explică formarea de zone cu segregare negativă.

Condițiile termofizice de solidificare nu explică în totalitate formarea și structura zonei axiale în lingou. Un rol primordial în apariția și creșterea dimensiunii cristalelor echiaxiale aparține și factorilor hidrodinamici, care se află în strânsă legătură cu deplasarea prin convecție a oțelului lichid. În procesul de deplasare și depunere a zonei bifazice de-a lungul limitei de solidificare se produc ciocniri

reciproce ale cristalelor abia formate și a cristalelor fărâmițate. În locurile de schimbare de direcție a curenților de convecție, în zona inferioară a lingoului, cristalele se separă după greutatea lor specifică, se lovesc de conul de “precipitare”, se deformează, se fărâmițează și devin potențiali germeni suplimentari de cristalizare în oțelul lichid.

Procesul de cristalizare în orice volum de metal lichid este însoțit de fenomene complexe de formare și creștere a cristalelor precum și de deplasări convective și gravitaționale a acestora, de fărâmițare termică și hidrodinamică a structurilor marginale, de modificare a intensității transportului de căldură de la topitură la crusta lingoului și de procese de difuzie, separare și distribuire neuniformă a incluziunilor nemetalice, precum și o serie de alte fenomene.

La organizarea evacuării rașionale a căldurii și a regimului de deplasare a cristalelor cei mai importanți parametri sunt: stabilirea locurilor de formare a cristalelor individuale, dinamica deplasării lor în lingou, influența lor asupra limitei frontului de solidificare și structura cristalină a lingoului [15].

Locurile de formare a cristalelor individuale depind de intensitatea de evacuare a căldurii la limita frontului de solidificare, de viteza de solidificare, de viteza de formare a segregățiilor în zona de subrăcire maximă și de viteza de îndepărtare a lor din această zonă.

Zona axială a cristalelor echiaxiale este formată din: I – zona solid-lichid, II – zona de subrăcire maximă respectiv III – zona lichid-solid (fig.1.13).

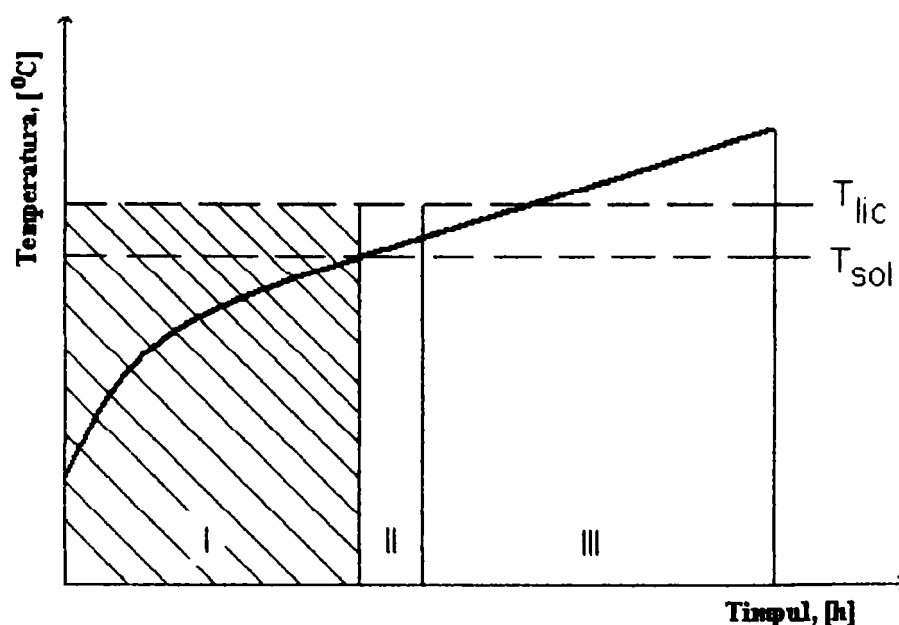


Fig.1.13. Distribuția temperaturilor în oțelul lichid [24]:

I – zona solid-lichid, II – zona de subrăcire maximă respectiv III – zona lichid-solid.

În procesul de solidificare a oțelului la limita de solidificare se formează un strat de impurități care segregă și determină apariția zonei de subrăcire maximă. Conținutul de impurități care segregă din această zonă depinde de viteza de solidificare, și anume: o dată cu creșterea vitezei de solidificare scade concentrația impurităților care segregă. Pe măsura reducerii vitezei de solidificare crește grosimea și gradul de subrăcire a stratului de concentrație. Datorită scăderii temperaturii de cristalizare a segregățiilor, cristalele nu apar în zona de subrăcire II ci în zona III.

Aceste cristale secundare au ramuri subțiri, datorită temperaturii înalte a oțelului lichid din jur, dar sunt rezistente și se depun continuu în zona inferioară a lingoului. Ele se deplasează de-a lungul limitei frontului de solidificare.

Când subrăcirea la limita de separare este nulă creșterea orientată a crustei lingoului încetează. După aceasta formarea centrelor de cristalizare are loc pe tot volumul lingoului, cristalele se depun lent pe tot volumul suprapunându-se peste cele care s-au depus anterior de-a lungul limitei de solidificare.

În ce privește dinamica depunerii cristalelor S. Skoblo și E.A. Kazacikov [16] au analizat curbele solidificării verticale a lingourilor cu masa de 23,5 tone (fig.1.14) respectiv variația înălțimii zonei bifazice în timp (fig.1.15).

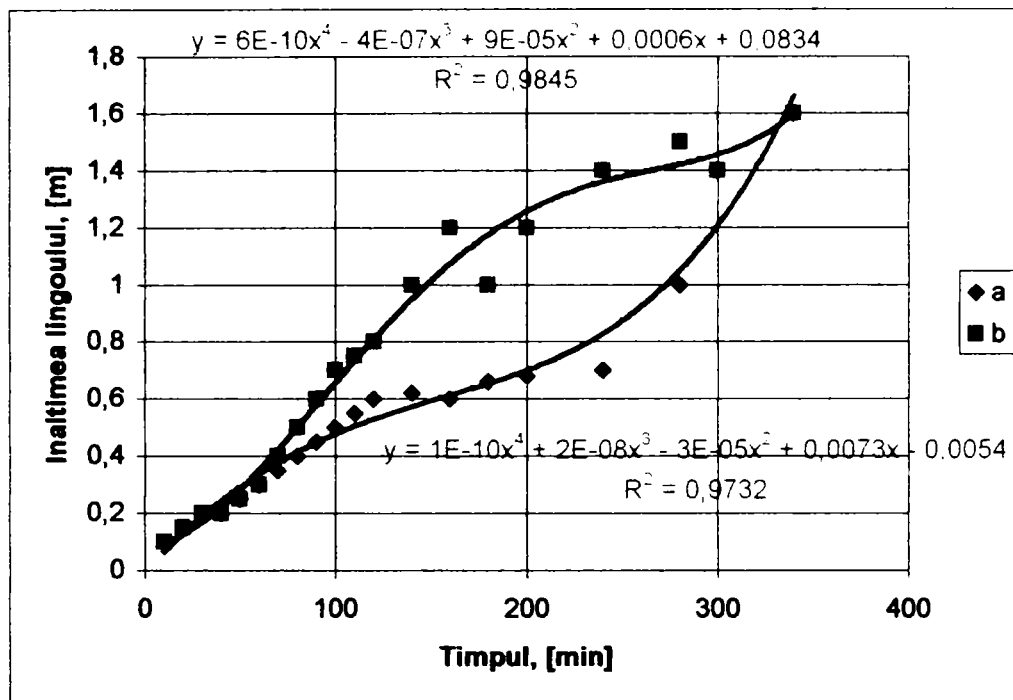


Fig.1.14. Curba solidificării verticale a lingourilor de oțel cu masa de 23 tone [16]:
a – faza solidă; b – faza lichidă.

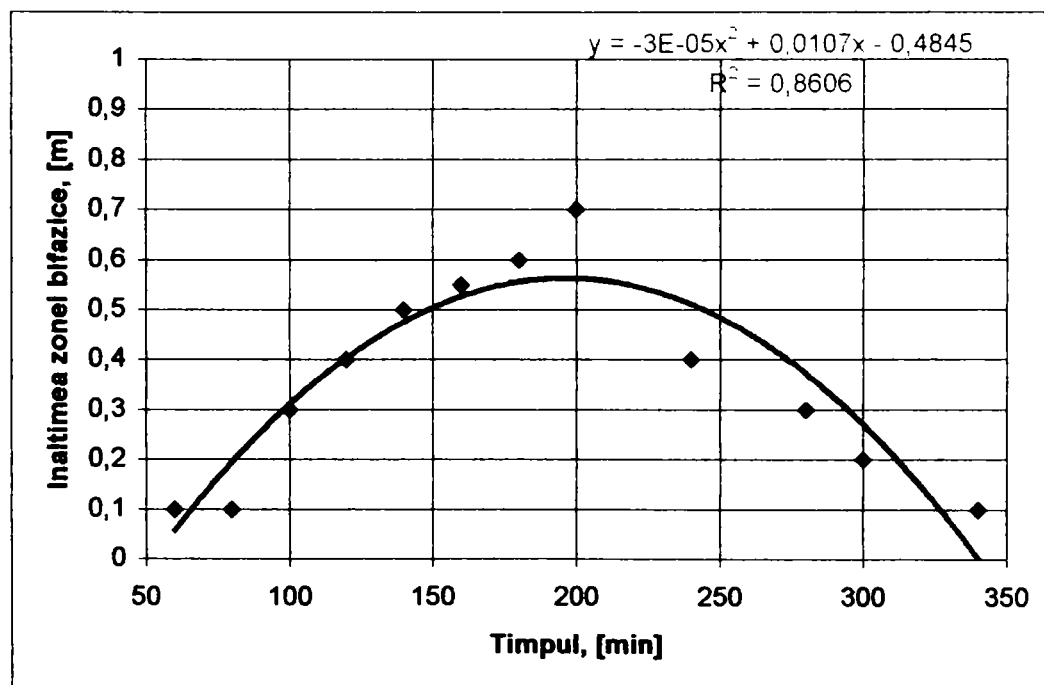


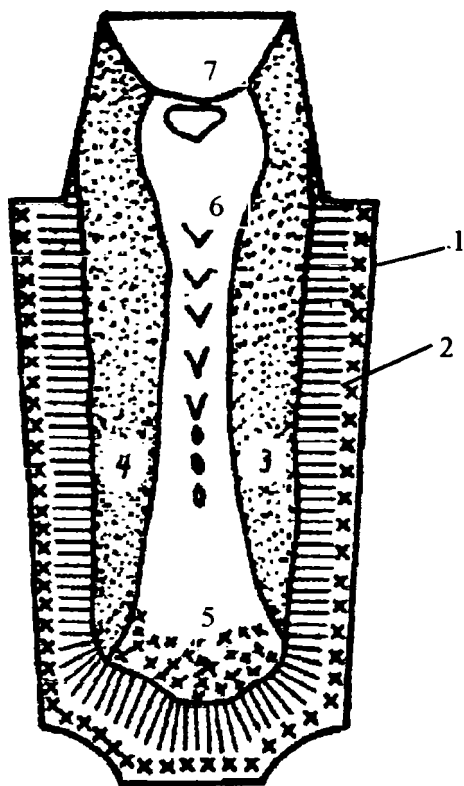
Fig.1.15. Variația înălțimii zonei bifazice [16].

Din analiza diagramelor și a ecuațiilor de corelație se observă că, în lingourile cu masa de 23,5 tone (fig.1.14), cristalele se depun după circa 60 minute de la terminarea turnării. În aceeași perioadă începe să se formeze zona bifazică (fig.1.15) și să aibă loc evacuarea căldurii în partea inferioară a lingotierei. În perioada următoare solidificarea are loc datorită depunerii cristalelor din zona centrală a lingoului. Se constată că înălțimea stratului de cristale depuse atinge un maxim în zona de transcristalizare (b-a, fig.1.14) și în zona de cristalizare echiaxiale din regiunea axei lingoului.

Introducerea de microrăcitori, modificatori și de alte centre de cristalizare contribuie la creșterea rapidă a cristalelor echiaxiale în fața frontului de cristalizare și întrerupe creșterea dendritelor columnare chiar la viteze mari de cristalizare a oțelului. Odată cu mărirea dimensiunilor secțiunii transversale a lingoului, influența supraîncălzirii oțelului și a curenților convectivi asupra limitei de solidificare se menține pentru o durată mult mai mare decât în lingourile mici. De aceea zona de transcristalizare este mult mai extinsă în lingourile cu secțiune mare.

1.3. Neomogenitatea fizică și structurală a lingourilor mari din oțel

O problemă complexă și de mare importanță în obținerea pieselor de bună calitate din oțel este creșterea omogenității fizice a lingourilor. Pentru îmbunătățirea calității lingourilor din care se obțin piese care se utilizează în toate domeniile tehnicii, se impun condiții foarte severe.



În lingoul din oțel apar zone structurale (fig.1.16) și anume:

- 1 - zona de cristale exterioare mici echiaxiale;
- 2 - zona cristalelor columnare;
- 3 - zona intermediară de cristale echiaxe;
- 4 - zona de cristale mari echiaxiale în zonele axiale ale lingoului;
- 5 - zona de depunere a cristalelor individuale;
- 6 - zona axială a neomogenității în forma de V;
- 7 - zona cu concentrări de sulfuri.

Principalele tipuri de neomogenități fizice pot fi subîmpărțite în două grupe:

- neomogenitatea macrostructurală, determinată de forma diferită de cristalizare a oțelului (zonele 1 - 5);

- neomogenitatea fizică, determinată de procesele de contracție a oțelului (zonele 6,7 și c).

Fig.1.16. Zone în structura lingoului [24].

Obținerea unui lingou omogen impune rezolvarea unor probleme legate de diversitatea proprietăților fizice și fizico-chimice ale oțelului deja solidificat, de extinderea proceselor de segregare a impurităților, de distribuția neuniformă a

câmpurilor de temperatură, de contracția și starea complex-tensionată a volumelor solidificate de oțel.

Calitatea lingourilor este influențată de condițiile de degajare a căldurii, de compoziția chimică a oțelului și tendința acestuia de a segrega, de viteza și temperatura de turnare, de forma și dimensiunile geometrice ale lingotierei.

Formarea zonelor structurale și a neomogenităților fizice din lingou este mult influențată de doi parametri: mărimea intervalului de cristalizare, dintre temperaturile lichidus și solidus și gradientul de temperatură în volumele de oțel care se solidifică și care caracterizează intensitatea procesului de răcire a lingoului.

Neuniformitatea dimensiunilor formei și locurile de distribuție a cristalelor în lingou constituie problema principală a procesului de turnare-solidificare a lingourilor de bună calitate. Pentru rezolvarea problemelor trebuie să se stabilească în primul rând care este influența condițiilor de evacuare a căldurii din metal asupra formării structurii cristaline, ce forțe acționează asupra cristalelor în creștere și cum influențează condițiile exterioare redistribuirea acestor forțe.

1.4. Neomogenitatea chimică a lingourilor mari din oțel

Cea mai complexă problemă a elaborării oțelurilor este asigurarea obținerii de lingouri cu compoziție chimică omogenă și proprietăți uniforme pe secțiune.

La trecerea oțelului din stare lichidă în stare solidă, scade solubilitatea impurităților și apar neomogenități chimice în lingoul turnat.

În timpul solidificării, la nivelul interfeței se produce un transport de masă între solid și lichid, lucru care determină o variație a compoziției medii și o avansare a procesului de solidificare. Dificultatea realizării lingoului cu compoziție chimică uniformă apare în cea mai mare măsură datorită diferenței dintre proprietățile fizice și chimice ale oțelului în stare lichidă și solidă.

Pe măsura răcirii lingoului și scăderii temperaturii până la temperatura de solidificare a impurităților segregate, când mișcarea fluxului bifazic încetează, ramurile dendritelor se întrepătrund și apare zona solid-lichid. În această zonă se repetă desfășurarea intensă a proceselor de transfer de masă prin capilare, formându-se stratul următor de elemente segregate. În acest fel se explică periodicitatea formării zonelor de segregare.

La trecerea din stare lichidă în cea solidă se micșorează brusc solubilitatea impurităților dăunătoare iar elementele segregate sub acțiunea forțelor de difuzie, hidrodinamice și de transfer de masă prin convecție se deplasează în anumite zone ale lingoului. Pentru îmbunătățirea proprietăților volumelor interioare ale lingoului s-au folosit până în prezent metode nu prea eficiente, ca de exemplu: variația temperaturii și vitezei de turnare, a formei lingotierei precum și a maselotei, etc.

Pentru dirijarea efectivă a proprietăților volumelor interioare de metal din lingou este necesar înainte de toate să se cerceteze procesele care au loc în microvolumele aflate pe frontul de cristalizare, la trecerea oțelului din stare lichidă în stare solidă. Aceste procese sunt influențate de compoziția aliajului, tehnologia de topire și dezoxidare, viteza și temperatura de turnare, modul de evacuare a căldurii, compoziția atmosferei înconjurătoare, oxidarea secundară precum și o serie de alți factori.

Datorită existenței de-a lungul suprafeței lichid-solid a fluxurilor convective de oțel lichid, o parte din atomii acestui strat se îndepărtează spre aliajul de bază, măbind concentrația impurităților în volumul de oțel nesolidificat (fig.1.17). La evacuarea intensă a căldurii, fenomen ce se produce la solidificarea lingourilor coexistă, în același timp, trei faze: solidă, intermediară bifazică și lichidă. Zona bifazică constă în amestec de cristale și fază lichidă. În intervalul de temperatură liquidus - solidus are loc germinarea și creșterea cristalelor.

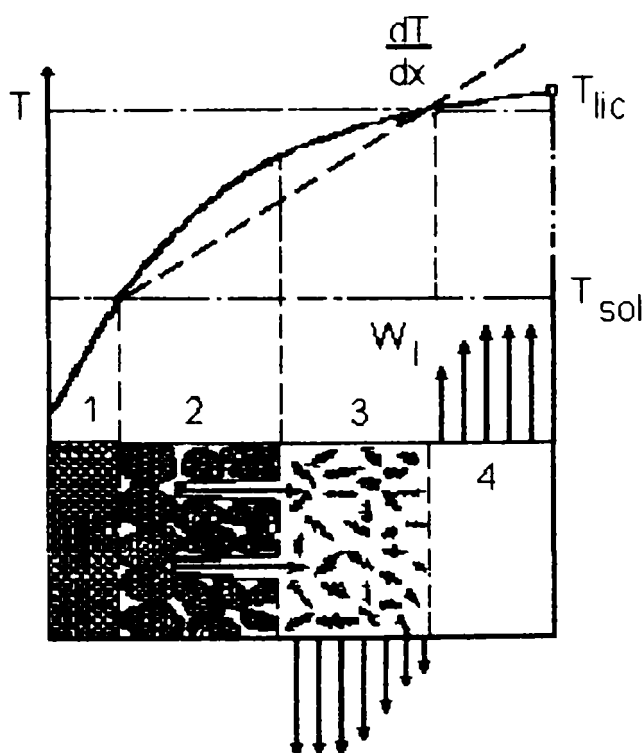


Fig.1.17. Schema zonei bifazice [16]:

1 – zona de crustă; 2 – zona solidă; 3 – zona intermediară bifazică; 4 – zona lichidă.

În zonele învecinate cu zona solidă are loc procesul de creștere a cristalelor (se formează zona solid-lichid iar limita acesteia cu partea solidificată se numește izosolidus). În oțelul lichid există cristale solidificate care se pot deplasa liber în zona lichid-solid (limita de separație numită izolichidus). Limita de separație dintre zonele solid-lichid și lichid-solid reprezintă limita de curgere a metalului (depinde de compoziția chimică și de legea de variație a curbei de răcire în zona bifazică). În zona lichid-solid predomină forțele de greutate și de deplasare hidrodinamică a aliajului, iar în zona solid-lichid forțele de umectare și de deplasare capilară a fazei lichide. Cea mai mare concentrație a impurităților segregate va fi la limita de curgere a oțelului lichid, deoarece concentrația cristalelor pe unitatea de volum de oțel lichid în zona lichid - solid și viteza descendentă a amestecului bifazic, vor fi cele mai mari, pe când presiunea ferostatică va fi cea mai mică. Condițiile create ușurează deplasarea capilară a impurităților segregate la limita de curgere și apariția segregățiilor zonale.

Dezvoltarea proceselor de segregare în aliaj poate decurge după următoarea schemă:

a) concentrarea produselor de segregare pe frontul de cristalizare, uniformizarea concentrației elementelor care segregă atât în fază solidă cât și în cea lichidă;

b) uniformizarea concentrației impurităților în faza lichidă, pe calea difuziei moleculare și deplasarea prin convecție a aliajului;

c) în cazul existenței concentrației de impurități în intervalul care solidifică, uniformizarea poate să aibă loc prin difuzie în fază solidă.

La solidificarea oțelului cu viteză mare are loc cristalizarea metalului în absența difuziei și straturile segregate nu se formează pe frontul de cristalizare.

Deplasându-se sub acțiunea fluxurilor de convecție, cristalele mărunte și lipsite de impurități din zona bifazică în zona de la baza lingoului asigură obținerea în această parte a unui volum de metal mai pur, sub formă de zonă de segregare negativă. Puritatea acestor cristale este legată de acțiunea de spălare pe care o exercită fluxurile turbulente de oțel lichid. La micșorarea gradientului de temperatură și vitezei de cristalizare, zona bifazică se lărgește iar condițiile pentru deplasarea prin filtrare a topiturii cu elemente segregate se îmbunătățesc, la limita de curgere a aliajului formându-se un strat gros de impurități segregate. Sub acțiunea deplasării prin convecție a metalului lichid, grosimea și concentrația impurităților acestui strat va fi mai mică decât cea rezultată din calcul, dimensiunile acestuia fiind însă suficiente pentru asigurarea germinării cristalelor.

Când gradientul de temperatură în zona lichid-solid este mai mic decât valoarea critică, după stratul de segregării se formează centre ale fazei solide constituite din cristale echiaxiale care se deplasează spre zonele inferioare ale lingoului. Întrucât între crusta exterioară de lângă peretele lingotierei și această zonă există o legătură foarte slabă, la deplasarea acesteia în zona intermediară a lingoului se formează întreruperi sub formă de cavități de segregare.

Solidificarea provoacă o eterogenitate chimică la scara cristalelor dendritice. Elementele care segregă în spațiile interdendritice au o viteză de difuziune prea mică pentru că această eterogenitate inițială să fie sensibil ameliorată în cursul răcirii până la temperatura ambiantă. Ca urmare, rezultă o microsegregare la scara cristalelor primare care numai uneori se poate pune în evidență prin atac macrografic. Apar deci diferențe de compoziție chimică între periferie și centrul cristalelor (microsegregare intracristalină) și între acestea și soluția solidificată în spațiul dintre cristale îmbogățită în carbon, mangan, siliciu, fosfor, sulf, arseniu, cupru, gaze și suspensii (microsegregare intercristalina). În ansamblu, microsegregarea este cu atât mai accentuată cu cât domeniul de solidificare este mai mare (cu cât conținutul de carbon este mai mare) și cu cât viteza de răcire în domeniul de solidificare este mai înceată și diferă de la un element la altul (este neglijabilă pentru carbon și este puternică pentru sulf).

În paralel, în timpul solidificării are loc o mișcare descendentă a cristalelor în creștere (datorită greutatei specifice mai mari) care împing o parte din lichidul îmbogățit în impurități spre capul lingoului. Astfel se produce neomogenitatea în lingou, numită macrosegregare, care prezintă două aspecte esențiale. Primul aspect se pune în evidență prin analize chimice în diferite puncte ale lingoului și atestă faptul că diferite zone din lingou prezintă compoziții chimice diferite, unele zone sunt mai pure chiar decât oțelul din oala de turnare iar alte zone fiind dimpotrivă mult mai impure. Cel de al doilea aspect se pune în evidență prin probe Baumann care arată evidența unor linii și zone deosebit de bogate în sulf, în comparație cu oțelul din

locurile adiacente (schematic în fig.1.19), aceste linii de segregare corespund unor eterogenități locale ale elementelor care segregă.

Macrosegregarea se accentuează pe măsură ce scade temperatura, deci este diferită în zonele caracteristice de solidificare - segregare zonală.

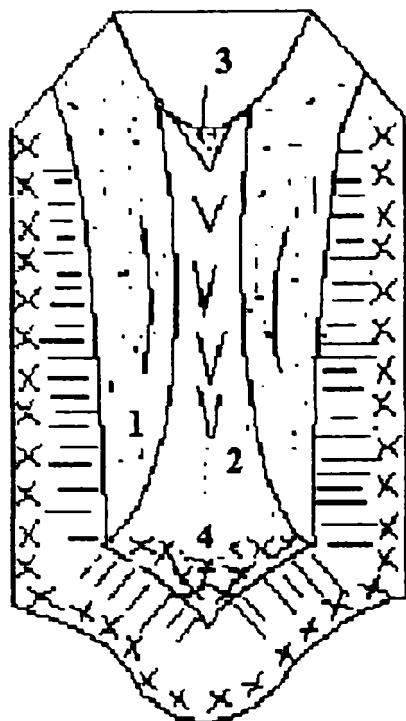


Fig.1.18. Reprezentarea schematică a segregărilor pe secțiunea unui lingou [7].

În fig.1.18. avem delimitate zonele de segregare astfel:

- 1 segregare neaxială de tip Λ , acest tip de segregare se manifestă sub forma de șnururi care sunt așezate sub un unghi față de verticală;
- 2 segregare axială de tip V, constă în cristale echiaxiale grosolane, cu diferite impurități și corespunde cu zona de apariție a microretasurilor axiale;
- 3 segregare zonală pozitivă, conținutul de elemente de segregare în această zonă fiind de 1,5-2,5 ori mai mare, iar în imediata vecinătate a maselotei de 3-4 ori mai mare față de compoziția medie a oțelului;
- 4 segregare zonală negativă, caracterizează printr-un conținut mai mic al elementelor segregate și printr-o structură relativ microcristalină.

Este cunoscut faptul că valoarea segregăției crește cu masa lingoului. Dar în ultimul timp, au fost precizate anumite aspecte, în sensul că influențează esențial nu masa ci dimensiunile secțiunii transversale ale lingoului.

În literatura de specialitate sunt prezentate sub formă grafică o serie de dependențe dintre segregăția carbonului și mărimea lingoului [7]. Prin prelucrarea acestora am obținut o serie de corelații între diametrul mediu al lingoului și segregăția carbonului, prezentate atât sub formă grafică cât și analitică în diagrama din fig.1.19 respectiv corelații între diametrul mediu al lingoului și gradul de segregare negativă și pozitivă a carbonului în lingoul de oțel (fig.1.20).

Ecuatiile de corelație privind segregăția carbonului sunt:

$$G_{S,C} = -4 \cdot 10^{-6} \cdot D_m^2 + 0,042 \cdot D_m - 4,7676; \quad R^2 = 0,7928 \quad (1.18)$$

$$G_{S,C} = 39,052 \cdot \ln(D_m) - 232,47; \quad R^2 = 0,7602 \quad (1.19)$$

$$G_{S,C} = 14,535 \cdot e^{0,0007D_m} \quad R^2 = 0,7933 \quad (1.20)$$

Ecuatiile de corelație obținute fie că sunt sub formă liniară fie neliniară, având în vedere valorile pentru coeficienții de corelație se poate spune că reprezintă foarte bine dependența dintre dimensiunile lingoului și gradul de segregare al carbonului.

Sunt prezentate numai trei tipuri de ecuație de corelație, deoarece și celelalte au avut valori apropiate pentru coeficienții de corelație. De asemenea, s-au determinat și ecuațiile pentru curbele care delimitează domeniul de variație atât la partea inferioară cât și la cea superioară.

Ecuatiile pentru domeniul de variație sunt:

pentru limita inferioară,

$$G_{S,C} = 0,0246 \cdot D_m - 5,3631;$$

$$R^2 = 0,9837 \quad (1.21)$$

pentru limita superioară,

$$G_{S,C} = 0,035 \cdot D_m + 15,378;$$

$$R^2 = 0,962 \quad (1.22)$$

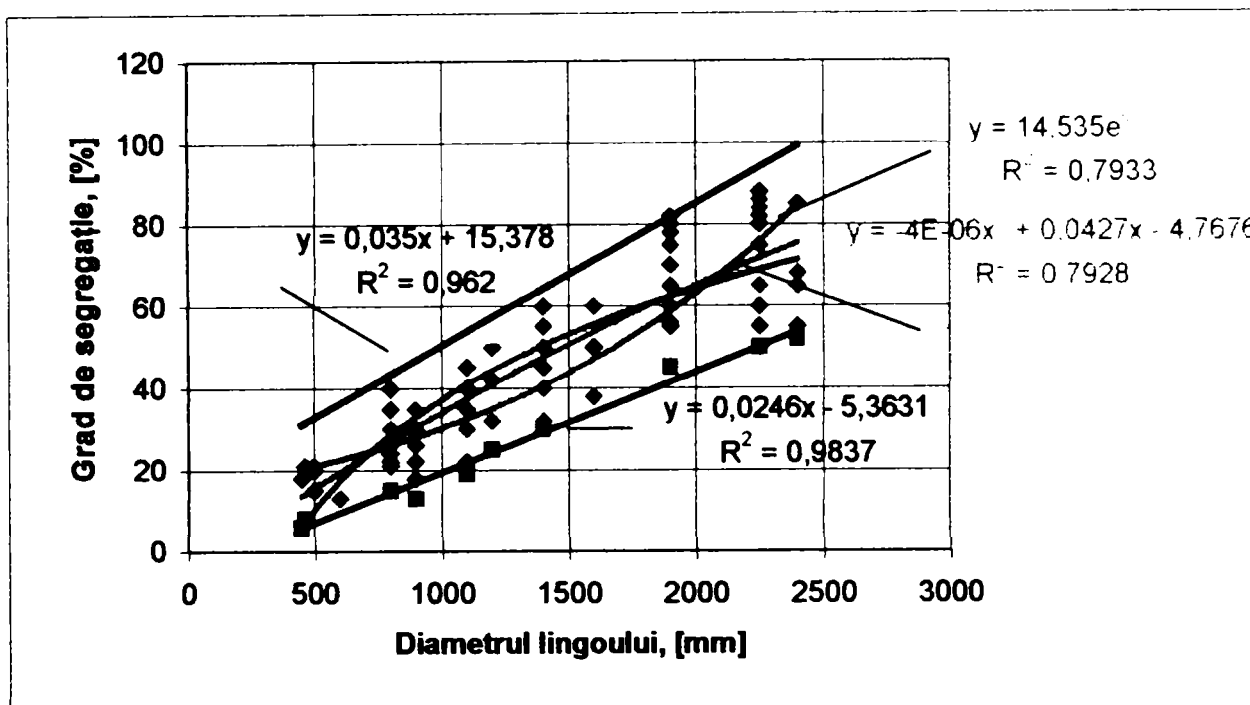


Fig.1.19. Influența dimensiunii lingourilor asupra gradului de segregatie a carbonului [17].

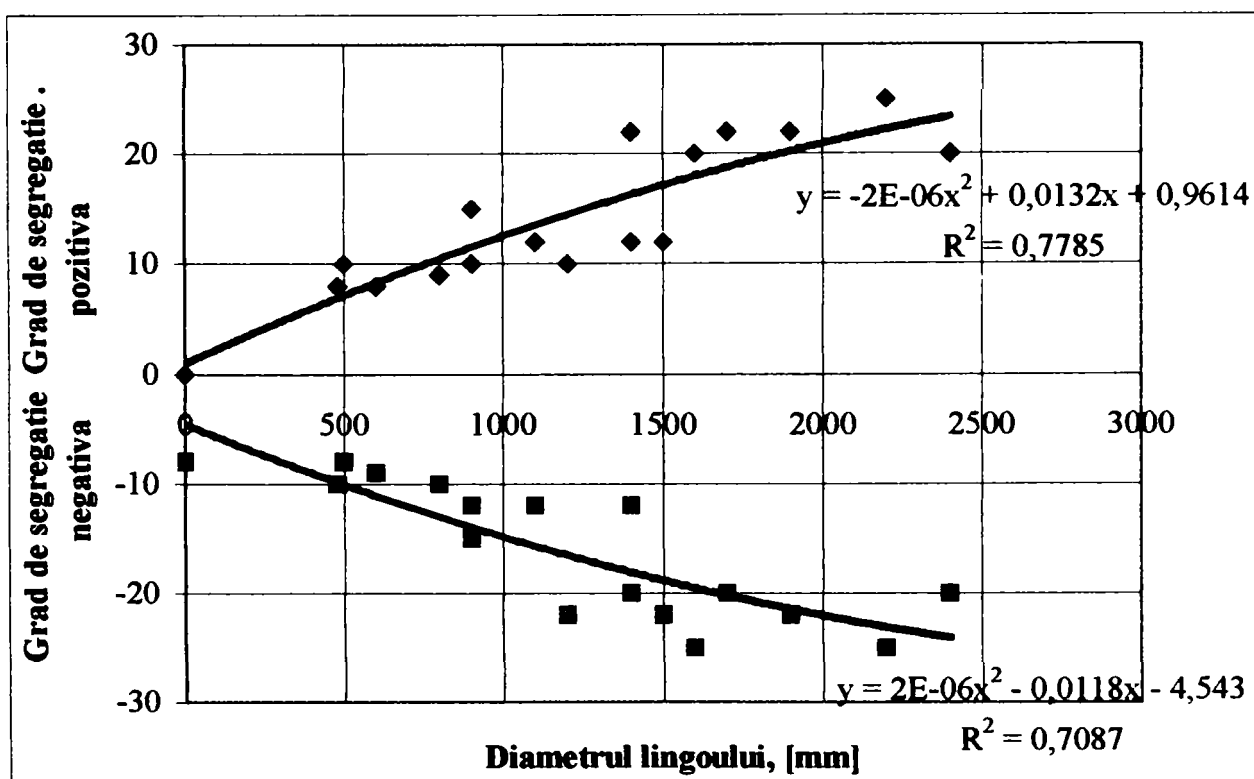


Fig.1.20. Influența dimensiunii lingoului asupra gradului de segregatie pozitivă și negativă [17].

Din analiza acestora se constată că ecuațiile dreptelor care delimitează domeniul de variație sunt reprezentative, având în vedere atât valorile coeficienților de corelație cât și amplasarea punctelor în afara domeniului de variație. Din analiza modului de prezentare a variației în domeniul determinat se constată că odată cu creșterea dimensiunii lingourilor domeniul de variație se lărgeste, deci gradul de segregare a carbonului în lingoul de oțel va varia în limite mai largi.

Ecuațiile de corelație ale gradului de segregare pozitivă și negativă sunt:

$$G_{S+} = -2 \cdot 10^{-6} \cdot D_m^2 + 0,0132 \cdot D_m + 0,9614; \quad R^2 = 0,7785 \quad (1.23)$$

$$G_{S-} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot D_m^2 - 0,0118 \cdot D_m + 4,543; \quad R^2 = 0,7087 \quad (1.24)$$

Eterogenitatea generală a lingourilor își are originea în mișcarea la care este supus oțelul în timpul solidificării. Într-adevăr, cristalele libere, mai pure ca oțelul rămas lichid sunt supuse unei mișcări descendente datorită densității mai mari decât a lichidului, care la rândul lui, este supus unor curenți de convecție, din cauza diferențelor de temperatură existente între piciorul lingoului răcit prin intermediul plăcii de bază a lingotierei și capul lingoului menținut cald prin efectul maselotierei.

Curenții din interiorul lingoului au ca efect stabilirea unei circulații continue între zona maselotei și zonele inferioare ale lingoului. În timpul mișcării lichidul se îmbogățește în mod constant cu o parte din impuritățile rezultate din procesul de cristalizare dendritică și ca urmare capul lingoului, care se solidifică ultimul, va fi constituit în final din oțel foarte impur. Oțelul din maselotă este deosebit de impur și îmbogațirea lui în diferite elemente poate fi considerabil mai mare decât valorile determinate la capul lingoului, în partea lui utilă (după șutare).

Prin prelucrarea datelor din literatura de specialitate pe plan mondial și a celor obținute în practica industrială în țara noastră, cu privire la variația gradului de segregare al azotului respectiv hidrogenului în funcție de timpul de solidificare al oțelului la lingourile turnate clasic comparativ cu lingourile turnate cu microrăcitori sub formă de pulbere metalică, s-au obținut corelații sub formă grafică și analitică (fig.1.21 și fig.1.22).

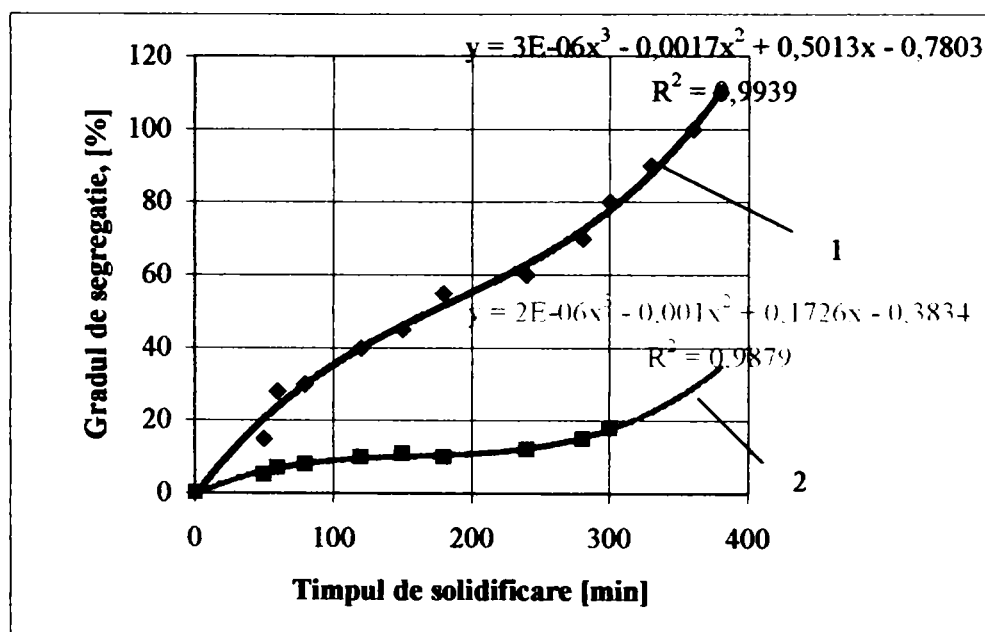


Fig.1.21. Segregația azotului în perioada de solidificare a unui lingou de forjă turnat din oțel carbon cu masa de 40t: 1 – lingou turnat clasic; 2 – lingou turnat cu microrăcitori.

Ecuțiile de corelație privind gradul de segregare al azotului, $G_{S,N}$ în funcție de timpul de solidificare sunt:

pentru lingoul turnat clasic,

$$G_{S,N} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 0,0017 \cdot t^2 + 0,5013 \cdot t - 0,7803; \quad R^2 = 0,9939 \quad (1.25)$$

pentru lingoul turnat cu microrăcitori,

$$G_{S,N} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 0,001 \cdot t^2 + 0,1726 \cdot t - 0,3834; \quad R^2 = 0,9879 \quad (1.26)$$

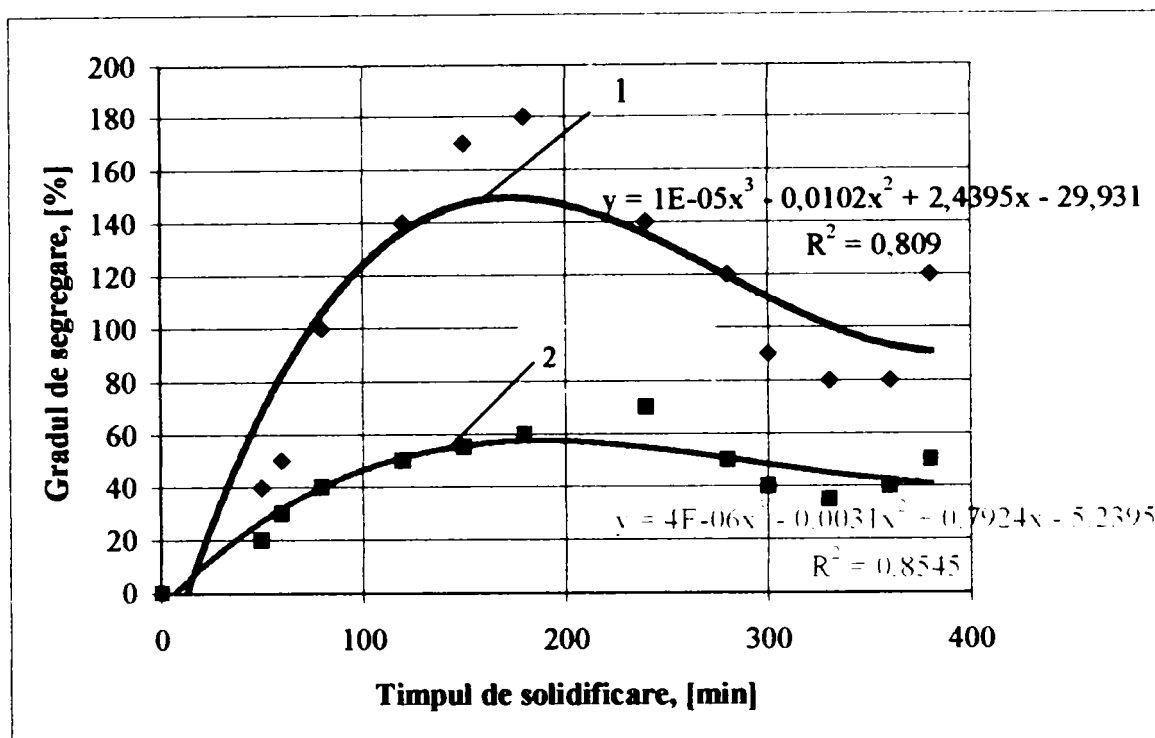


Fig.1.22. Segregația hidrogenului în perioada de solidificare a unui lingou de forjă turnat din oțel carbon cu masa de 40t [16]:
1 – lingou turnat clasic; 2 – lingou turnat cu microrăcitori.

Ecuțiile de corelație privind gradul de segregare al hidrogenului, $G_{S,H}$ în funcție de timpul t de solidificare, sunt:

pentru lingoul turnat clasic,

$$G_{S,H} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot t^3 - 0,0102 \cdot t^2 + 2,4395 \cdot t - 29,931; \quad R^2 = 0,809 \quad (1.27)$$

pentru lingoul turnat cu microrăcitori,

$$G_{S,H} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot t^3 - 0,0031 \cdot t^2 + 0,7942 \cdot t - 5,2395; \quad R^2 = 0,8545 \quad (1.28)$$

Din analiza coeficienților de corelație și a modului de prezentare grafică a acestor ecuații rezultă că acestea redau foarte bine dependența dintre gradul de segregare al azotului respectiv hidrogenului și timpul de solidificare al oțelului. Se observă de asemenea, valori mai scăzute, cu circa 40–60% a gradului de segregare a hidrogenului respectiv a azotului la lingourile turnate cu microrăcitori comparativ cu lingourile turnate clasic. Din analiza datelor se constată creșterea caracteristicilor de plasticitate a oțelului (la aceeași rezistență) cu 10-50% respectiv o micșorare a volumului retasurii cu influență asupra creșterii scoaterii, deci o reducere a consumului de metal.

Pentru creșterea substanțială a omogenității și gradului de dispersie a structurii dendritice respectiv micșorarea întinderii și lățimii zonei de dezvoltare a neomogenităților chimice, precum și a cantităților de sulfuri amplasate la marginea

grăunților primari, reducerea segregării și a conținutului de gaze se pot utiliza trei metode de acțiune [30]:

- acțiunea unui câmp magnetic alternativ sau continuu, pentru oprirea curenților de convecție din oțelul lichid din mijlocul lingoului sau schimbarea direcției mișcării acestora;

- folosirea microrăcitorilor care micșorează gradientul de temperatură;

- mărirea vitezei de solidificare a oțelului prin orice mijloace.

Pentru a obține lingouri de calitate trebuie să se țină seama de toți factorii de influență.

1.5. Influența factorilor tehnologici asupra calității lingourilor mari

Lingourile din oțel calmat se caracterizează prin neomogenitate chimică și structurală. Această neomogenitate apare mai accentuată la lingourile mari, unde, datorită duratei mari de solidificare se manifestă mai pregnant fenomenele caracteristice solidificării selective.

Privind în ansamblu factorii fizici și fizico-chimici de solidificare a lingourilor de oțel se constată că în cursul răcirii oțelului în lingotieră se produc [42]:

- procese de germinare și de creștere a unor cristale de compoziție variabilă dintr-un lichid a cărei compoziție este diferită și care se modifică în permanență;

- reacții secundare, ca urmare a modificării solubilității unor elemente la scăderea temperaturii, reacții care determină uneori apariția unor faze noi, ceea ce perturbă desfășurarea proceselor de solidificare;

- mișcări ale oțelului lichid din interiorul crustei solidificate, ca urmare a curenților de convecție care iau naștere datorită diferențelor de temperatură în diferite zone ale lingoului, ceea ce produce, de asemenea, modificări în modul de progresare a frontului de solidificare;

- modificări ale caracteristicilor fizice ale fazelor prezente ca urmare a segregățiilor directe și inverse, precum și a modificărilor alotrope, produse în fazele solide în curs de răcire ca de exemplu, temperatura de început de solidificare, greutatea specifică, coeficientul de dilatare termică, entalpia, conductivitatea termică, difuzivitatea termică, etc.

Factorii tehnologici care trebuie avuți în vedere pentru obținerea unor lingouri de calitate sunt acei care determină puritatea oțelului, în special în ceea ce privește elementele cu tendință mare de segregare (fig.1.23) și gazele (1.24) respectiv factorii care influențează progresarea frontului de solidificare în lingou. Compoziția chimică a oțelului și gradul de puritate în ceea ce privește conținuturile de gaze și de incluziuni nemetalice sunt influențate de o serie de factori tehnologici și anume: calitatea încărcăturii, condițiile de topire, condițiile de la afinare și dezoxidare, etc.

Din studiile efectuate [18, 19, 20] asupra factorilor care influențează puritatea oțelului rezultă că un rol important îl are viteza de decarburare, factor determinat în mare măsură de regimul termic. Cu cât viteza de decarburare este mai mare, conținuturile de hidrogen și de azot scad. De asemenea, atunci când viteza de decarburare este mare și conținutul de incluziuni nemetalice din oțel este mai mic. Aceasta înseamnă că la viteză mare de decarburare datorită contactului mai bun

dintre baia metalică și zgură se creează condiții favorabile pentru decantarea oxizilor microscopici aflați în suspensie fiind reduși de elemente dezoxidante mai puternice, ceea ce modifică atât compoziția cât și caracteristicile acestora.

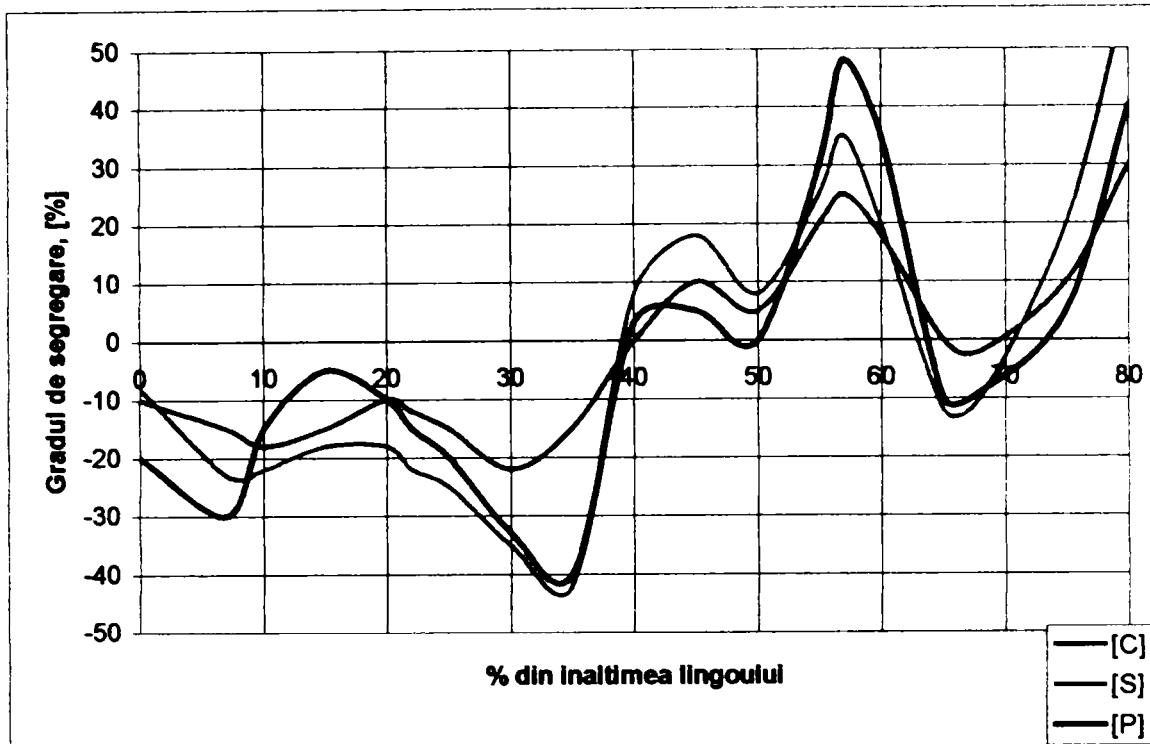


Fig.I.23. Variația segregăției [C], [S], [P] în zona centrală a unui lingou de 23,5 tone.

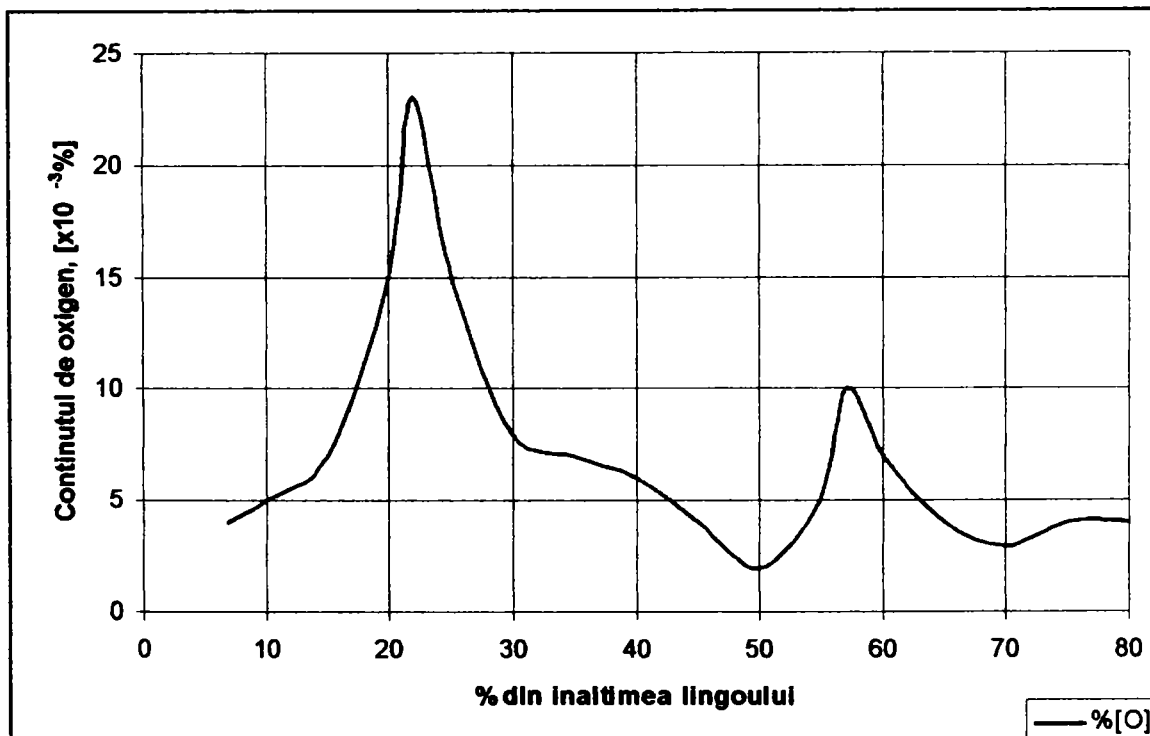


Fig. I.24. Variația %[O] în zona centrală a unui lingou de 23,5 tone.

Asupra conținutului de incluziuni nemetalice o influență deosebită o are dezoxidarea. Aceasta își atinge scopul atunci când se asigură un conținut mic de oxigen în baie la temperaturi înalte și îndepărtarea avansată și în timp scurt a produselor de dezoxidare. Acest lucru se realizează de regulă prin folosirea mai

mutlor dezoxidanți adăugați într-o anumită ordine și combinații, în cantități corespunzătoare.

În ceea ce privește temperatura de turnare, gradul de supraîncălzire are influență asupra condițiilor de solidificare și anume numai în zona exterioară, deoarece căldura de supraîncălzire se pierde relativ rapid astfel încât asupra regiunii interioare nu mai are practic nici o influență. Deoarece curbele de corelație liniare sau neliniare obținute în urma analizei au variații nesemnificative am reprezentat-o pe cea mai simplă (fig.1.25).

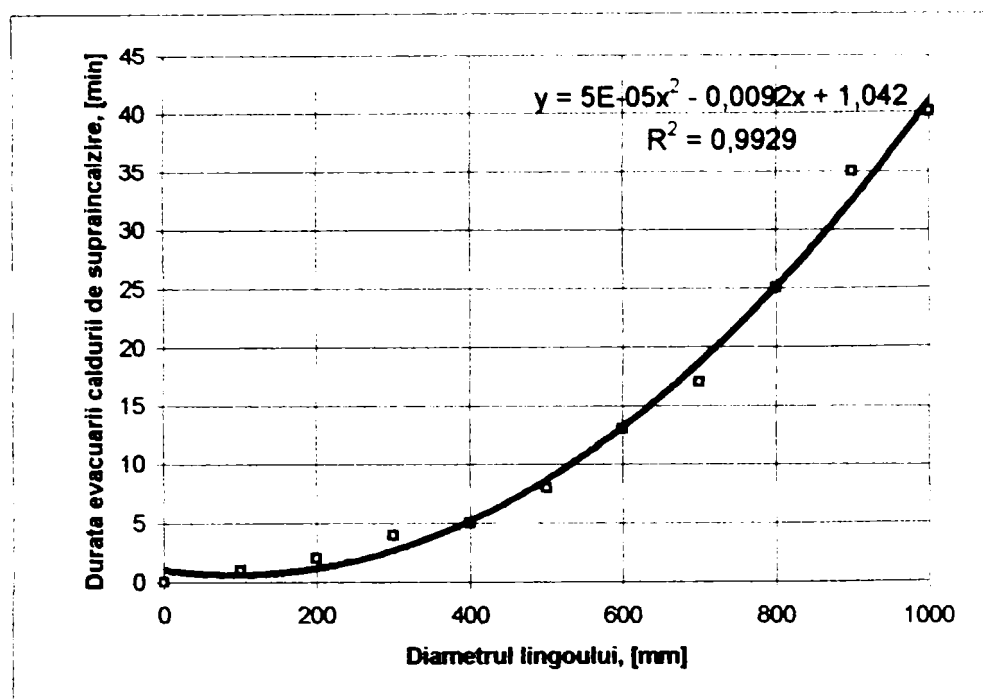


Fig.1.25. Variația duratei de eliminare a căldurii de supraîncălzire în funcție de mărimea lingoului [18].

Ecuația de corelație cu privire la durata evacuării căldurii de supraîncălzire, t_{ecs} în funcție de diametrul mediu a lingoului, va fi:

$$t_{ecs} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot D_m^2 - 0,0092 \cdot D_m + 1,042; \quad R^2 = 0,9929 \quad (1.29)$$

De asemenea, se constată că temperatura de turnare, grosimea peretelui lingotierei, conductivitatea termică a fontei din care este făcută lingotiera și chiar marca oțelului influențează progresarea frontului de solidificare și că modul de solidificare este determinat de cantitatea de căldură ce trebuie evacuată în exterior, deci practic de raportul dintre volumul total și suprafața de radiație.

În ceea ce privește modul de solidificare, viteza de deplasare a frontului de solidificare este cu atât mai mică cu cât lingoul este mai mare (circa 1mm/min la lingouri mari și circa 3mm/min la lingouri mici).

1.6. Considerații privind dirijarea solidificării lingourilor din oțel

Formarea diferitelor zone de structură ale lingoului este determinată de: intensitatea de răcire a oțelului, extinderea înaintea frontului de cristalizare a unui strat de impurități care determină apariția germenilor de cristalizare și ritmul de extindere al fluxurilor convective și gravitaționale cu cristalele care se depun

respectiv de cristalizarea neuniformă a lingoului în zona inferioară, determinată de acesta.

Curba de răcire a oțelului lichid existent înaintea frontului de solidificare caracterizează în totalitate condițiile de cristalizare a lingoului. Când se raportează la porțiunea dintre suprafață și axa lingoului se pot determina exact locurile de amplasare a zonelor cristaline. Gradientul de răcire indică distribuția temperaturii în raport cu temperatura de solidificare a stratului segregat, a cărui formare nu poate fi practic prevenită.

Dacă, curba de răcire a oțelului intersectează curba de solidificare a stratului de impurități, cantitatea de oțel care se află înaintea frontului de solidificare are o temperatură mult mai joasă decât propria temperatură lichidus și astfel se creează condiții ca în oțel să apară subrăcirea maximă. În volumul subrăcit se formează germeni independenți de cristalizare, iar structura cristalină devine echiaxială din columnară. Zona de subrăcire poate fi îndepărtată dacă gradientul de temperatură din oțel crește pe baza schimbării condițiilor termofizice de solidificare. Dacă acesta este mai mare sau egal decât gradientul de temperatură al curbei maxime zona de subrăcire dispare. Acest fapt se poate realiza fiind caracterizat de următoarea relație [18]:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}} \geq m \frac{C_o}{D} \left(\frac{1 - K_o}{K_o} \right) \quad (1.30)$$

unde: ΔT este gradientul de temperatură în faza lichidă a lingoului;

v_{cr} – viteza de cristalizare a lingoului;

C_o – concentrația inițială a impurităților în oțel;

K_o – coeficientul de repartiție al impurităților în oțel;

D – coeficientul de difuzie al impurităților în lichid;

m – tangenta unghiul de înclinare a curbei lichidus.

Frontul de cristalizare este plan și lingoul se solidifică sub formă de cristale alungite, caracteristice zonei de transcristalizare dacă este îndeplinită următoarea relație [18]:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}} = m \frac{C_o}{D} \left(\frac{1 - K_o}{K_o} \right) \quad (1.31)$$

Dacă în timpul răcirii lingoului gradientul de temperatură în oțel este mai scăzut decât cel al temperaturii de echilibru în stratul de impurități apare structura echiaxială. Formarea structurii dendritice echiaxiale are loc după îndeplinirea inegalității [18]:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}^2} \leq \frac{A \cdot C_o}{K_o} \quad (1.32)$$

unde: A este un coeficient determinat experimental.

Caracterul variației curbei de răcire a oțelului aflat înaintea frontului de cristalizare și schimbarea vitezei de cristalizare se determină prin măsurarea distribuției câmpurilor de temperatură în lingou prezentată în fig.1.26. Importanța gradientelor de temperatură se schimbă în funcție de dimensiunile lingoului, grosimea pereților lingotierei și temperatura oțelului turnat. În toate

cazurile, cea mai nefavorabilă zonă, în care se constată segregăția zonală și se creează premisele formării golurilor de contracție în formă de V pe axa lingoului este zona intermediară. În această zonă se formează straturi de segregăție determinate de subrăcirea maximă de profunzime și se dezvoltă puternic procesele de depunere a cristalelor. În aceeași perioadă, în soluția de bază a lingoului se menține o supraîncălzire considerabilă a oțelului, iar înaintea limitei de solidificare se păstrează un gradient încă ridicat de temperatură care determină deplasarea convectivă a metalului, ce distribuie metalul pe nivelele inferioare ale lingoului. Un gradient mai redus, la 20 minute de la începutul solidificării, se explică prin evacuarea intensă a căldurii prin crusta încă subțire a lingoului.

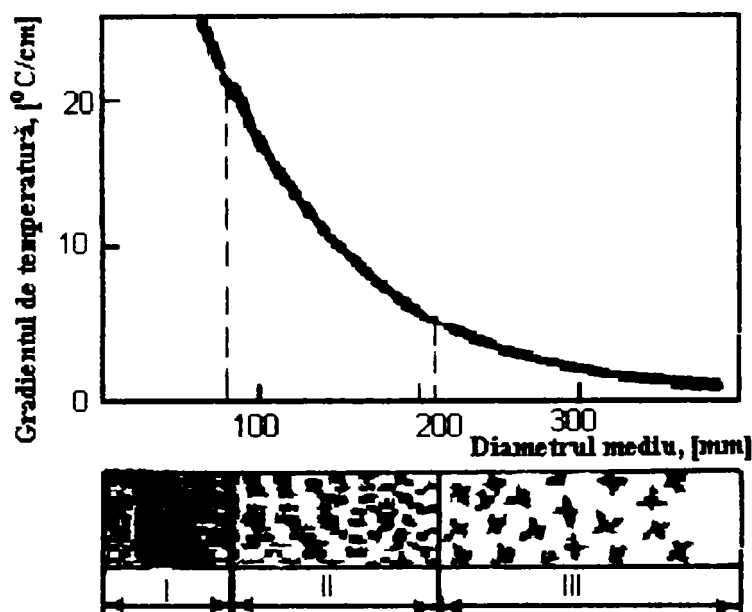


Fig.1.26. Modificarea structurii cristaline în funcție de intensitatea răcirii [24]:
I – zona de transcristalizare; II – zona intermediară de dendrite globulare;
III – zona dendritelor echiaxiale.

Densitatea structurii și reducerea defectelor de turnare din lingoul de oțel sunt puternic influențate de solidificarea dirijată. Pentru a realiza aceasta este necesar să se asigure cedarea căldurii din lingou astfel încât metalul să se solidifice consecutiv începând de la zona inferioară spre capul lingoului și astfel să fie create toate condițiile pentru alimentarea permanentă cu metal lichid a tuturor zonelor de solidificare.

De obicei evacuarea rapidă a căldurii se asigură prin crearea gradientului brusc în părțile care se solidifică, precum și în faza lichidă a lingoului. În acest caz în afară de căldura de supraîncălzire va trebui cedată în mare parte și căldura fizică de răcire a stratului de oțel care s-a solidificat. Parametrul de bază cu care se poate dirija structura cristalină este influențarea gradientului de temperatură din faza lichidă învecinată cu frontul de solidificare a lingoului. Influența acestuia asupra schimbării structurii cristaline a fost tratată de V.A. Tiller [21]. Micșorarea succesivă a gradientului de temperatură în faza lichidă la una și aceeași compoziție a aliajului conduce la trecerea treptată a frontului plan de solidificare la cel celular. La

micșorarea în continuare a acestui gradient, frontul celular tinde spre creșterea dendritică a cristalelor.

Posibilitatea trecerii de la frontul de solidificare plan la cel cu structură celulară se determină cu relația:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}} \leq m \frac{C_o}{D} \left(\frac{1 - K_o}{K_o} \right) \quad (1.33)$$

iar spre creșterea dendritică cu relația (1.32).

Dacă în oțelul lichid există germeni eterogeni care pot provoca formarea germenilor la subrăcirea ΔT , atunci în volumele de oțel lichid se vor forma cristale echiaxe. Condițiile unei astfel de cristalizări se poate exprima cu relația [18]:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}} < m \frac{C_o(1 - K_o)}{DK_o} - \frac{\Delta T}{v_{cr} \delta} \quad (1.34)$$

unde: δ este grosimea stratului limită îmbogățit cu impurități.

Pentru a obține un lingou cu structură columnară este necesar un gradient de temperatură în fază lichidă care să determine germinarea cristalelor înaintea frontului de solidificare. Diametrul d al cristalelor columnare în aliajul lichid se poate determina cu relația determinată de V.A. Tiller [21].

$$d \approx \frac{D}{2 \cdot \pi \cdot R} \left\{ 1 + \left[1 + \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot v_{cr}}{D} \left(\frac{0,6 \cdot \sigma}{\Delta S \Delta T_o} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (1.35)$$

unde: σ este tensiunea interfazică;

ΔS – entropia de topire;

ΔT_o – gradientul de temperatură în partea superioară a cristalului.

Analizând relația (1.35) rezultă ca diametrul cristalului format se mărește pe măsura scăderii gradientului de temperatură și a creșterii tensiunii interfazice.

Schemele de obținere a structurilor omogene echiaxiale se pot grupa astfel:

- crearea în întregul volum al lingoului a unui gradient minim de temperatură ΔT în faza lichidă care să se încadreze în limitele intervalului de cristalizare al oțelului. În acest caz germinarea cristalelor se va produce aproape în același timp în întregul volum al lingoului iar micșorarea gradientului de temperatură în topitură se poate realiza prin micșorarea temperaturii de turnare a oțelului (măsură aplicată frecvent în practică), adaos de materiale solubile respectiv de microrăcitori care creează o puternică subrăcire a topiturii;

- formarea centrelor de cristalizare într-o zonă nu prea largă a stării bifazice, înaintarea frontului de solidificare și deplasarea succesivă a acestei zone de la periferie spre axa lingoului (fig.1.27). În acest caz lățimea zonei va fi limitată iar faza lichidă va putea, sub influența presiunii ferostatice, să pătrundă ușor în porii de contracție formați ca urmare a procesului de cristalizare. Asemenea condiții pot se pot crea la gradientele mai mari de temperatură decât cele din cazul anterior;

- adăugarea în oțelul care pătrunde în lingotieră a catalizatorilor care provoacă formarea eterogenă a germenilor de cristalizare, ce conduce la micșorarea dimensiunilor grăunților în lingoul de oțel turnat. La adăugarea în oțel a materialelor

solubile și a catalizatorilor, germinarea cristalelor influențează procesul de cristalizare ca urmare a faptului că aceștia determină subrăcirea concentrată a topiturii și că impuritățile superficial active micșorează tensiunea superficială la interfața cristal-topitură, reduce raza critică a germenului, energia consumată pentru formarea sa și tendința de subrăcire.

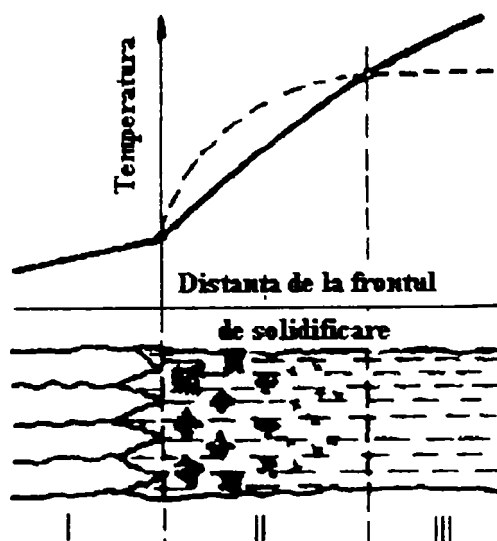


Fig.1.27. Schema formării zonei bifazice [55]:

I – zona cristalelor columnare; II – zona bifazică; III – topitură lichidă.

La dirijarea proceselor de germinare a cristalelor în lingourile de oțel turnate rezultă grăunți mici și uniformi care determină obținerea unor durate scurte a procesului de solidificare și omogenizare respectiv valori ridicate ale caracteristicilor mecanice ale semifabricatelor obținute din aceste lingouri. În mod practic procesele de germinare și creștere a grăunților se pot regla prin introducerea microrăcitorilor la turnarea oțelului lichid în lingotiere.

Problema de bază care trebuie rezolvată la turnarea oțelului constă în asigurarea obținerii de lingouri omogene din punct de vedere chimic, structural și a proprietăților mecanice. Pentru atenuarea deficiențelor la solidificarea clasică, este necesară adaptarea unei metode eficiente de evacuare a căldurii din oțelul în curs de solidificare.

Pentru dirijarea solidificării se pot utiliza trei metode de acțiune:

- acțiunea unui câmp magnetic alternativ sau continuu pentru oprirea curenților de convecție din oțelul lichid din mijlocul lingoului sau schimbarea direcției mișcării acestora;

- folosirea microrăcitorilor sub formă de pulbere metalică sau granule metalice, care micșorează gradientul de temperatură și dereglează circulația nesolidificat;

- mărirea vitezei de solidificare a oțelului prin diferite procedee.

În calitate de microrăcitori se utilizează pulberi metalice pe bază de fier sau diferite alte aliaje respectiv pulberi metalice obținute la fabricarea alicelor din oțel. Cantitatea de microrăcitori variază între 0,1-3% din masa oțelului turnat iar granulația variază de la 50 microni la 1,5mm. Cantitatea și granulația microrăcitorilor se stabilește [22] în funcție de parametrii tehnologici ai procesului (temperatura de

turnare a oțelului, modul de introducere a microrăcitorilor, greutatea lingoului respectiv timpul de turnare).

Microrăcitorii introduși în oțelul lichid în timpul turnării acestuia provoacă la răcirea și solidificarea oțelului mai multe efecte, și anume: de răcire prin acumularea căldurii de supraîncălzire a oțelului și parțial a căldurii de cristalizare rezultând schimbarea caracterului solidificării, de cristalizare prin formarea unui număr suplimentar de germeni de cristalizare, de aliere când se urmărește creșterea conținutului unui element respectiv de obținere a compozitelor.

Microrăcitorii folosiți pentru dirijarea solidificării oțelului pot determina următoarele tipuri de solidificare:

I – microrăcitorii 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 $\Delta T = (0,01 - 0,11) T_{top}$;

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 ca direcție 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 microvolum, 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 microvolum 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 (anexa 1.1): 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.

Din analiza comparativă, a datelor existente în literatura de specialitate [23, 24], cu privire la lingourile turnate clasic și cu microrăcitori se observă că în lingoul turnat cu microrăcitori zona bifazică este mai largă iar durata de existență a oțelului în zona bifazică este de asemenea mai mare, deci segregarea și contracția

volumică au posibilitate mai mică de desfășurare, și deci neomogenitatea fizică și chimică în zona axei termice va fi mai redusă. Curbele izolichidus respectiv izosolidus sunt deplasate spre stânga deci durata de solidificare a lingoului va fi mai mică respectiv zona bifazică va fi mai mare. Viteza de deplasare a frontului de solidificare crește de 1,5-2 ori.

Pentru comparație în fig.1.28 se prezintă gradul de segregare a azotului la solidificarea lingourilor de forjă cu masa de 40 tone turnate clasic și cu microrăcitori.

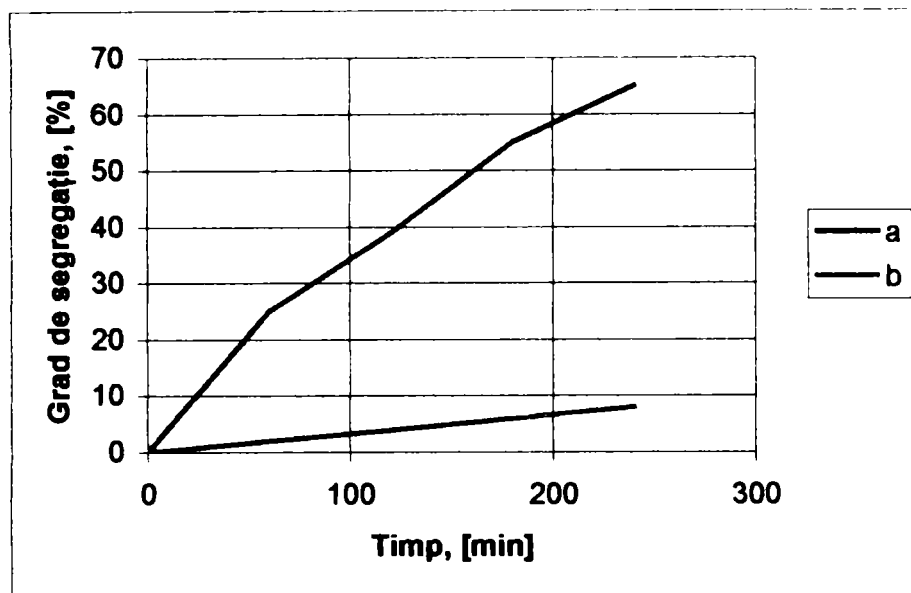


Fig.1.28. Gradul de segregare a azotului în funcție de timpul de solidificare:
a – lingou turnat clasic ; b – lingou turnat cu microrăcitori.

O comportare asemănătoare au și celelalte elemente care segregă, astfel carbonul, sulful, fosforul respectiv oxigenul segregă mai repede în prima parte a stadiului de solidificare și conduc la segregare zonală pozitivă (în partea superioară) și mai puțin la segregare zonală directă spre axa termică. Segregarea pozitivă se formează în zonele de sub maselotă iar comparativ cu turnarea clasică, la turnarea cu microrăcitori este mai mică cu circa 90% la sulf, cu 50% la fosfor respectiv 60% la carbon. La turnarea oțelului cu microrăcitori se dezvoltă și segregarea negativă care la sulf atinge 48%, la fosfor 20% iar la carbon 22%. De asemenea, segregarea neaxială se micșorează de 2-3 ori. Folosirea microrăcitorilor, determină schimbarea radicală a mecanismului de solidificare: elimină caracterul de periodicitate (prin inițierea unei solidificări volumice în loc de succesivă) și deci posibilitatea formării segregărilor de tip V.

În ce privește segregarea carbonului și sulfului, domeniile de segregare a acestora sunt localizate la sfârșitul zonei de cristale columnare și în zona axei termice în cazul unui lingou turnat clasic, iar în cazul lingourilor turnate cu microrăcitori tendința de segregare a carbonului și sulfului scade. Explicația teoretică a micșorării segregării carbonului și sulfului poate fi următoarea: în cazul introducerii microrăcitorilor la diferite intervale de timp se întrerup curenții de convecție, iar transferul de masă datorită forțelor capilare este mult diminuat deoarece lungimea dendritelor este mai mică iar numărul lor este mai mare și deci canalele capilare au dimensiuni mai mici.

Din punct de vedere al procesului de cristalizare, microrăcitorii determină prin topire formarea grupărilor de atomi capabili să joace rol de germeni, numărul acestora crește. Introducerea acestora determină schimbarea curbei cinetice de separare a fazei solide (de cristalizare), determinată cu relația:

$$V = V_0 \left(1 - e^{-\frac{\pi}{3} \cdot n \cdot v^3 \cdot t^4} \right) \quad (1.36)$$

unde: V - volumul de fază lichidă cristalizată;

V_0 - volumul aliajului lichid;

n - numărul de germeni de cristalizare formați în unitatea de timp;

v - viteza liniară de creștere a cristalelor;

t - durata de cristalizare.

În fig.1.29 respectiv fig.1.30 se arată modul de schimbare a cineticii procesului de cristalizare în condițiile introducerii unor cantități diferite de microrăcitori (0%, 2,5%, 4,5% și 6%) la temperatură de turnare constantă.

Prin introducerea microrăcitorilor crește viteza de cristalizare, zona I se micșorează, ceea ce demonstrează că numărul de germeni este mare. Deci la începutul solidificării există deja un număr mare de germeni omogeni. Solidificarea este de tip III, iar mărimea vitezei de cristalizare la început reflectă cantitatea de fază solidă care se menține în topitură. Solidificarea de tip III determină frânarea creșterii columnare a cristalitelor și formarea cristalitelor echiaxiale, cu dimensiuni mai mici și distanța dintre ramurile dendritice cu un volum de mărime mai mic.

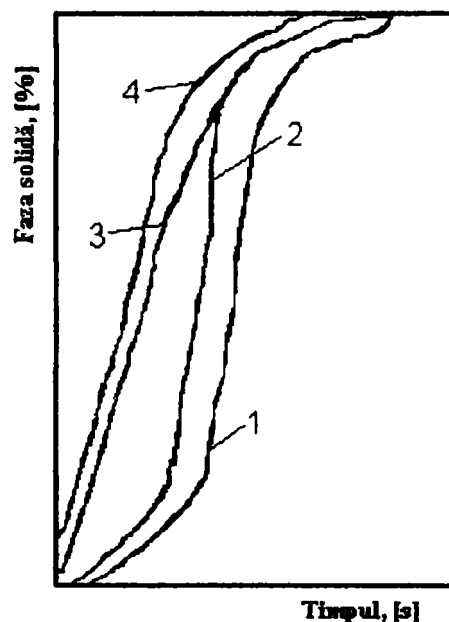
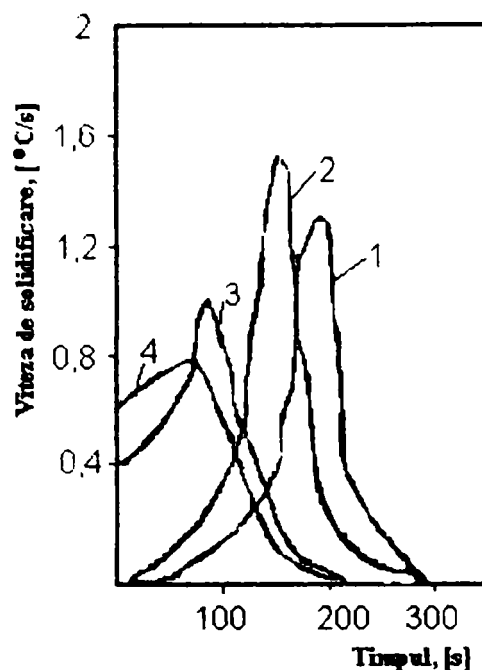


Fig.1.29. Variația cantității de fază solidă în funcție de timp, pentru diverse cantități de microrăcitori [25]: curba 1 - 0%; curba 2 - 2,5%; curba 3 - 4,5%; curba 4 - 6%.

Microrăcitorii se utilizează și pentru armarea lingourilor și pieselor [22, 25]. 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).



**Fig.1.30. Variația vitezei de solidificare în funcție de timp, pentru diverse cantități de microrăcitori [25]:
curba 1 - 0%; curba 2 - 2,5%; curba 3 - 4,5%; curba 4 - 6%.**

Pentru aceste scopuri pot fi folosite, în calitate de macrorăcitori particule cu dimensiuni mari, de exemplu bile de rulmenți cu diametrul cuprins între 5 - 60mm, în funcție de masa lingoului, alice, bucăți de sârmă, etc.

1.7. Concluzii

Din analiza prezentată referitor la factorii de influență asupra calității lingourilor de oțel rezultă următoarele concluzii:

1. Calitatea lingourilor din oțel este influențată de o serie de factori, dintre care: compoziția chimică a oțelului și tendința acestuia de a segrega, viteza și temperatura de turnare, forma și dimensiunile geometrice ale lingotierei respectiv condițiile de degajare a căldurii.

2. Îmbunătățirea calității oțelului prin tratarea acestuia în vid, se realizează frecvent în cadrul metalurgiei în oală, cu eficiență remarcabilă asupra proceselor care au loc ca urmare a tratării acestuia. Prin rafinarea oțelului în vid se obțin efecte metalurgice importante, dintre care se menționează: degazarea, omogenizarea termică și chimică, flotația incluziunilor nemetalice, accelerarea reacțiilor de rafinare (desulfurare, dezoxidare) a topiturii metalice. Realizarea acestor efecte este dependentă de metoda utilizată precum și de felul în care sunt corelați parametri tehnologici ai procesului cu principalul scop urmărit.

3. Solidificarea unui volum mare de oțel este asociată cu contracții importante, independente de gradul de puritate, lucru care conduce la deteriorarea sensibilă a structurii oțelului și la apariția de neomogenități chimice și structurale în lingourile mari din oțel, fapt care a condus la ideea îmbunătățirii calității prin dirijarea structurii de solidificare a lor.

4. Formarea cristalelor la solidificare este rezultatul a două procese elementare: formarea în topitură a unor germeni sau nuclee de cristalizare și creșterea germeilor formați. Structura omogenă echiaxială a lingourilor turnate din oțel se obține prin:

- crearea în volumul de oțel lichid a unui gradient minim de temperatură care să se încadreze în limitele domeniului de solidificare, germinarea cristalelor producându-se în același timp în întreg volumul de lichid. Micșorarea gradientului de temperatură în lichid se realizează prin scăderea temperaturii de turnare a oțelului sau prin adăos de microrăcitori care să permită o subrăcire puternică;

- formarea de centri de cristalizare într-o zonă cu două faze, înaintea frontului de solidificare, și deplasarea succesivă a acestei zone la periferie spre axa lingoului;

- introducerea în oțelul ce pătrunde în lingotieră a catalizatorilor care să provoace formarea eterogenă a germeilor de cristalizare ce conduce la micșorarea dimensiunilor grăunților în lingoul turnat.

5. Deoarece procesul de solidificare este influențat nu numai de factori interni ci și de o serie de factori externi, precum și faptul că determinările nu se pot face direct, explică de ce nu există încă relații cantitative precise între structura lingourilor și factorii fizico-chimici de la elaborare-turnare-solidificare, relațiile stabilite fiind cu caracter calitativ, iar cele cantitative dau valori aproximative deoarece nu se pot considera toți factorii care influențează.

6. Reducerea timpului de solidificare conduce la creșterea gradului de omogenitate structurală și de reducere a celui de segregare. Prin prelucrarea datelor existente în literatura de specialitate s-au obținut ecuații de corelație exprimate grafic și analitic între durata solidificării și gradul de segregare pentru hidrogen respectiv azot.

7. Pe baza datelor analizate și prelucrate matematic au fost determinate ecuațiile de corelație cu privire la segregarea carbonului în funcție de diametrul mediu al lingoului. Se observă că în cazul lingourilor mari din oțel, segregarea carbonului este direct proporțională cu diametrul mediu al acestora.

8. Pentru obținerea unor lingouri omogene din punctele de vedere chimic, structural și al proprietăților mecanice este necesară asigurarea evacuării rașionale a căldurii din oțelul aflat în curs de solidificare.

9. Calitatea lingourilor mari din oțel destinate forjării poate fi îmbunătățită printr-o dirijare a solidificării care determină: o aplatizare a formei retasurii la lingourile turnate cu microrăcitori și reducerea pe această cale a volumului acesteia având ca efect o creștere a scoaterii de metal, o creștere a omogenității structurale și a proprietăților calitative reprezentate prin rezistență și plasticitate, respectiv o finisare a structurii de turnare.

10. Studiul solidificării lingourilor mari din oțel prezentat în acest capitol este necesar pentru stabilirea posibilităților de îmbunătățire a calității produselor obținute prin forjarea acestora. În acest scop, în cercetările experimentale efectuate pentru elaborarea tezei se va utiliza dirijarea structurii de solidificare, metodă care prezintă avantajul că poate fi aplicată relativ ușor în practica industrială.

CAPITOLUL 2

ANALIZA ÎNCĂLZIRII LINGOURILOR MARI DIN OȚEL ÎN VEDEREA PRELUCRĂRII PLASTICE

Influența tehnologiei de fabricație asupra calității pieselor forjate este dată de combinația dintre încălzirea și tehnologia propriu-zisă de deformare plastică a lingourilor din oțel.

În secțiile de forjă fabricarea pieselor mari se realizează din lingouri a căror calitate este condiționată de procesul tehnologic de elaborare, turnare-solidificare și răcire. Deoarece compoziția chimică a materialului este dată și astfel se cunoaște și călibilitatea, rămân să se analizeze ca factori importanți de influență încălzirea materialului în vederea deformării plastice, tehnologia de forjare propriu-zisă și succesiunea operațiilor la tratamentul termic.

Piese mari forjate se obțin în secțiile de forjare (fig.2.1) care sunt interconținute intern de capacitatea de încălzire sau menținere în stare caldă a lingourilor, iar extern de secțiile de turnare a lingourilor și de cele de tratamente termice a pieselor forjate mari.

În general, procesul de încălzire a lingourilor mari din oțel în vederea prelucrării la cald trebuie să asigure obținerea temperaturii cât mai uniforme pe întreaga secțiune a acestora, într-un timp minim fără să cauzeze crăpături sau fisuri. Scurtarea duratei de încălzire duce pe de o parte la reducerea cantității de combustibil sau energie, iar pe de altă parte la micșorarea oxidării și decarburării materialului supus încălzirii. Reducerea exagerată a duratei de încălzire, poate cauza însă o diferență prea mare de temperatură între centrul și suprafața lingourilor, ceea ce are ca urmare apariția unor tensiuni ce favorizează distrugerea integrității acestora.

Dinamica regimurilor de încălzire [23] este influențată de o serie de factori: temperatura lingourilor în momentul introducerii lor în agregatul de încălzire, viteza și durata de încălzire, diferența de temperatură pe secțiune, compoziția chimică, dimensiunile caracteristice ale lingourilor, regimul termic al cuptorului, oxidarea și tensiunile termice la încălzire.

Temperatura de încălzire a lingourilor în cuptoare este un factor care influențează durata de desfășurare a procesului, respectiv calitatea. Cercetarea proprietăților oțelului în domeniul temperaturilor ridicate este legată de stabilirea temperaturii optime de încălzire, care în general este complexă, iar rezultatele nu sunt întotdeauna sigure [26]. Pentru stabilirea corectă a intervalului temperaturilor de prelucrare la cald, este necesar să se țină seama de proprietățile tehnologice ale oțelurilor, precum și de transformările structurale a lor. Temperatura minimă admisă pentru deformare este limitată de gradul de deformare ce se poate aplica la temperatura respectivă și structura care favorizează obținerea proprietăților cerute.

Temperatura de început de forjare se adoptă cu 100-200°C sub temperatura liniei solidus, iar cea de sfârșit a prelucrării se situează de obicei cu circa 40-50°C deasupra temperaturii de recristalizare a oțelului respectiv [27].

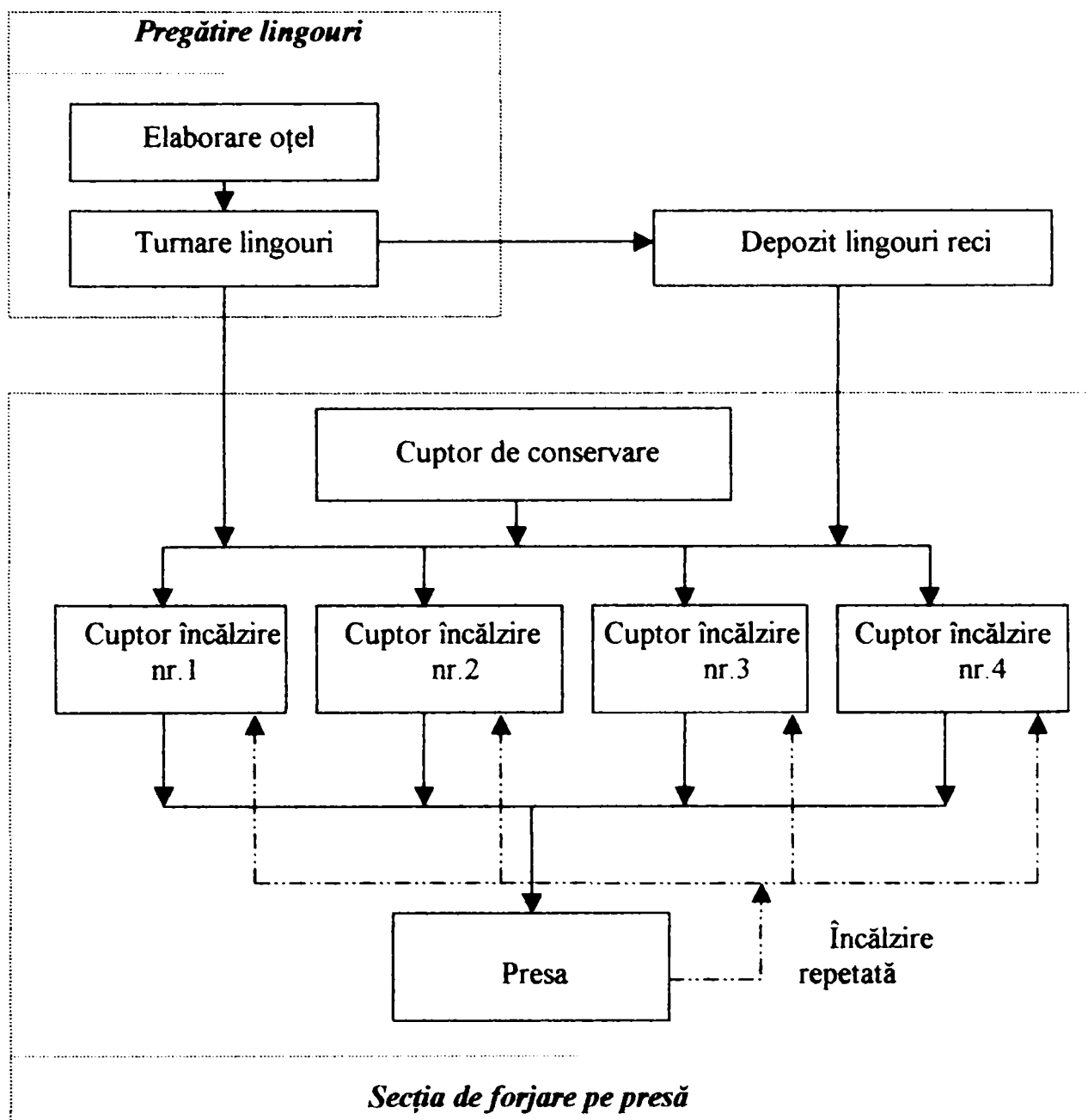


Fig. 2.1. Fluxul tehnologic a lingourilor în secțiile de forjare.

Pentru lingourile semicalde și calde durata încălzirii nu depinde de marca oțelului ci de dimensiunea acestora și temperatura de forjare. Încălzirea lingourilor mari din oțel care se încălzesc începând din stare rece, indiferent dacă sunt din oțel carbon sau oțel aliat se face în cinci perioade (trei etape izoterme și două etape intermediare cu viteze de încălzire constante a cuptorului). Vitezele de încălzire sunt cuprinse între 30-60°C/h pentru prima treaptă intermediară și între 50-140°C/h pentru a doua treaptă intermediară.

De regulă, în literatura de specialitate [32] se recomandă, pentru lingouri cu masa 10-50t, ca valoarea diferenței de temperatură pe secțiunea lingourilor să fie cuprinsă între 50-80°C, iar pentru lingouri mai mari de 50t, valoarea acestei diferențe

poate fi de 80-120°C. Valoarea diferenței de temperatură pe secțiunea lingoului este strâns corelată cu diametrul mediu al lingoului și cu valoarea potențialului termic al cuptorului, ceea ce rezultă și din fig.2.2.

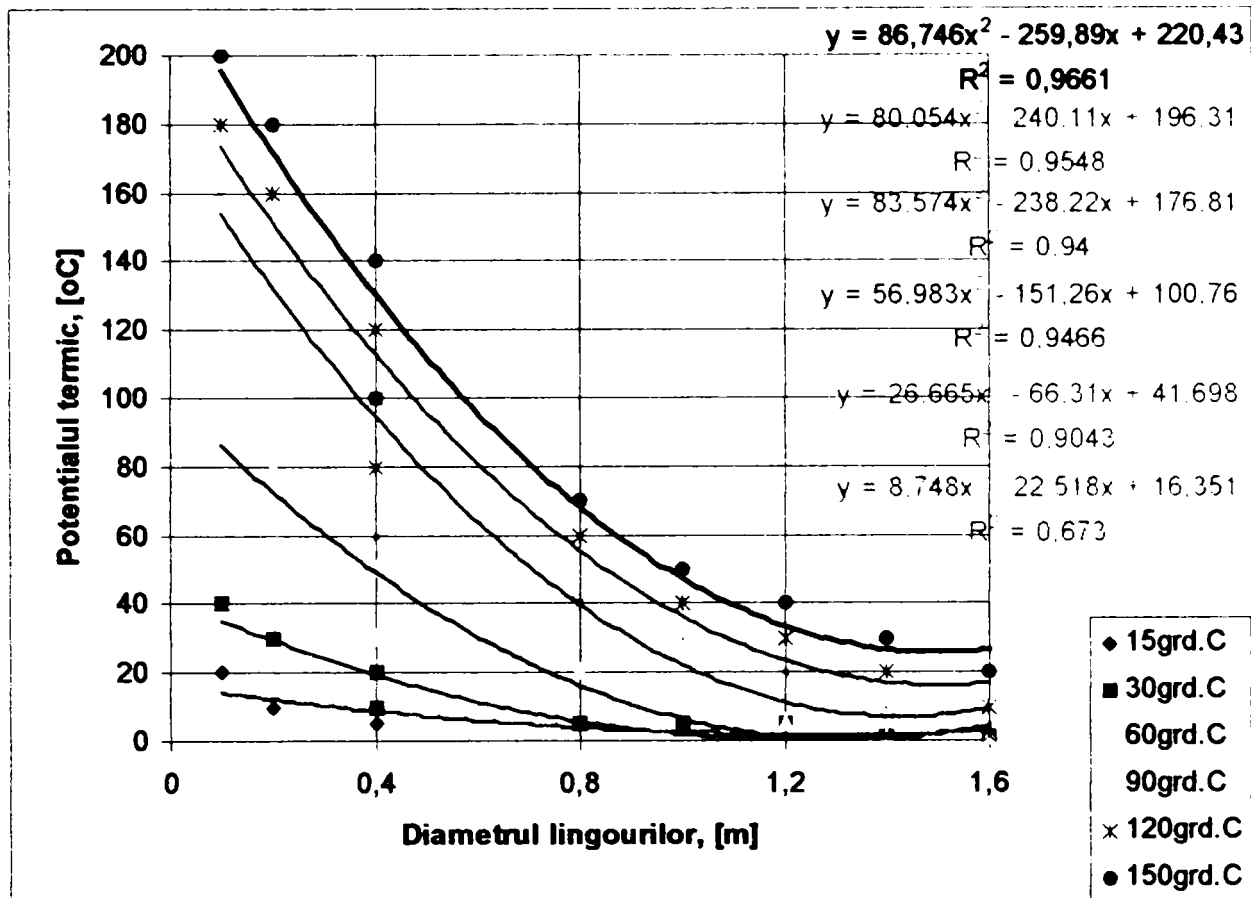


Fig.2.2. Dependenta între potențialul termic și diametrul lingourilor, pentru neuniformități de încălzire de 15°, 30°, 60°, 90°, 120° și 150°C [33].

Astfel, pentru neuniformități de încălzire de 15°, 30°, 60°, 90°, 120° și 150°C curbele demonstrează în mod intuitiv că, pe măsura creșterii diametrului lingourilor, potențialul termic trebuie să scadă, pentru menținerea aceleiași valori a diferenței de temperatură pe secțiunea lingoului.

Analizând experimentările efectuate la nivel mondial [1, 2, 18, 28, 29] s-a determinat dependența între diferența de temperatură pe secțiunea lingourilor (ΔT) și diametrul acestora (D_m), prezentată în fig.2.3, respectiv ecuațiile de corelație pentru domeniul de variație a acesteia, și anume:

pentru limita superioară,

$$\Delta T = -0,0002 \cdot D_m^2 - 0,4228 \cdot D_m + 158,76 \quad R^2 = 0,9186 \quad (2.1)$$

pentru limita inferioară,

$$\Delta T = -0,0002 \cdot D_m^2 - 0,5611 \cdot D_m - 59,551 \quad R^2 = 0,9266 \quad (2.2)$$

Cu excepția a trei valori, două peste limita superioară și una puțin sub limita inferioară, toate valorile pentru diferența de temperatură pe secțiunea lingourilor s-au încadrat în domeniul delimitat de curbe. Având în vedere valorile mari pentru coeficienții de corelație ($R > 0,91$), se consideră că acest domeniu este bine delimitat de cele două ecuații.

Ecuația de corelație a curbei corespunzătoare acestui domeniu (curba de culoare roșie) va fi:

$$\Delta T = -3 \cdot 10^{-5} \cdot D_m^2 + 0,1501 \cdot D_m + 220,02 \quad R^2 = 0,5798 \quad (2.3)$$

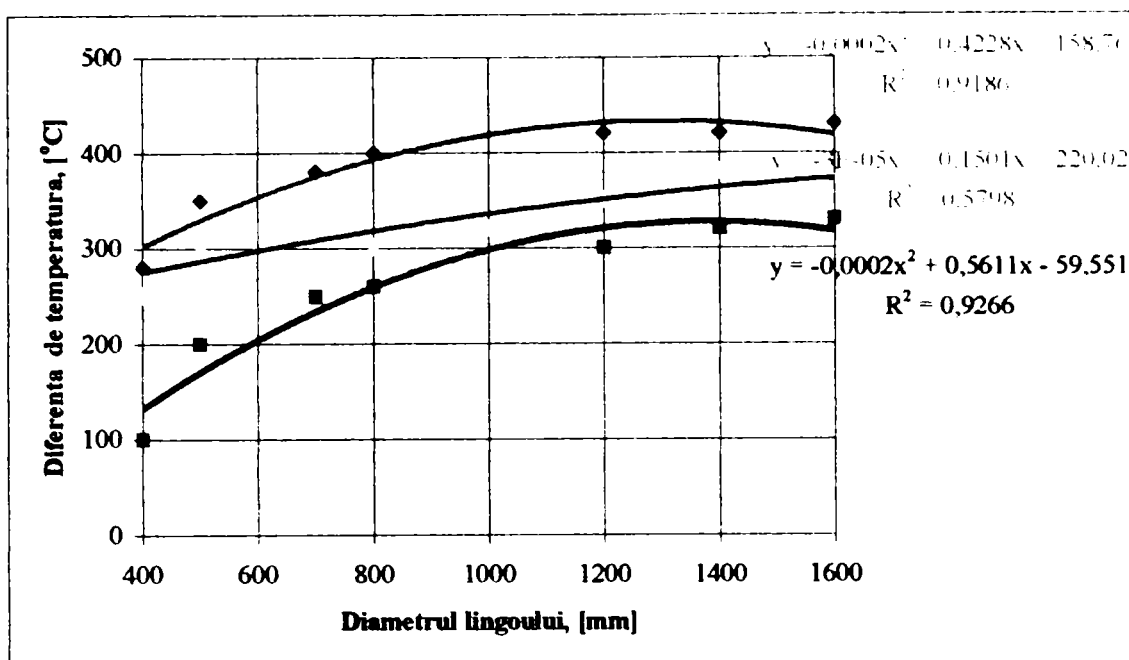


Fig.2.3. Variația diferenței de temperatură pe secțiunea lingourilor în funcție de diametrul acestora [58].

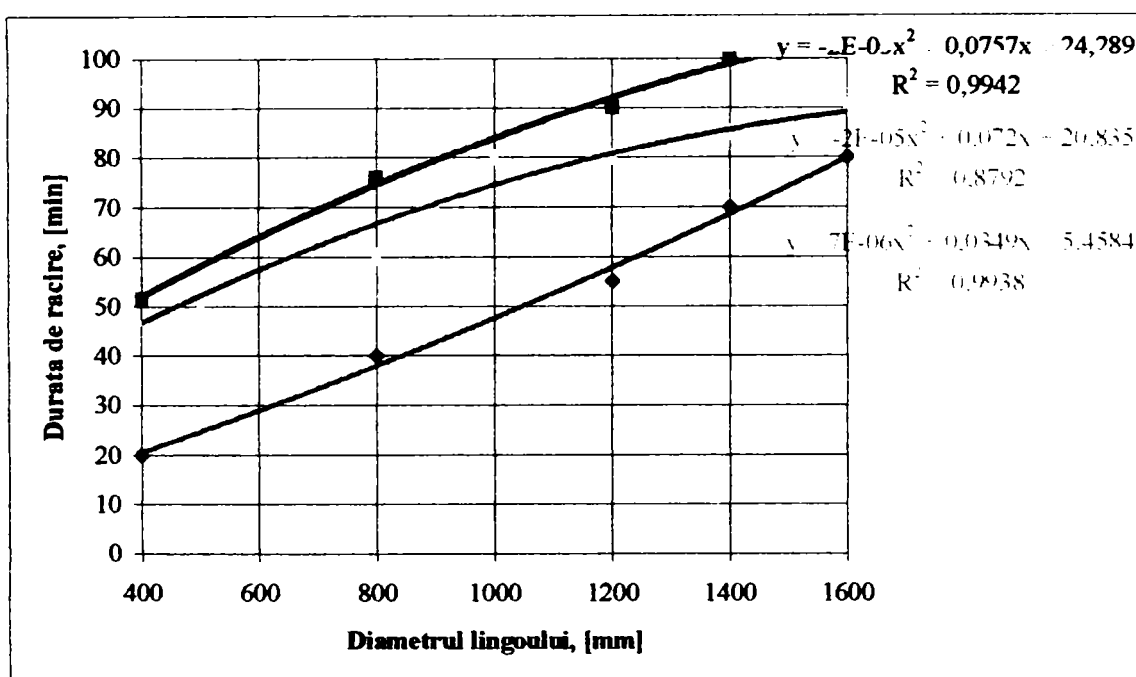


Fig.2.4. Variația duratei de răcire funcție de diametrul lingourilor [58].

Tot în acest mod a rezultat dependența dintre durata de răcire (t_r) și diametrul lingourilor (D_m), prezentată în fig.2.4, respectiv ecuațiile de corelație pentru domeniul de variație a acesteia:

pentru limita superioară,

$$t_r = -2 \cdot 10^{-5} \cdot D_m^2 + 0,0757 \cdot D_m + 24,289 \quad R^2 = 0,9942 \quad (2.4)$$

pentru limita inferioară,

$$t_r = 7 \cdot 10^{-6} \cdot D_m^2 + 0,0349 \cdot D_m + 5,4584 \quad R^2 = 0,9938 \quad (2.5)$$

Cu excepția a două valori, una puțin peste limita superioară și una sub limita inferioară, toate valorile pentru diferența de temperatură pe secțiunea lingourilor s-au

încadrat în domeniul delimitat de curbe. Ecuația de corelație a curbei corespunzătoare acestui domeniu (curba de culoare roșie) va fi:

$$t_r = -2 \cdot 10^{-5} \cdot D_m^2 + 0,072 \cdot D_m + 20,853 \quad R^2 = 0,8792 \quad (2.6)$$

Analizând diagramele din fig.2.3 și fig.2.4 se observă că valorile experimentale a diferenței de temperatură pe secțiunea lingourilor respectiv a duratei de răcire obținute se află în domeniile de variație (limitate de curbele de culoare albastru respectiv negru).

Deoarece valoarea diferenței de temperatură pe secțiunea lingourilor este determinantă în apariția tensiunilor termice, care pot cauza distrugerea compactității oțelului și întrucât limitează zona de transformare din interiorul lor, această valoare trebuie precizată cu suficientă exactitate.

Stabilirea unui regim corect de încălzire, adică a unui regim în care viteza de încălzire să fie sensibil apropiată de viteza admisibilă, a preocupat o seamă de cercetători [3, 17, 31] și mai constituie încă subiect de cercetare, întrucât până în prezent nu a fost clarificată în suficientă măsură. Principala problemă care mai necesită cercetări o constituie interdependența dintre viteza de încălzire și diferența de temperatură care se creează în timpul încălzirii în volumul lingourilor inclusiv valoarea tensiunilor termice.

2.1. Variante de încălzire a lingourilor mari din oțel în vederea deformării plastice

Încălzirea lingourilor mari din oțel se realizează cu două sau mai multe trepte de menținere. Alegerea numărului de trepte de menținere depinde de gradul de aliere al oțelului și de mărimea lingoului [37]. În fig.2.5 este prezentat regimul de încălzire cu două trepte de menținere a lingourilor din oțel cu masa peste 20 tone.

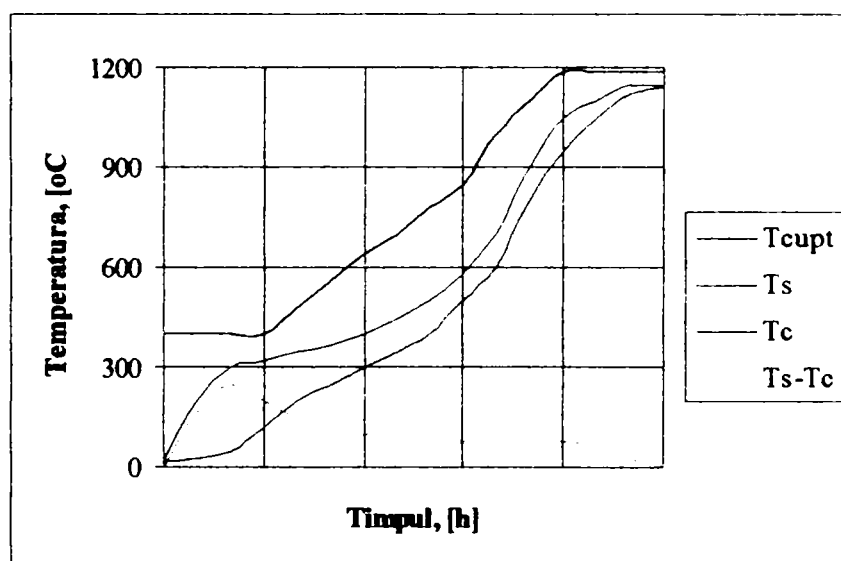


Fig.2.5. Regimul de încălzire cu două trepte de menținere [37]:

T_{cupt} – temperatura cuptorului; T_s – temperatura suprafeței;

T_c – temperatura centrului; $T_s - T_c$ – diferența de temperatură pe secțiunea lingoului.

Din graficul prezentat în fig.2.5 se observă că prima treaptă de menținere se realizează la temperatura de încărcare în cuptor, după care urmează încălzirea cuptorului cu viteză redusă ($v_1 = 30-60^\circ\text{C/h}$) până la 800°C astfel încât să nu se

depășească viteza de încălzire maxim admisă. De la 800°C până la temperatura finală, încălzirea se face cu viteza realizabilă de către cuptor ($v_2 = 50-140^\circ\text{C/h}$). A doua treaptă de menținere se efectuează la temperatura finală de încălzire, în vederea reducerii diferenței de temperatură pe secțiunea lingourilor înainte de scoaterea din cuptor în vederea deformării plastice.

Pentru a reduce diferența de temperatură între suprafața și centrul lingourilor mari din oțeluri aliate în perioada de preîncălzire, care se încălzesc din stare rece, se folosește diagrama din fig.2.6.

Pentru comparație, în fig.2.7 sunt prezentate curbele de variație a temperaturii și a diferenței de temperatură, obținute pe cale experimentală [21], la încălzirea unui lingou cu masa de 45t după o diagramă cu două trepte de încălzire, respectiv în fig.2.8 sunt prezentate curbele de variație a temperaturii la încălzirea aceluiași lingou, însă după un grafic de încălzire cu trei trepte de menținere.

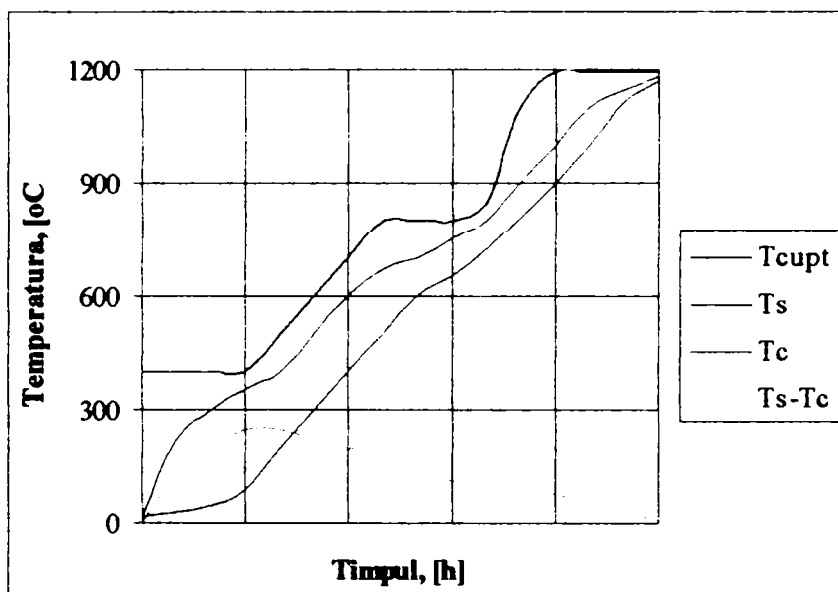


Fig.2.6. Regimul de încălzire cu trei trepte de menținere [37]:

T_{cupt} – temperatura cuptorului; T_s – temperatura suprafeței;
 T_c – temperatura centrului; $T_s - T_c$ – diferența de temperatură pe secțiunea lingoului.

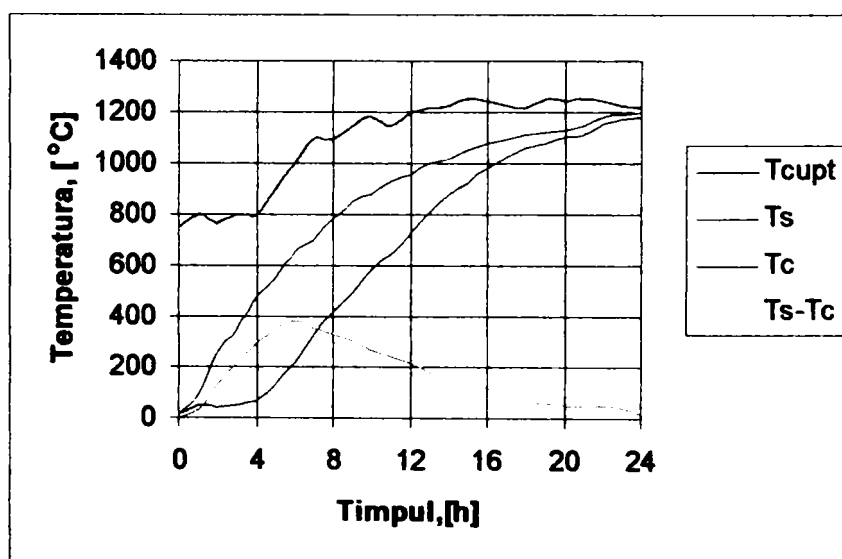


Fig.2.7. Încălzirea unui lingou de oțel cu masa de 45t cu două trepte de menținere [37]:

T_{cupt} – temperatura cuptorului; T_s – temperatura suprafeței;
 T_c – temperatura centrului; $T_s - T_c$ – diferența de temperatură pe secțiunea lingoului.

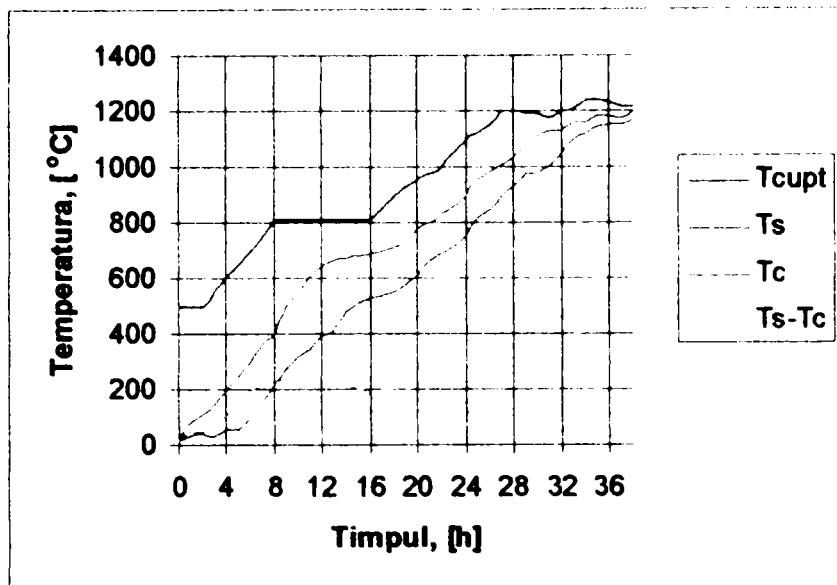


Fig.2.8. Încălzirea unui lingou de oțel cu masa de 45t cu trei trepte de menținere[37]:
 T_{cupt} – temperatura cuptorului; T_s – temperatura suprafeței;
 T_c – temperatura centrului; $T_s - T_c$ – diferența de temperatură pe secțiunea lingoului.

Din fig.2.7 se observă că diferența de temperatură între centrul și suprafața lingoului în prima perioadă de încălzire, adică până în momentul în care suprafața atinge 800°C , este de aproximativ 350°C , iar timpul total de încălzire este de 24 ore. Analizând graficul din fig.2.8, se observă că diferența de temperatură $T_s - T_c$ în prima perioadă de încălzire nu depășește 200°C , în schimb timpul de încălzire s-a majorat la peste 38 ore.

În cazul lingourilor mari din oțel semicalde, zona centrală fiind mai caldă decât suprafața lingourilor, curbele de variație a temperaturilor în timpul încălzirii și a diferenței de temperatură sunt similare cu cele din fig.2.9.

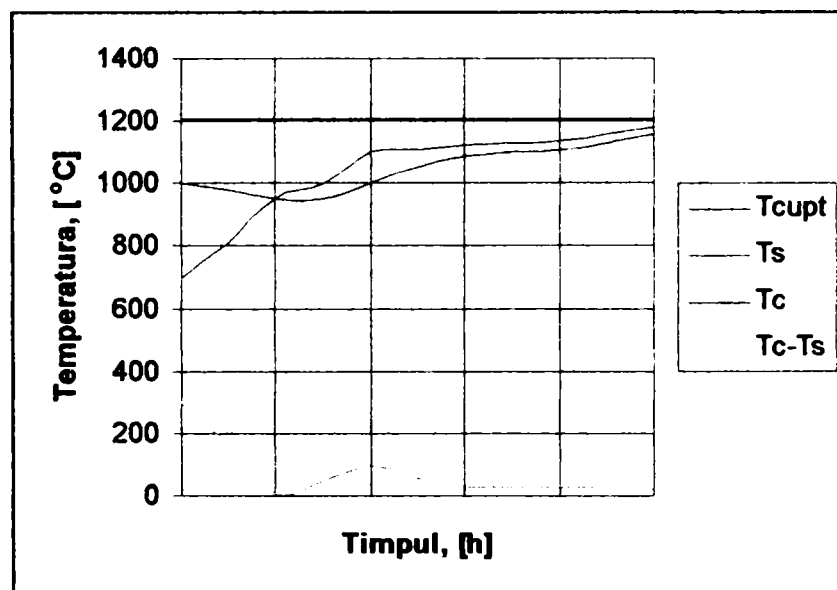


Fig.2.9. Variația temperaturii și a diferenței de temperatură la încălzirea lingourilor mari din oțel semicalde [4]: T_{cupt} – temperatura cuptorului; T_s – temperatura suprafeței;
 T_c – temperatura centrului; $T_c - T_s$ – diferența de temperatură pe secțiunea lingoului.

Se observă că la începutul încălzirii, prin ridicarea temperaturii în zona suprafeței lingoului și coborârea acesteia în zona centrală a acestuia, diferența de

temperatură scade continuu până la anulare. Apoi, prin ridicarea cu viteze inegale a temperaturii în ambele zone, se creează o diferență de temperatură cu semn schimbat și în limite mult mai restrânse. Valorile reduse ale diferenței de temperatură și deplasarea maximum spre temperaturi ridicate, conduc la anularea pericolului de fisurare sau crăpare a lingourilor în timpul încălzirii, indiferent de valoarea vitezei de încălzire și de felul oțelului, inclusiv mărimea lingourilor.

Având în vedere faptul ca în cadrul S.C. Siderugica S.A. Hunedoara se toarnă și se supun prelucrării plastice lingouri cu masa de maxim 23,5 tone, datorită capacităților existente, în urma analizei literaturii de specialitate [16, 19, 21] în fig.2.10 se prezintă graficul de încălzire specific acestor lingouri.

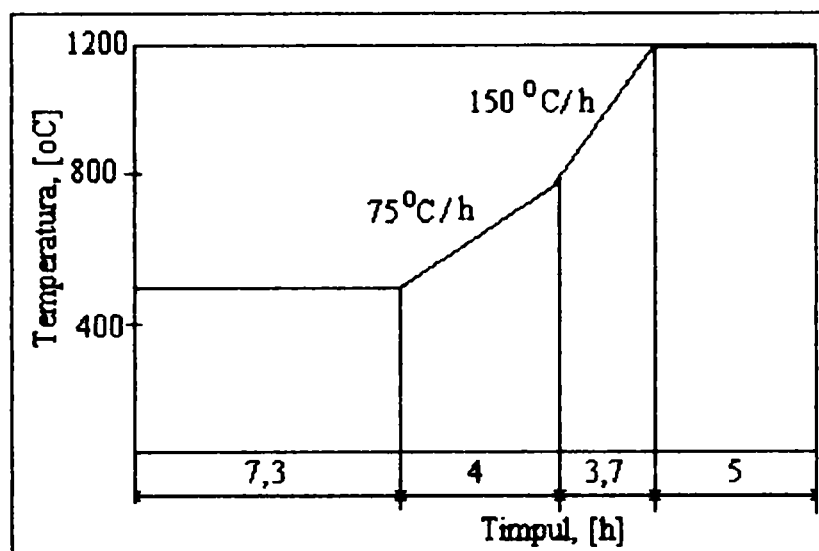


Fig.2.10. Graficul de încălzire cu două trepte de menținere pentru lingourile din oțel, marca OLC 45, cu masa de 23,5t [40].

Analizând diagrama se observă că lingourile se introduc în cuptor la 500°C, se mențin la această temperatură timp de 7,3 ore, după care în intervalul 500-800°C se încălzesc cu o viteză de aproximativ 75°C/h. În intervalul 800-1200° viteza de încălzire se dublează față de perioada precedentă. În continuare lingourile se mai mențin în cuptor încă 5 ore pentru uniformizarea temperaturii, timpul total de încălzire fiind de 20 ore.

Utilizând programul de calcul pentru trasarea diagramelor de încălzire în vederea deformării plastice, pentru toată gama de dimensiuni de lingouri poligonale [37], se prezintă în fig.2.11 diagrama obținută în cazul încălzirii unui lingou din oțel OLC 45, cu masa de 23,5t. Analizând diagrama se observă că în cazul lingourilor de oțel cu masa de 23,5 tone durata totală de încălzire este de 15 ore cu perioada de preîncălzire de 6,5 ore iar în timpul acesteia diferența de temperatură dintre centrul și suprafața lingoului se menține la valoarea maximă de 200°C iar timpul total de încălzire este mai redus. Timpul total de încălzire rezultat din fig.2.11 este mai mic cu 25-35%. Din analiza comparativă a regimurilor de încălzire calculate cu ajutorul programului (fig.2.11) și cu cele prezentate în literatura de specialitate (fig.2.10), rezultă că în general durata totală de încălzire obținută cu programul de calcul este mai mică. Micșorarea duratei de încălzire la regimurile obținute cu programul de calcul, a fost posibilă în principal prin controlarea și menținerea diferenței de

temperatură pe secțiunea lingoului în perioada de preîncălzire la valorile maxim admise. De asemenea, au fost eliminate erorile cauzate de folosirea în calcule a unor valori aproximative pentru o serie de parametri fizico-mecanici care se modifică odată cu creșterea temperaturii (conductibilitatea termică, căldura specifică, etc.). În practica uzinală, însă, timpul de încălzire pentru această mărime de lingou din oțel marca OLC 45 (1C45, conform SR EN 10083-2), este variabil de la caz la caz oscilând între 25 și 35 ore în funcție de parametrii cuptorului de încălzire, diagrama de încălzire respectiv gradul de instruire a personalului.

În fig.2.12 este prezentat regimul de încălzire, obținut cu ajutorul programului [37], pentru lingouri de aceeași mărime dar din oțel aliat.

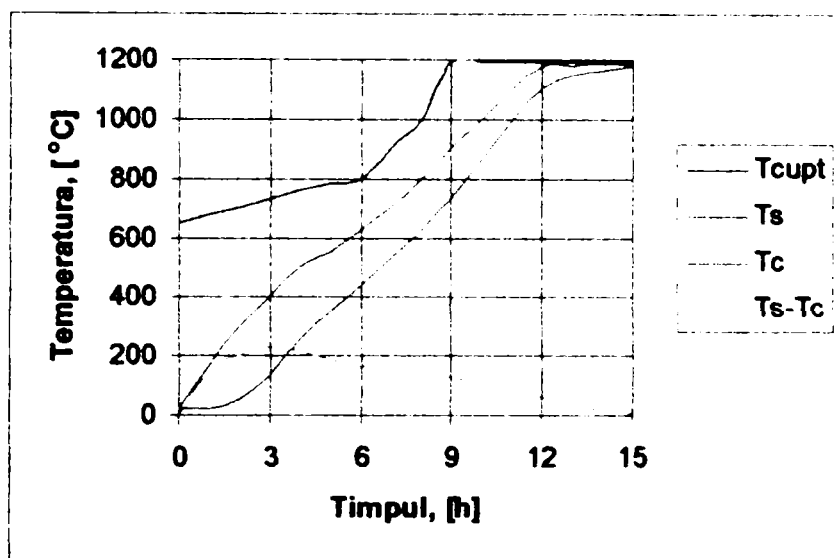


Fig.2.11. Diagrama de încălzire a lingourilor din oțel marca OLC 45, cu masa de 23,5t [37].

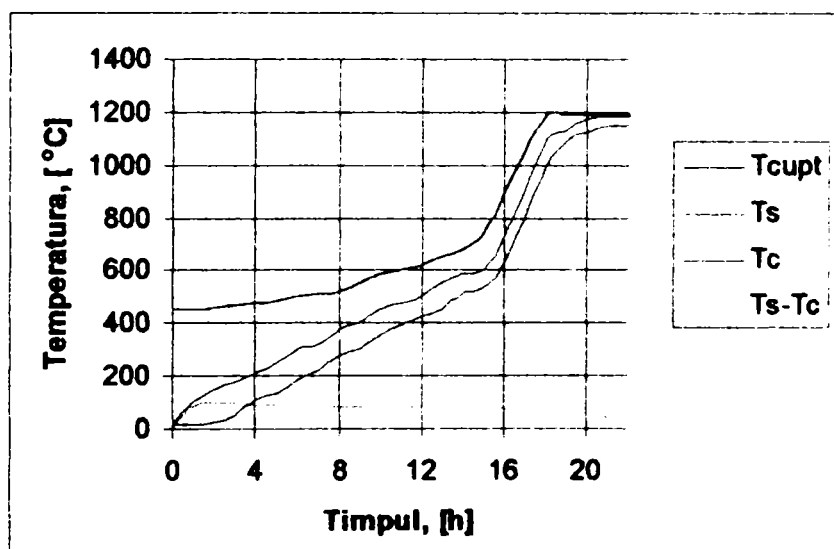


Fig.2.12. Diagrama de încălzire a lingourilor din oțel aliat, cu masa de 23,5 tone [37].

Din diagramă se observă că pentru o diferență de temperatură pe secțiune în timpul preîncălzirii maxim admisă de 100°C , timpul total de încălzire este de 22 ore din care timpul de preîncălzire reprezintă 63%. În comparație cu graficul de încălzire al lingourilor de aceeași mărime din oțel marca OLC 45 (fig.2.11) a rezultat un timp total de încălzire cu 40% mai mare. De asemenea, temperatura cuptorului la încărcare este de 450°C față de aproximativ 650°C pentru oțelul OLC 45.

2.2. Tensiunile termice la încălzire

Tensiunile termice fac parte din factorii care limitează viteza de încălzire sau de răcire precum și fenomenul de distrugere a compactității materialului. În procesul încălzirii (răcirii) pot apare: tensiuni termo-elastice temporare, tensiuni ale stării elasto-plastice a metalului, tensiuni de structură precum și tensiuni remanente de temperatură și de structură. În urmărirea stării de tensiune a lingourilor de oțel se folosesc diferite metode: de calcul (analitice și aproximative), experimentale și metode de modelare fizică și matematică.

Tensiunile interne termice apar atât la răcirea lingourilor după stripare cât și la încălzirea acestora, datorită proprietăților elasto-plastice a oțelului, a mărimii gradientului termic format și a eventualelor transformări structurale ce ar avea loc în acest domeniu termic.

Determinarea tensiunilor care apar în lingouri în condițiile de încălzire $T_{\text{cupt}} = \text{constant}$, au la bază legea lui Hooke [41], fiind exprimată prin expresia legăturii dintre tensiunile termice și deformațiile corespunzătoare pe care le implică, astfel:

$$\sigma = \frac{\beta E}{1-\nu} (T_{\text{cupt}} - T(r,t)) \quad (2.7)$$

unde: β - coeficient de dilatare liniară;

T_{cupt} - temperatura medie a cuptorului;

$T(r,\tau)$ - temperatura corpului în elementul considerat;

E - modulul de elasticitate;

ν - coeficientul lui Poisson.

Pentru un lingou de lungime infinită și raza r ($0 < r < R$), tensiunile termice radiale (σ_{rc}), tangențiale (σ_{tc}) și axiale (σ_{ac}) se determină cu relațiile [41]:

$$\sigma_{rc} = \frac{\beta E}{1-\nu} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr - \frac{1}{r^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr \right) \quad (2.8)$$

$$\sigma_{tc} = \frac{\beta E}{1-\nu} \left(-T + \frac{1}{R^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr - \frac{1}{r^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr \right) \quad (2.9)$$

$$\sigma_{ac} = \frac{\beta E}{1-\nu} \left(\frac{2}{R^2} \int_0^R T \cdot r \cdot dr - t \right) \quad (2.10)$$

În cazul răcirii lingoului solidificat, după stripare, în faza inițială zona periferică a acestuia răcindu-se mai repede decât zona centrală, își micșorează volumul și tinde să comprime zona centrală care este mai caldă și are un volum specific mai mare. Zona periferică va suferi o ușoară deformare plastică până la temperatura de intrare în domeniul elastic, după care, la răcirea în continuare stratul superficial se va tensiona prin întindere (tensiunile vor avea semnul plus). Materialul din zona centrală va suferi o ușoară deformare plastică de compresiune suprapusă peste contracția de răcire a acestuia, iar la traversarea domeniului elastic vor apare tensiuni de comprimare care au semnul minus. După ce în zona periferică temperatura scade până aproape de temperatura mediului ambiant, materialul din această zonă își menține volumul constant și nu se mai deformează, iar materialul din

zona centrală continuă să se răcească, micșorându-și volumul pe măsura răcirii. Prin continuarea micșorării volumului zonei centrale tensiunile de comprimare din această zonă și cele de întindere din zona periferică se reduc continuu până la anulare (fig. 2.13.a).

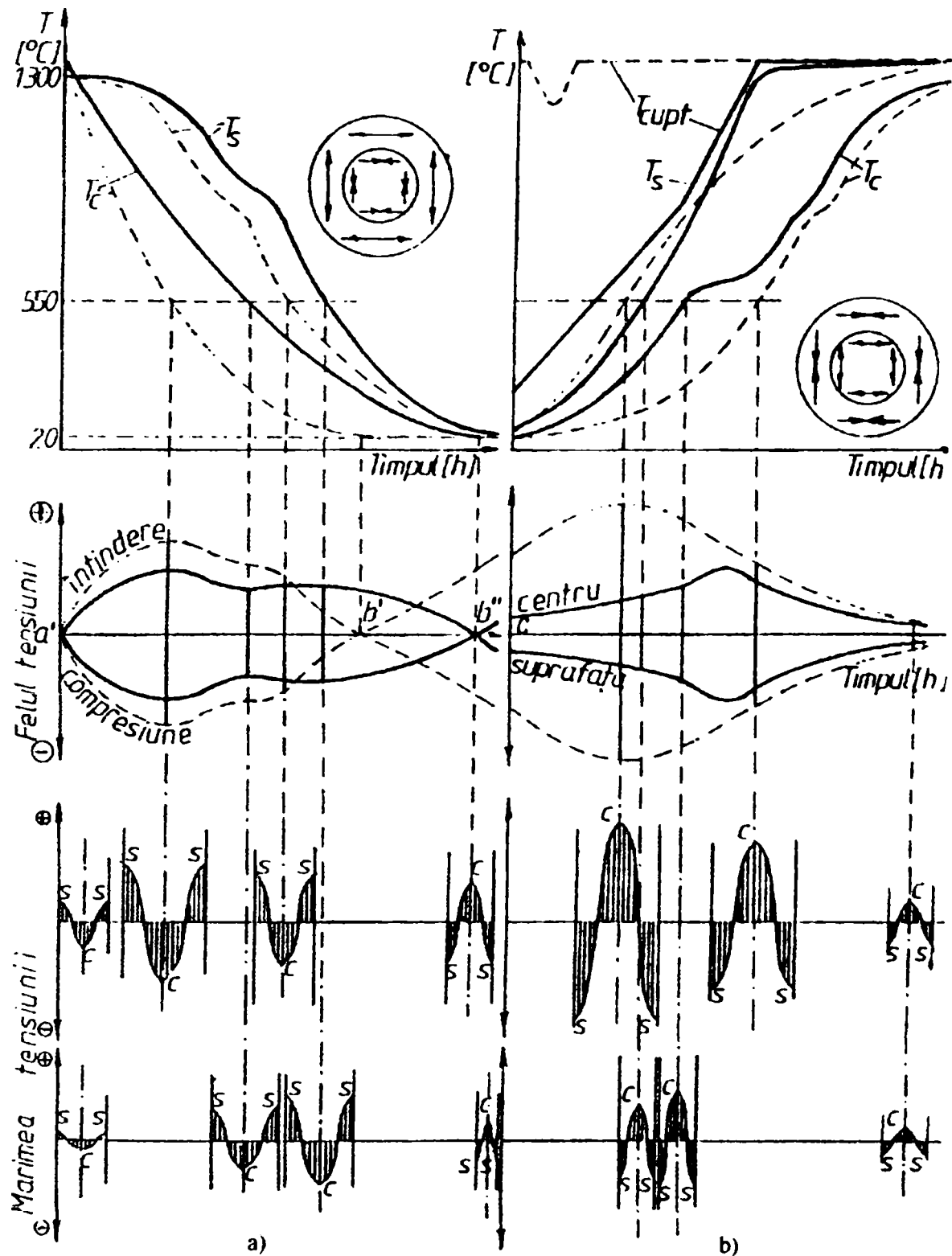


Fig. 2.13. Variația tensiunilor de comprimare și de întindere în lingou [42]:
a - la răcirea lingoului; b - la încălzirea lingoului;
--- răcire (încălzire) rapidă; — răcire (încălzire) lentă.

După anularea tensiunilor în cele două zone, datorită continuării contracției zonei centrale, care nu s-a răcit până la temperatura mediului ambiant, și datorită

nedeformării zonei periferice, se creează tensiuni de întindere în zona axială a semifabricatului (+) și de comprimare (-) la periferia acestuia. Mărimea tensiunilor nou create este direct proporțională cu viteza de răcire, cu grosimea semifabricatului și cu caracteristicile fizice ale oțelului. Este necesar ca viteza de răcire, când temperatura suprafeței este sub 850°C, să fie cât mai mică astfel încât punctul b' să fie cât mai aproape de b".

Tensiunile interne care apar la încălzire, numite tensiuni termice de încălzire, sunt de ordinul I, adică ele cuprind porțiuni mari din material. Urmărind diagrama de încălzire a unui lingou din fig 2.13.b, inițial suprafața se dilată mai mult, dar dilatarea este frânată de miezul rece și rigid. În stratul superficial apare o tensiune de compresiune care se suprapune peste tensiunea remanentă (de răcire), având semnul minus iar în axul lingoului apare o tensiune de întindere (cu semnul plus) suprapusă peste tensiunea remanentă a centrului. Inerția termică a miezului determină apariția unui gradient termic mare care atinge o valoare maximă, după care descrește treptat în perioada de menținere constantă a temperaturii cuptorului. O variație similară vor cunoaște și tensiunile termice, evident cu suprapunerea acestora peste tensiunile remanente. Mărimea lingoului influențează neuniformitatea încălzirii și deci și valoarea tensiunilor termice.

Fisurarea lingourilor din oțel în timpul încălzirii este provocată de tensiunile termice a căror valoare ajunge comparabilă cu limita de rezistență, înainte ca temperatura în centrul lor să depășească limita de elasticitate [41]. Dacă variația temperaturii în masa lingoului se poate determina experimental, tensiunile termice nu pot fi apreciate decât pe cale analitică. Deoarece aplicarea practică a soluțiilor matematice prezintă o formă complicată, datorită faptului că în afară de coordonate și timp, câmpul termic este influențat și de alte mărimi se poate utiliza prezentarea soluțiilor sub aspectul valorilor complexe nedimensionale ale criteriilor și simplexelor (criteriul Fourier $\frac{at}{R^2}$, simplexele $\frac{\alpha R}{\lambda}$ și $\frac{r}{R}$), care permit reducerea numărului de variabile și ușurează aplicarea lor în practică [67]. Pentru obținerea modelului analitic al problemei se recurge la aproximarea geometrică a lingoului real cu un cilindru de lungime infinită, de rază echivalentă $R = \sqrt{\frac{L^2}{\pi}}$ iar încălzirea se realizează axial simetric. Se consideră că lingoul la introducerea în cuptor are temperatura T_0 , iar cuptorul temperatura T_{cupt} . Temperatura la suprafața și în centrul lingoului se calculează la intervale de 0,5 h.

Distribuția temperaturii pe secțiunea lingoului după prima perioadă de încălzire este dată de ecuația [27]:

$$T = T_{cupt} + (T_0 - T_{cupt}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_1(\mu_n)}{\mu_n [I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)]} \cdot I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{R^2}} \quad (2.11)$$

unde: $a = \frac{\lambda}{C_p \cdot \gamma}$ - coeficientul de difuzivitate al temperaturii, m²/s;

t - timpul, h;

α - coeficient de transmitere a căldurii, W/m²°C;

γ - densitatea, kg/m^3 ;

λ - coeficientul de conductibilitate termică, $\text{W/m}^\circ\text{C}$;

R - raza cilindrului, m;

r - distanța de la axa cilindrului, m;

C_p - căldura specifică, $\text{J/kg}^\circ\text{C}$.

Relația (2.11) poate fi transcrisă sub forma simplificată, ținând seama de faptul ca rădăcinile funcției Bessel depind de relația $\frac{\alpha R}{\lambda} = hr$, astfel:

$$\frac{T - T_{\text{cupt}}}{T_0 - T_{\text{cupt}}} = \Phi\left(\frac{at}{R^2}; \frac{\alpha R}{\lambda}; \frac{r}{R}\right) \quad (2.12)$$

Pentru etapele următoare apariția unei diferențe de temperatură, impune modificarea relației (2.11) prin adăugarea termenului care ține seama de distribuția temperaturii pe secțiunea lingoului:

$$T = T_{\text{cupt}} + (T_0 - T_{\text{cupt}}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2I_1(\mu_n)}{\mu_n [I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)]} \cdot I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{R^2}} - \Delta T_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_2(\mu_n)}{\mu_n [I_0^2(\mu_n) + I_1^2(\mu_n)]} \cdot I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right) e^{-\mu_n^2 \frac{at}{R^2}} \quad (2.13)$$

Din aceleași considerente relația 2.13 poate fi transcrisă:

$$T = T_a + (T_0 - T_a)\Phi_n - \Delta T_0 \Phi_{n1} \quad (2.14)$$

cum din calcule rezultă: $\Phi_{n1} = 0,6\Phi_n$, atunci

$$T = T_a + (T_0 - T_a - 0,6\Delta T_0)\Phi_n \quad (2.15)$$

Folosind reprezentarea grafică a funcțiilor Φ_n , cu ajutorul formulelor (2.10) și (2.13) a fost calculată temperatura lingoului pentru $\frac{r}{R} = 1$ și $\frac{r}{R} = 0$.

Se pot determina analitic tensiunile termice axiale care apar în procesul de încălzire până în momentul în care temperatura în centrul lingoului ajunge la 550°C când se consideră că oțelul are deja o plasticitate ridicată și acestea dispar.

Calculul se efectuează pentru trei metode [41]: temperatura cuptorului se modifică în salturi, modificarea liniară a temperaturii suprafeței respectiv încălzirea cu viteze diferite (diagrama reală).

În cazul în care temperatura cuptorului se modifică în salturi, ecuațiile corespunzătoare cu și fără existența unui gradient termic inițial sunt:

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} (T_0 - T_s) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2} \left[2 - \mu_n \frac{I_0\left(\mu_n \frac{r}{R}\right)}{I_1(\mu_n)} \right] e^{-\mu_n^2 \frac{at}{R^2}} \quad (2.16)$$

sau sub forma simplificată:

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} (T_0 - T_s) \cdot \Phi_n\left(\frac{at}{R^2}; \frac{r}{R}\right) \quad (2.16')$$

$$\text{și } \sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} (T_0 - T_s) \cdot f\left(\frac{at}{R^2}; \frac{r}{R}\right) - \Delta T_0 f_1\left(\frac{at}{R^2}; \frac{r}{R}\right) \quad (2.17)$$

Dacă temperatura suprafeței crește liniar:

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{CR^2}{a} \left\{ \frac{1}{8} \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^4} \left[2 - \mu_n \frac{I_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right)}{I_1(\mu_n)} \right] e^{-\mu_n^2 \frac{at}{R^2}} \right\} \quad (2.18)$$

și

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{\beta E}{1-\nu} (cR^2 - 4\Delta T_o) f_z \quad (2.19)$$

În condiții de suprafață schimbătoare (diagrama reală de încălzire):

$$\sigma_z = \frac{\beta E}{1-\nu} \frac{R^2}{a} \left\{ \frac{C_m}{8} \left(1 - 2 \frac{r^2}{R^2} \right) + C_1 f' + [(C_2 - C_1) f'' + (C_3 - C_2) f''' + \dots] \right\} \quad (2.20)$$

unde C_m reprezintă viteza de încălzire în etapa m.

La încălzirea lingourilor reci în cuptoare în vederea deformării plastice ulterioare a acestora, indiferent de viteza de încălzire aplicată, vor apare tensiuni termice a căror valoare va fi proporțională atât cu viteza de încălzire cât și cu dimensiunile lingoului și compoziția chimică a acestuia. Pentru evitarea apariției fisurilor sau crăpăturilor, viteza de încălzire se limitează în intervalul de temperaturi corespunzător stării elastice a metalului (0 - 550°C), la valori care să determine tensiuni sub nivelul rezistenței la rupere a aliajului respectiv, la temperatura considerată a intervalului.

2.3. Optimizarea regimurilor de încălzire a lingourilor mari din oțel

2.3.1. Regimurile de încălzire a lingourilor mari din oțel

Realizarea încălzirii lingourilor de oțel este dependentă de mai mulți factori: temperatura finală de încălzire, viteza de încălzire, densitatea de flux termic la care se adaugă temperatura mediului de încălzire (a cuptorului). Din teoria transferului de căldură [40] se cunoaște faptul că prelucrarea ecuației transferului de căldură este posibilă doar dacă se adoptă anumite condiții la limită (de contur, de ordinul 3). În cazul încălzirii în cuptoarele metalurgice, unul din parametri enumerați mai sus trebuie menținut constant.

Pentru lingourile mari se utilizează regimul de încălzire în două trepte consecutive: $q = ct.$ respectiv $T_{cupt} = ct.$ [37].

Încălzire cu flux termic constant ($q = ct.$)

Varianta se utilizează pentru lingourile mari din oțel, la care există pericolul fisurării din cauza tensiunilor termice care pot depăși valorile admisibile. Evoluția parametrilor încălzirii cu $q = constant$ este prezentată în fig.2.14, din care se observă o creștere aproape liniară a temperaturilor caracteristice (T_{cupt} , T_s , T_c) și o valoare constantă pentru diferența de temperatură $T_s - T_c$, exceptându-se prima perioadă până când încălzirea intră în regim stabilizat. În general acest regim de încălzire se aplică oțelurilor numai în prima perioadă a încălzirii (până la 700-800°C), după care se trece la regim de încălzire cu temperatura cuptorului constantă.

Încălzire la temperatura cuptorului constantă ($T_{cupt} = ct.$)

Acest regim se aplică în cazul încălzirii în cuptoarele cu combustibil, lingourilor mari din oțel după ce s-a depășit pericolul fisurării din cauza tensiunilor termice. Evoluția parametrilor de încălzire este prezentată în fig.2.15.

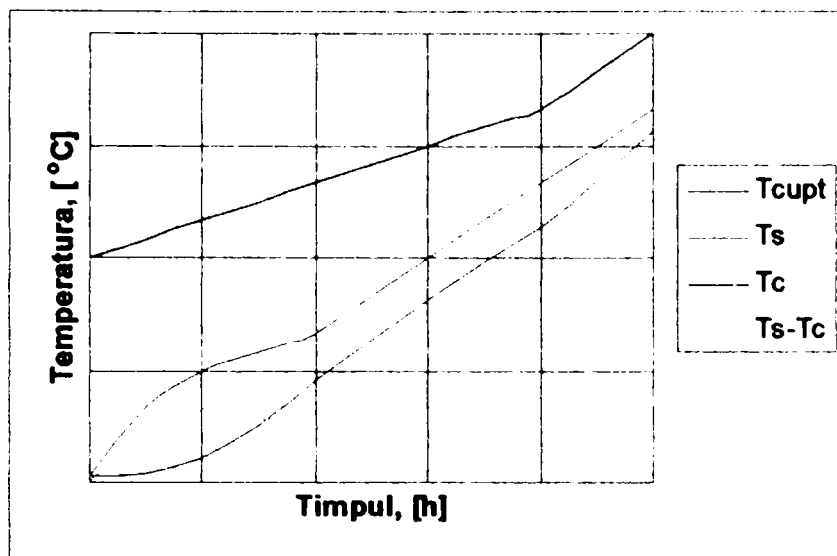


Fig.2.14. Evoluția parametrilor încălzirii cu flux termic constant [37]:

T_{cupt} – temperatura cuptorului; T_s – temperatura suprafeței;
T_c – temperatura centrului; T_s – T_c – diferența de temperatură pe secțiunea lingourilor.

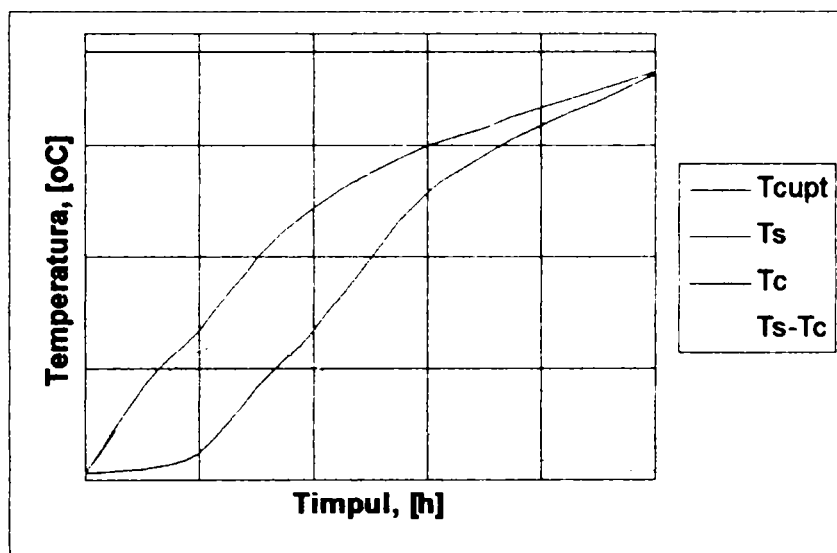


Fig.2.15. Evoluția parametrilor încălzirii la temperatura cuptorului constantă [37]:

T_{cupt} – temperatura cuptorului; T_s – temperatura suprafeței;
T_c – temperatura centrului; T_s – T_c – diferența de temperatură pe secțiunea lingourilor.

2.3.2. Rezolvarea numerică a ecuației conducției termice prin metoda diferențelor finite

Cazul regimului staționar

Pentru a puncta toate problemele caracteristice care apar, considerăm cazul unei ecuații care descrie conducția termică bidimensională, în regim staționar (permanent), în prezența surselor de căldură, printr-un mediu omogen și izotrop [43, 44]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{q_v}{\lambda} = 0 \quad (2.21)$$

Această ecuație este valabilă în toate punctele interioare unui domeniu bidimensional A. Pentru integrarea ei se cer adăugarea condițiilor la limită care sunt de timp și spațiale. Cum regimul studiat este unul staționar, condițiile la limită de

timp (condiții inițiale) nu există, iar cele la limită spațiale stabilesc parametrii schimbului de căldură pe frontiera Γ a domeniului de analiză. Acestea pot fi de mai multe tipuri [74]:

a) impunerea unei temperaturi pe o zonă de frontieră Γ_T :

$$T = g(x, y), \quad \forall M(x, y) \in \Gamma_T \quad (2.22)$$

b) impunerea unui anumit flux de căldură schimbat cu mediului ambiant pe porțiunea de frontieră Γ_q :

$$\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{q}{\lambda} = 0, \quad \forall N(x, y) \in \Gamma_q \quad (2.23)$$

unde n_x, n_y, n_z sunt cosinusurile directoare ale normalei la suprafața Γ_q .

c) impunerea coeficientului de convecție α dintre peretele solid și un fluid (având temperatura T_α) care spală frontiera Γ_α a domeniului de analiză și preia un anumit flux de căldură prin convecție:

$$\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot (T - T_\alpha) = 0, \quad \forall P(x, y) \in \Gamma_\alpha \quad (2.24)$$

unde n_x, n_y, n_z sunt cosinusurile directoare ale normalei la suprafața Γ_α .

Porțiunile de frontieră Γ_T, Γ_q și Γ_α sunt disjuncte, iar $\Gamma_T \cup \Gamma_q \cup \Gamma_\alpha = \Gamma$

Formulele cu diferențe finite permit aproximarea derivatelor parțiale de ordinul doi din ecuația (2.21) și a ecuațiilor diferențiale de ordinul întâi din ecuațiile (2.23) și (2.24). Astfel, prin particularizarea formulelor cu diferențe finite pentru o rețea de discretizare cu pas constant: $\Delta x = \Delta y = h$ și notând cu $T(x, y)$ funcția necunoscută, ecuația (2.21) se poate scrie în toate nodurile (i, j) interioare ale domeniului, plasate la distanță egală de nodurile vecine $(i-1, j), (i+1, j), (i, j-1), (i, j+1)$:

$$T_{i+1,j} + T_{i-1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 4T_{i,j} + \frac{q_v \cdot h^2}{\lambda} = 0 \quad (2.25)$$

Nodurile plasate în imediata vecinătate a frontierei la o distanță mai mică decât h de aceasta, cel puțin pe una din direcții se pot descrie printr-o ecuație identică ca formă cu (2.21), dar având coeficienții temperaturilor nodale funcție de raportul dintre distanța de la nodul (i, j) la frontieră și pasul rețelei h .

Implementarea condițiilor la limită [20]:

a) *Frontiera* Γ_T . Punctele de pe această frontieră nu presupun o tratare specială. Temperatura fiind cunoscută în aceste puncte, condiția la limită va fi luată în considerare printr-o ecuație de tipul (2.25) scrisă în vecinătatea frontierei Γ_T . Astfel, dacă punctul $(i-1, j)$ este plasat pe frontieră, atunci este îndeplinită condiția:

$$T_{i-1,j} = g(x_{i-1}, y_j) \quad (2.26)$$

atunci ecuația (2.25) se va scrie:

$$\begin{aligned} T_{i+1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 4T_{i,j} + \left(\frac{q_v \cdot h^2}{\lambda} + T_{i-1,j} \right) &= \\ = T_{i+1,j} + T_{i,j+1} + T_{i,j-1} - 4T_{i,j} + \left(\frac{q_v \cdot h^2}{\lambda} + g(x_{i-1}, y_j) \right) &= 0 \end{aligned} \quad (2.27)$$

și va avea ca necunoscute numai temperaturile $T_{i+1,j}, T_{i,j+1}, T_{i,j-1}$.

b) *Frontiera* Γ_q . Punctele de pe această porțiune de frontieră se tratează în funcție de poziția frontierei față de domeniu. Astfel, dacă domeniul se află la dreapta de curba Γ_q , derivatele de ordinul întâi se vor aproxima cu diferențe "ascendente", iar ecuațiile (în punctele $N(x,y) \in \Gamma_q$) se vor scrie:

$$T_{i,j+1} - 2 \cdot T_{i,j} + T_{i+1,j} + \frac{q \cdot h}{\lambda} = 0 \quad (2.28)$$

S-a considerat și în acest caz: $\Delta x = \Delta y = h$.

c) *Frontiera* Γ_α . Caracteristică acestei zone este schimbul de căldură prin convecție dintre corpul analizat și un fluid în mișcare. Se cunoaște coeficientul de convecție α și temperatura T_α a fluidului exterior. Scrierea ecuațiilor se face ca în cazul frontierei Γ_q . Astfel, dacă se pot scrie diferențe ascendente, în punctele $P(x,y) \in \Gamma_\alpha$ atunci se va obține:

$$T_{i+1,j} - 2 \cdot T_{i,j} + T_{i,j+1} + \frac{\alpha \cdot h}{\lambda} \cdot (T_{i,j} - T_\alpha) = 0 \quad (2.29)$$

Trebuie reținut că relațiile (2.52) - (2.59) se pot aplica după o atentă examinare a nodurilor rețelei de discretizare. În funcție de poziția punctului pe porțiunile de frontieră Γ_q respectiv Γ_α , derivatele parțiale se pot aproxima cu diferențe ascendente sau descendente. Este posibil ca una din derivate să trebuiască exprimată cu diferențe ascendente, iar cealaltă cu descendente. De exemplu, dacă în ecuația (2.24) derivata parțială $\frac{\partial T}{\partial y}$ nu poate fi exprimată decât prin diferențe descendente, atunci (2.29)

devine:

$$\begin{aligned} (T_{i+1,j} - T_{i,j}) + (T_{i,j} - T_{i,j-1}) + \frac{\alpha \cdot h}{\lambda} \cdot (T_{i,j} - T_\alpha) &= 0 \quad \text{sau} \\ T_{i+1,j} - T_{i,j-1} + \frac{\alpha \cdot h}{\lambda} (T_{i,j} - T_\alpha) &= 0 \end{aligned} \quad (2.30)$$

Gruparea ecuațiilor conduce la un sistem algebric de forma:

$$\begin{aligned} a_{11}T_1 + a_{12}T_2 + a_{13}T_3 + \dots + a_{1n}T_n &= C_1 \\ a_{21}T_1 + a_{22}T_2 + a_{23}T_3 + \dots + a_{2n}T_n &= C_2 \\ a_{31}T_1 + a_{32}T_2 + a_{33}T_3 + \dots + a_{3n}T_n &= C_3 \\ \dots & \\ a_{n1}T_1 + a_{n2}T_2 + a_{n3}T_3 + \dots + a_{nn}T_n &= C_n \end{aligned} \quad (2.31)$$

care se scrie matricial:

$$[A]\{T\} = \{C\} \quad (2.32)$$

unde $\{T\}$ este vectorul temperaturilor nodale, $\{C\}$ este vectorul termenilor liberi, iar $[A]$ matricea sistemului.

Rezolvarea acestui sistem se realizează prin metode speciale. Inversarea matricei nu se poate face, de obicei, datorită ordinului mare al acesteia. Ținând seama că matricea $[A]$ este o matrice bandă, se folosesc algoritmi specifici care permit memorarea doar a elementelor nenule (pe lățimea benzii) sau aplicarea unor tehnici de eliminare sau iterative adaptate.

Cazul regimului nestaționar

Ecuția diferențială a conductiei termice bidimensionale, în regim nestaționar, fără surse interne de căldură, printr-un mediu omogen și izotrop, are forma [20]:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (2.33)$$

Presupunerea că nu există surse interne de căldură se exprimă matematic prin relația: $q_v = 0$. Pentru aproximarea derivatei parțiale în raport cu timpul, se poate folosi relația:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \cong \frac{1}{\Delta t} \cdot (T_{i,j}^{p+1} - T_{i,j}^p) \quad (2.34)$$

Dacă se ține seama de expresiile stabilite pentru aproximarea derivatelor parțiale de ordinul doi se obține următoarea ecuație:

$$T_{i,j}^{p+1} = \frac{a \cdot \Delta t}{h^2} \cdot (T_{i+1,j}^p + T_{i-1,j}^p + T_{i,j+1}^p + T_{i,j-1}^p) + \left(1 - \frac{4 \cdot a \cdot \Delta t}{h^2}\right) \cdot T_{i,j}^p \quad (2.35)$$

În (2.35) s-a considerat $\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$. Indicele superior p măsoară pașii de timp.

În cazul unidirecțional ultima ecuație devine:

$$T_i^{p+1} = \frac{a \cdot \Delta t}{h^2} \cdot (T_{i+1}^p + T_{i-1}^p) + \left(1 - \frac{2 \cdot a \cdot \Delta t}{h^2}\right) \cdot T_i^p \quad (2.36)$$

Dacă notăm cu $M = \frac{h^2}{a \cdot \Delta t}$, se constată:

- alegerea pașilor de discretizare h și Δt nu se poate face arbitrar deoarece natura fizică a fenomenului impune $M \geq 2$ pentru cazul unidimensional, respectiv $M \geq 4$ pentru cazul bidimensional.

- alegerea valorilor particulare $M = 2$ pentru cazul unidimensional și respectiv $M = 4$ pentru cazul bidimensional simplifică substanțial efectuarea calculelor.

De remarcat că, în cazul punctelor de frontieră, trebuie analizate condițiile la limită, ca în cazul staționar și identificată situația concretă a fiecărui punct.

Astfel, pentru un punct plasat pe porțiunea de frontieră pe care corpul schimbă căldură prin convecție, se obține, pentru cazul bidimensional:

$$T_{i,j}^{p+1} = \frac{a \Delta t}{h^2} \left[2 \frac{\alpha h}{\lambda} T_\alpha + 2T_{i-1,j}^p + T_{i,j+1}^p + T_{i,j-1}^p + \left(\frac{h^2}{a \Delta t} - 2 \frac{\alpha h}{\lambda} - 4 \right) T_{i,j}^p \right] \quad (2.37)$$

și respectiv, pentru cazul unidimensional:

$$T_i^{p+1} = \frac{a \Delta t}{h^2} \left[2 \frac{\alpha h}{\lambda} T_\alpha + 2T_{i-1}^p + \left(\frac{h^2}{a \Delta t} - 2 \frac{\alpha h}{\lambda} - 2 \right) T_i^p \right] \quad (2.38)$$

cu restricțiile: $\frac{h^2}{a \Delta t} \geq 2 \left(\frac{\alpha h}{\lambda} + 1 \right)$ pentru sisteme unidimensionale;

$\frac{h^2}{a \Delta t} \geq 2 \left(\frac{\alpha h}{\lambda} + 2 \right)$ pentru sisteme bidimensionale.

2.3.3. Contribuții privind distribuția câmpului de temperatură în lingouri prin metoda diferențelor finite

Modelarea matematică a fenomenului de încălzire a lingourilor mari din oțel se bazează pe reprezentarea matematică a acestui fenomen. Soluția acestei probleme este de fapt soluționarea ecuației transmiterii căldurii în regim nestaționar (2.21). Pentru a defini transmiterea de căldură în lingou este necesară cunoașterea condițiilor inițiale, distribuția temperaturii și conținutul de căldură al lingoului în momentul introducerii în cuptor, legea de variație a fluxului de căldură, caracteristicile termotehnice ale cuptorului.

a) *Modelul unidimensional a distribuției temperaturii în lingourile mari de oțel*

Dintre metodele analitice de rezolvare a câmpului termic dintr-un lingou supus procesului de încălzire într-un cuptor se numără și metoda sumelor de siruri infinite ce utilizează funcțiile Bessel-Fourier în care se adoptă un anumit număr de termeni ai sumei [47]. În continuare se prezintă o metodă analitică de determinare a distribuției temperaturii în lingourile din oțel cu masa de 23,5 tone. În vederea realizării modelării unidimensionale se consideră un lingou de lungime și lățime infinită, cu latura $2b$, cu coeficientul a de conductibilitate a temperaturii, care posedă la momentul inițial o repartiție simetrică a temperaturii funcție de x . La ambele suprafețe ale lingoului temperatura variază identic în timp.

Ecuția care descrie distribuția temperaturii în lingou este:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.39)$$

$$\text{cu condiția inițială } T_{t=0} = F(x) \quad (2.40)$$

$$\text{și condițiile la suprafață } T_{x=\pm b} = \varphi(t) \quad (2.41)$$

$$\text{Efectuăm schimbarea de funcție } T(x, t) = \varphi(t) + u(x, t) \quad (2.42)$$

$$\text{Deoarece } \frac{\partial T}{\partial t} = \varphi'(t) + \frac{\partial u}{\partial t} \quad \text{și} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad \text{ecuația (2.39) devine} \quad \frac{\partial u}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \varphi'(t)$$

$$\text{cu condiția inițială } u(x, 0) = F(x) - \varphi(0) \quad (2.43)$$

$$\text{și condițiile la limită } u(x, t)_{x=\pm b} = 0. \quad (2.44)$$

Căutăm soluția ecuației (2.42) în forma

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i(t) \cos \delta_i \frac{x}{b} \quad (2.45)$$

$$\text{unde } \delta_i = (2i - 1) \frac{\pi}{2} \quad (2.46)$$

Funcția u de această formă satisface condițiile la limită (2.44).

Funcțiile $A_i(t)$ le vom determina înlocuind expresia lui (x, t) în ecuația (2.39).

În vederea unei posibile identificări, vom dezvolta funcția $-\varphi'(t)$ în serie

Fourier:

$$-\varphi'(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \cos \delta_i \frac{x}{b} \quad (2.47)$$

$$\text{unde: } \alpha_i = \frac{\int_{-b}^b [-\varphi'(t)] \cos \delta_i \frac{x}{b} dx}{\int_{-b}^b \cos^2 \delta_i \frac{x}{b} dx}$$

Deoarece

$$\begin{aligned} \int_{-b}^b [-\varphi'(t)] \cos \delta_i \frac{x}{b} dx &= -\varphi'(t) \frac{b}{\delta_i} \int_{-b}^b \cos \delta_i \frac{x}{b} d(\delta_i \frac{x}{b}) = -\frac{b}{\delta_i} \varphi'(t) \sin(\delta_i \frac{x}{b}) \Big|_{-b}^b = \\ &= \frac{b}{\delta_i} \varphi'(t) 2 \sin \delta_i = -2 \frac{b}{\delta_i} (-1)^{i+1} \varphi'(t) = 2 \frac{b}{\delta_i} (-1)^i \varphi'(t) \end{aligned}$$

$$\text{și respectiv } \int_{-b}^b \cos^2 \delta_i \frac{x}{b} dx = \frac{1}{2} \int_{-b}^b \left[1 + \cos 2\delta_i \frac{x}{b} \right] dx = \frac{1}{2} \cdot 2b = b$$

$$\text{de unde rezultă } \alpha_i = \frac{1}{\delta_i} 2(-1)^i \varphi'(t) \tag{2.48}$$

Înlocuind expresia lui u dată de (2.45) și expresia lui $-\varphi'(t)$ dată de (2.47) cu α_i determinați de (2.48) în (2.42) rezultă

$$\sum_{i=1}^{\infty} A_i(t) \cos \delta_i \frac{x}{b} = -\frac{a}{b^2} \sum_{i=1}^{\infty} A_i(t) \delta_i^2 \cos \delta_i \frac{x}{b} + \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \cos \delta_i \frac{x}{b}$$

$$\text{adică } A_i'(t) + \frac{a}{b^2} \delta_i^2 A_i(t) = \alpha_i$$

Ecuția omogenă atașată $A_i'(t) + \frac{a}{b^2} \delta_i^2 A_i(t) = 0$ admite soluția generală

$$A_i(t) = C_i e^{-\frac{a\delta_i^2 t}{b^2}}$$

Aplicând variația de constantă, rezultă pentru $C(t)$ expresia

$$C_i(t) = \int_0^t \alpha_i e^{\frac{a\delta_i^2 t}{b^2}} dt + K_i$$

$$A_i(t) = K_i e^{-\frac{a\delta_i^2 t}{b^2}} + e^{-\frac{a\delta_i^2 t}{b^2}} \cdot \int_0^t \alpha_i \cdot e^{\frac{a\delta_i^2 t}{b^2}} dt$$

(2.49)

Constanta K_i se determină din condiția inițială (2.43),

$$F(x) - \varphi(0) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i(0) \cos \delta_i \frac{x}{b}, \text{ adică } F(x) - \varphi(0) = \sum_{i=1}^{\infty} K_i \cos \delta_i \frac{x}{b}$$

$$\text{unde: } K_i = \frac{\int_{-b}^b [F(x) - \varphi(0)] \cos \delta_i \frac{x}{b} dx}{\int_{-b}^b \cos^2 \delta_i \frac{x}{b} dx}$$

$$\text{sau } K_i = \frac{1}{b} \int_{-b}^b [F(x) - \varphi(0)] \cos \delta_i \frac{x}{b} dx \tag{2.50}$$

Substituind (2.133) și (2.48) în (2.49) rezultă:

$$A_i(t) = \frac{1}{b} \cdot e^{-a\delta_i^2 \frac{t}{b^2}} \int_{-b}^b [F(x) - \varphi(0)] \cos \delta_i \frac{x}{b} dx + (-1)^i \frac{2}{\delta_i} e^{-a\delta_i^2 \frac{t}{b^2}} \int_0^t \varphi'(\tau) e^{a\delta_i^2 \frac{\tau}{b^2}} d\tau$$

Înlocuind $A_i(t)$ în (2.45) rezultă

$$u(x,t) = \frac{1}{b} \sum_{i=1}^{\infty} \cos \delta_i \frac{x}{b} e^{-a\delta_i^2 \frac{t}{b^2}} \int_{-b}^b [F(x) - \varphi(0)] \cos \delta_i \frac{x}{b} dx + \\ + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^i}{\delta_i} \cos \delta_i \frac{x}{b} \cdot e^{-a\delta_i^2 \frac{t}{b^2}} \int_0^t \varphi'(\tau) \cdot e^{a\delta_i^2 \frac{\tau}{b^2}} d\tau$$

expresie care înlocuită în (2.42), determină distribuția temperaturii în lingoul considerat

$$T(x,t) = \varphi(t) + \frac{1}{b} \sum_{i=1}^{\infty} \cos \delta_i \frac{x}{b} e^{-a\delta_i^2 \frac{t}{b^2}} \int_{-b}^b [F(x) - \varphi(0)] \cos \delta_i \frac{x}{b} dx + \\ + 2 \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^i}{\delta_i} \cos \delta_i \frac{x}{b} \cdot e^{-a\delta_i^2 \frac{t}{b^2}} \int_0^t \varphi'(\tau) \cdot e^{a\delta_i^2 \frac{\tau}{b^2}} d\tau \quad (2.51)$$

În cazul particular în care $\varphi(t) = T_s = const.$ și $F(x) = T_c = const.$, expresia anterioară primește forma:

$$T(x,t) = T_s + 2(T_c - T_s) \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\delta_i} \sin \delta_i \cdot \cos(\delta_i \frac{x}{b}) \cdot e^{-a\delta_i^2 \frac{t}{b^2}} \quad (2.51)$$

Utilizând formula obținută, în urma prelucrării în programul de calcul MATLAB, a rezultat distribuția simplificată unidimensională a temperaturii în timp (fig.2.16), programul utilizat fiind prezentat în anexa 2.1.

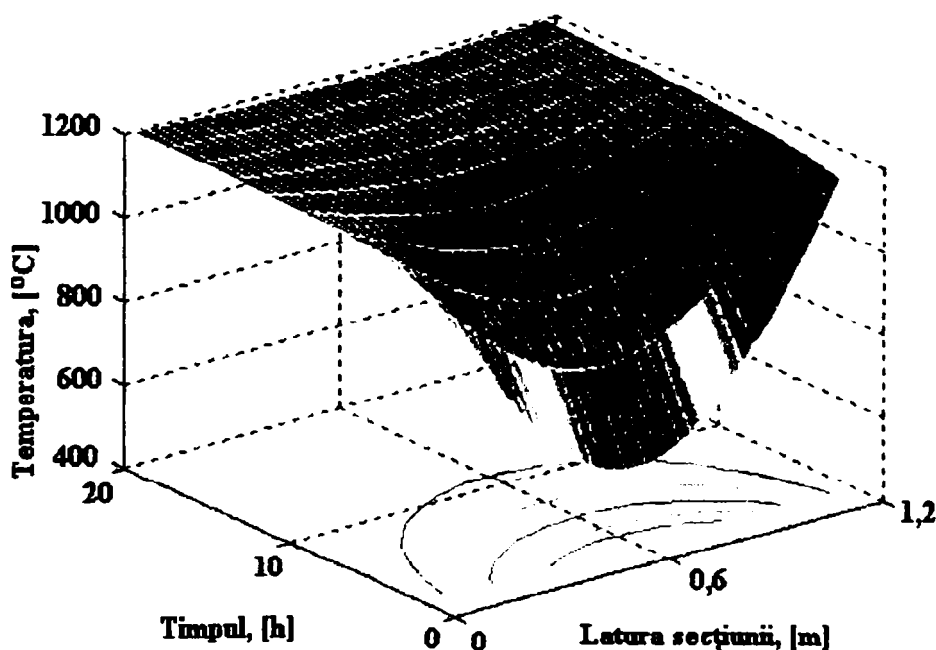


Fig.2.16. Distribuția temperaturii în funcție de timp [47].

În cazul modelării unidimensionale a distribuției temperaturii în lingouri utilizând ecuațiile și diagrama rezultată se poate determina valoarea temperaturii în orice moment al încălzirii și în orice punct al laturii secțiunii.

b) Modelul bidimensional a distribuției temperaturii în lingourile mari de oțel

În vederea realizării modelării matematice bidimensionale a distribuției temperaturii pe secțiunea lingourilor, cu masa de 23,5 tone, se consideră o secțiune a acestora care se împarte cu ajutorul unei rețele de discretizare (fig.2.17). Sistemul de axe va avea originea în centrul lingoului. Pentru a implementa un algoritm care să urmeze modelul descris în subcapitolul 2.4.3 avem nevoie de următoarele date inițiale: temperatura ambiantă, temperatura de deformare plastică, dimensiunile lingoului, numărul nodurilor din lingou după cele două axe, valorile conductibilității termice, căldurii specifice respectiv a densității a oțelului, condiția de oprire a desfășurării algoritmului (aceasta poate fi oprire manuală, după un anumit timp sau la o temperatură maximă) [48].

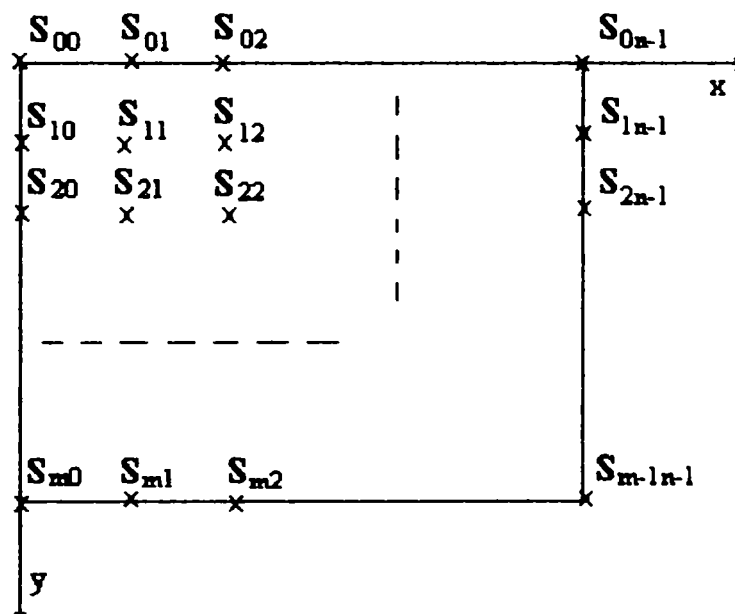


Fig.2.17. Schema rețelei utilizate la aplicarea metodei diferențelor finite.

Conductibilitatea termică a oțelului este dată în literatură sub formă de tabele. Aceasta depinde de compoziția chimică a oțelului și de temperatură. Reprezentând grafic o astfel de dependență (fig.2.18), se observă că ea poate fi aproximată foarte bine printr-o funcție pe două intervale: un arc de parabolă până la o temperatură $T_{cr} = 768^{\circ}\text{C}$ și o valoare constantă peste această temperatură. Parabola este un polinom de regresie de ordinul 2.

Funcția are forma:

$$\lambda(T) = 2 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,0325 \cdot T + 52,857 \quad R^2 = 0,960 \quad (2.52)$$

Analizând variația conductivității termice cu temperatura se poate desprinde concluzia că în timpul încălzirii în domeniul $20\text{-}800^{\circ}\text{C}$ cu aceeași viteză de încălzire, pentru lingourile nealiante din clasa oțelului OLC 45, diferența de temperatură pe secțiunea lingoului este mai mică la începutul încălzirii și se mărește odată cu creșterea temperaturii peste 800°C din cauza scăderii valorii conductivității termice, deci diferența maximă de temperatură apare spre sfârșitul intervalului de încălzire.

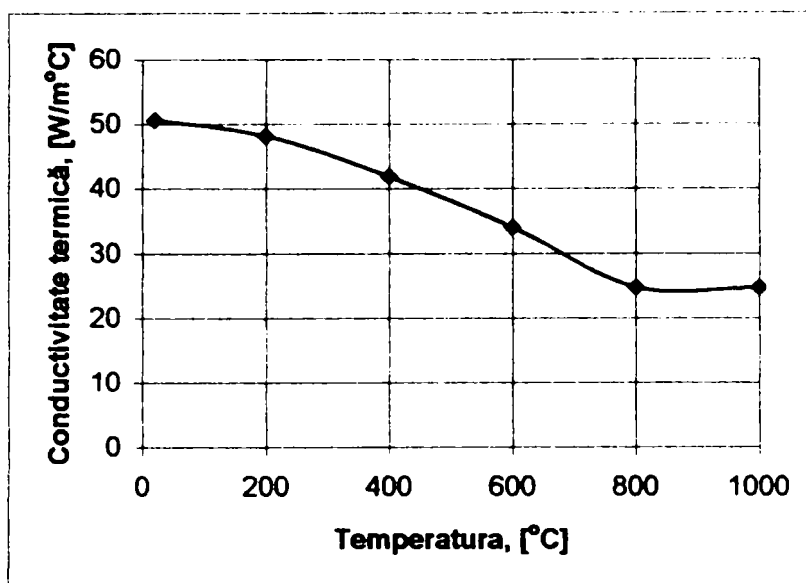


Fig.2.18. Variația conductivității termice în funcție de temperatură.

Programul de calcul este realizat în MATLAB și este prezentat în anexa 2.2. Pentru variațiile obținute s-au folosit caracteristicile mărcii de oțel OLC 45, și anume: densitatea 7800kg/m^3 , conductivitatea termică $29,5\text{W/m}^\circ\text{C}$, căldura specifică $465\text{J/kg}^\circ\text{C}$. Datele ambientale folosite: temperatura mediului ambiant 20°C respectiv temperatura de deformare plastică 1200°C . Oprirea simulării are loc atunci când temperatura centrului lingoului este de 1185°C . Acest tip de lingou, cu masa de $23,5\text{t}$ este cu secțiune pătrată de latură 1200mm și înălțime 2100mm . Lingoul este considerat inițial rece (temperatura ambiantă).

În fig.2.19 este prezentată distribuția temperaturii pe secțiunea lingoului după 3 ore de la începutul încălzirii.

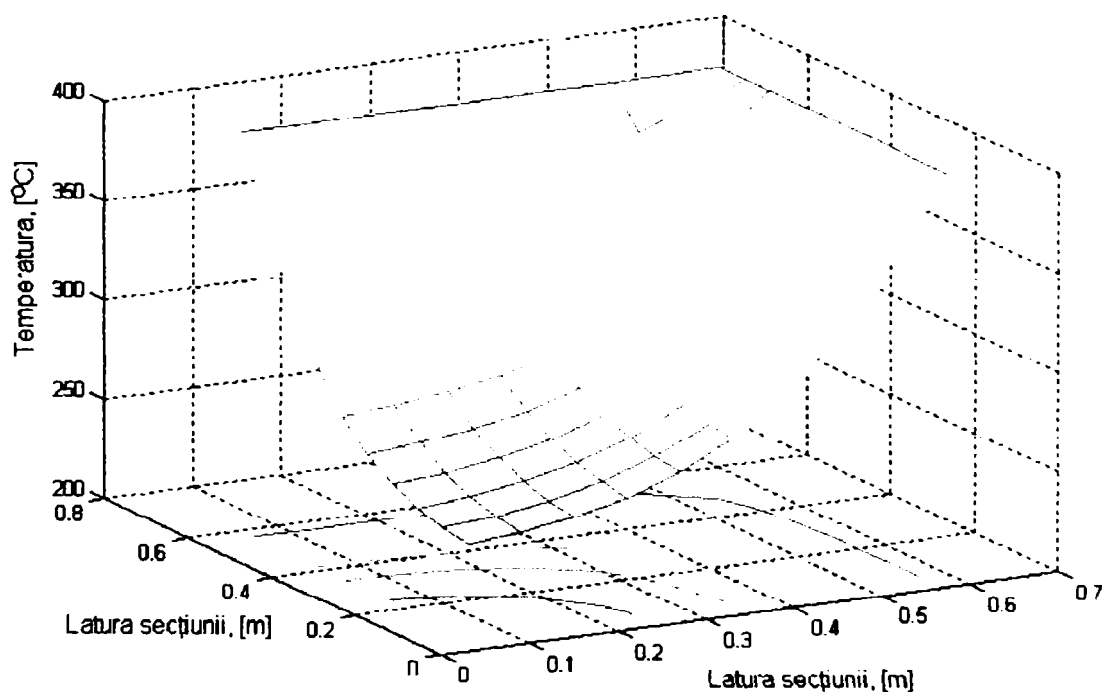


Fig.2.19. Distribuția temperaturii în secțiunea lingoului de 23,5 tone la 3 ore de la începutul încălzirii.

Din analiza diagramei se observă că după trei ore de la începutul încălzirii temperatura centrului lingoului este aproximativ 250°C iar temperatura suprafeței ajunge la 400°C . Diferența de temperatură pe secțiunea lingoului este sub 200°C , această diferență de temperatură pe secțiune se obține și în condiții industriale.

În fig.2.20 este prezentată distribuția temperaturii pe secțiunea lingoului după 6 ore de la începutul încălzirii, respectiv în fig.2.21 este prezentată distribuția temperaturii pe secțiunea lingoului după 9 ore de la începutul încălzirii.

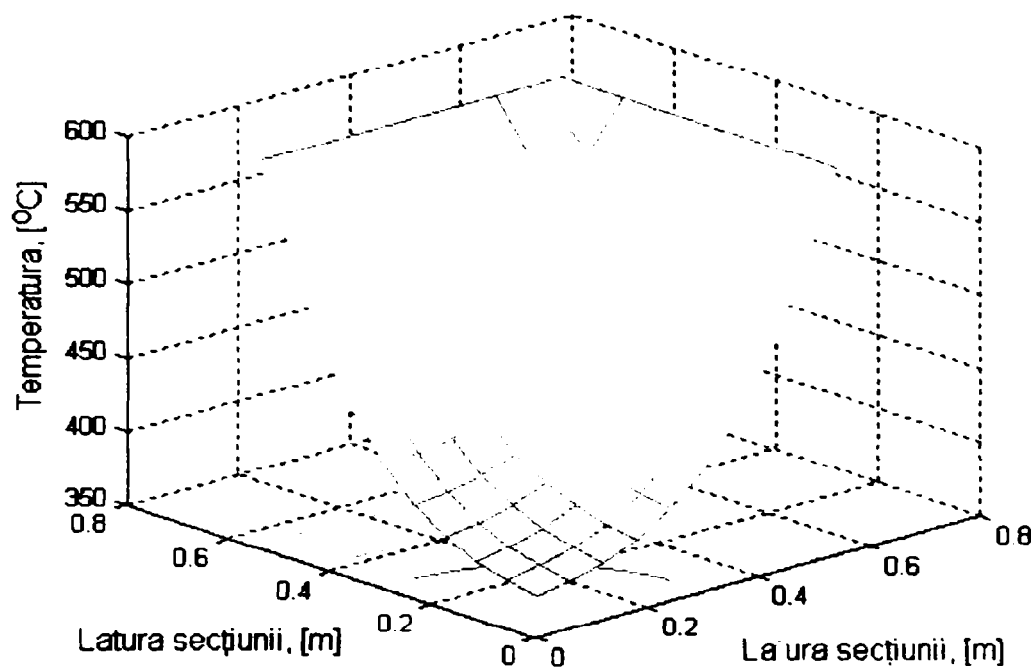


Fig.2.20. Distribuția temperaturii în secțiunea lingoului de 23,5 tone la 6 ore de la începutul încălzirii.

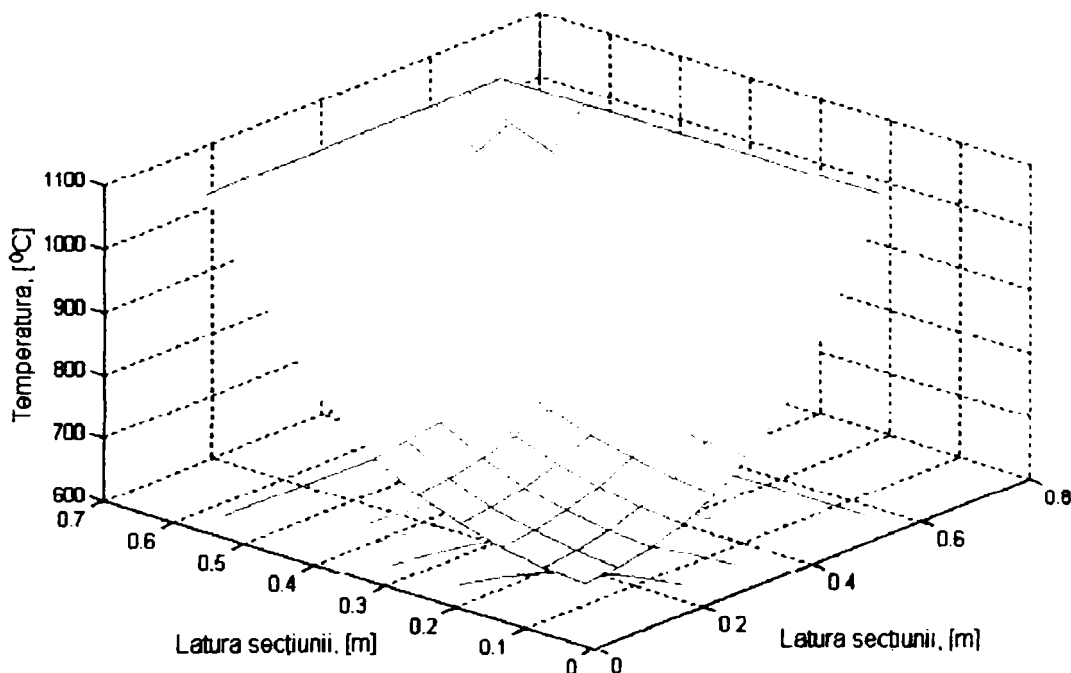


Fig.2.21. Distribuția temperaturii în secțiunea lingoului de 23,5 tone la 9 ore de la începutul încălzirii.

În fig.2.22 este prezentată distribuția temperaturii pe secțiunea lingoului după 12 ore respectiv în fig.2.23 după 20 ore de la începutul încălzirii.

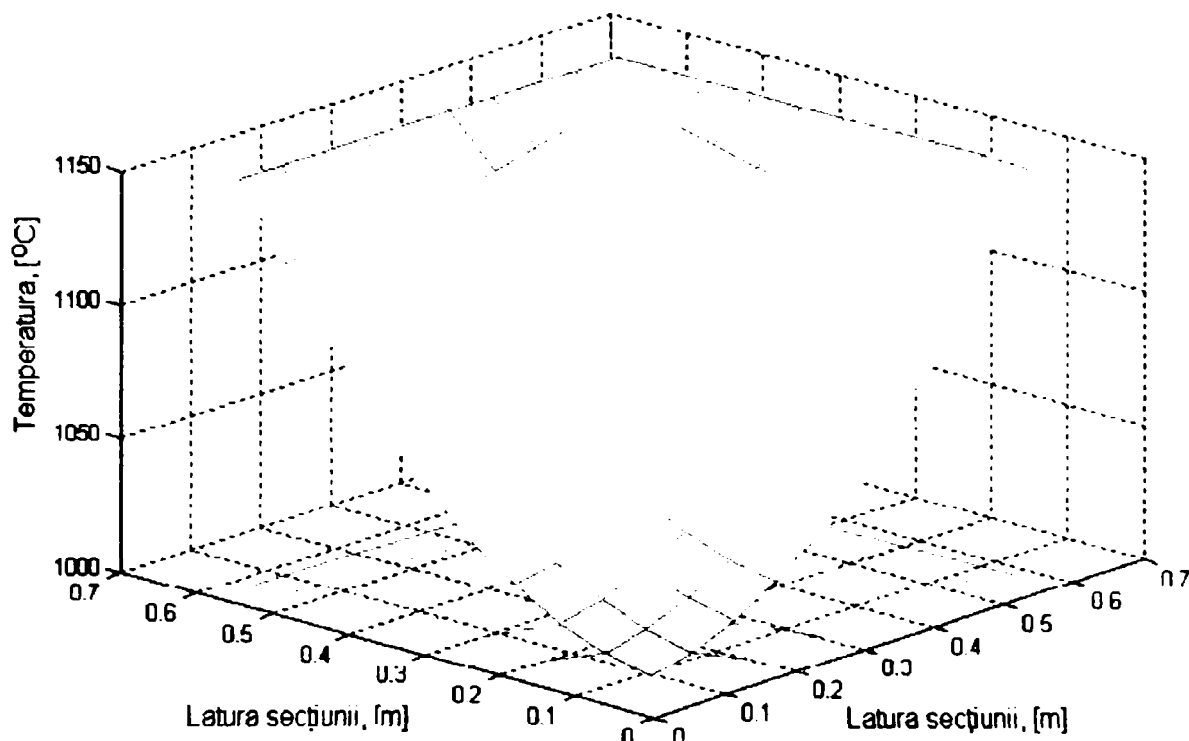


Fig.2.22. Distribuția temperaturii în secțiunea lingoului de 23,5 tone la 12 ore de la începutul încălzirii.

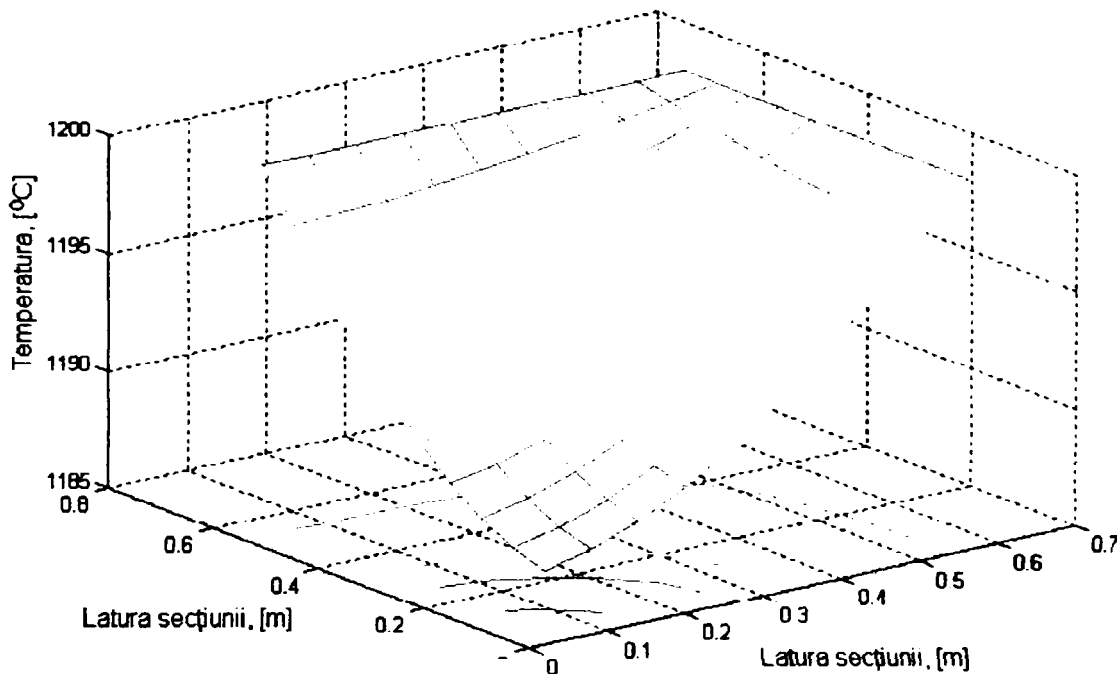


Fig.2.23. Distribuția temperaturii în secțiunea lingoului de 23,5 tone la 20 ore de la începutul încălzirii.

Cu ajutorul diagramelor rezultate se determină valorile temperaturii în orice punct al secțiunii lingourilor la diferite intervale de timp, fapt care ne permite reglarea regimului de încălzire a acestora.

2.4. Considerații cu privire la încălzirea lingourilor mari din oțel aliat destinate forjării

Pentru a determina influența factorilor tehnologici de elaborare, turnare, încălzire și deformare plastică asupra calității lingourilor de oțel aliat destinate forjării s-au experimentat un număr de 5 șarje, din oțel marca 30MoCrNi20X, (30CrNiMo8, conform SR EN 10183-1) din fiecare șarjă turnându-se câte un lingou de 23,5 tone, lingouri care au fost forjate în vederea obținerii a șase repere (R1, R2, R3, R5, R6, R7 – conform D.T. 1533-1538) [49].

Compoziția chimică a șarjelor elaborate sunt prezentate în tab. 2.1, iar în tab.2.2 se prezintă parametrii tehnologici ai elaborării și turnării oțelului.

Tab.2.1. Compoziția chimică finală pentru șarjele experimentale.

Nr crt	Compoziția chimică finală a oțelului, %												
	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Cr	Ti	Cu	As	Al	Sn
1	0,29	0,50	0,37	0,025	0,017	1,80	0,34	1,96	-	0,16	0,011	0,04	0,011
2	0,31	0,39	0,28	0,025	0,017	2,00	0,34	1,86	0,01	0,15	0,016	0,02	0,006
3	0,32	0,45	0,24	0,014	0,018	1,87	0,34	1,96	-	0,16	0,012	0,01	0,010
4	0,30	0,44	0,25	0,012	0,018	1,92	0,34	2,00	0,01	0,19	0,012	0,02	0,010
5	0,30	0,45	0,30	0,015	0,020	1,88	0,32	1,88	-	0,26	0,012	0,01	0,02

Tab. 2.2. Parametrii tehnologici ai elaborării și turnării oțelului.

Nr. crt.	Viteză de decarburare activă [%C/h]	Viteză de decarburare liniștită [%C/h]	Conținut de hidrogen [ppm]	Temp. de turnare [°C]	Viteză de turnare [t/min]	Durata vidării sub 3 torr [min]	Durata vidării sub 1 torr [min]
1	0,41	0,10	1,7	1561	2,82	10	5
2	0,48	0,12	1,4	1580	3,06	18	8
3	0,35	0,08	2,5	1630	2,53	15	10
4	0,38	0,10	2,7	1590	0,97	12	8
5	0,40	0,08	1,6	1588	3,69	8	5

Din analiza efectuată asupra șarjelor elaborate rezultă că din punct de vedere al compoziției chimice pe lichid, șarjele s-au încadrat în prescripțiile prevăzute de standard, șarjele au fost barbotate și vidate; vitezele de turnare s-au încadrat în limitele $0,97 \div 3,69$ t/min., iar temperaturile de început de vidare au fost cuprinse între $1561 \div 1630^{\circ}\text{C}$; pentru predezoxidare și dezoxidare, s-au utilizat feromangan, ferosiliciu și aluminiu.

Analizând parametrii tehnologici de elaborare și turnare s-a constatat că la șarjele experimentale este respectată tehnologia de elaborare și turnare iar timpul de menținere la presiunea de sub 1 torr a fost de maxim 10 minute și la presiunea de sub 3 torri de maxim 20 minute.

În privința parametrilor fierberii (viteză, temperatură, durată) aceștia s-au încadrat în limitele tehnologice atât pentru fierberea intensă cât și pentru fierberea liniștită. Referitor la parametri turnării (temperatură și viteză) la șarja 4 viteza de

turnare nu a fost corelată cu temperatura de turnare, ceea ce a condus la creșterea vâscozității oțelului în lingotieră și la o decantare mai puțin corespunzătoare a gazelor și incluziunilor.

Prin prelucrarea datelor experimentale în programul de calcul EXCEL s-au obținut o serie de corelații sub formă grafică și analitică.

În fig.2.24 se prezintă variația conținutului de hidrogen în funcție de viteza de decarburare. Se observă că are loc o scădere a conținutului de hidrogen odată cu creșterea vitezei de decarburare.

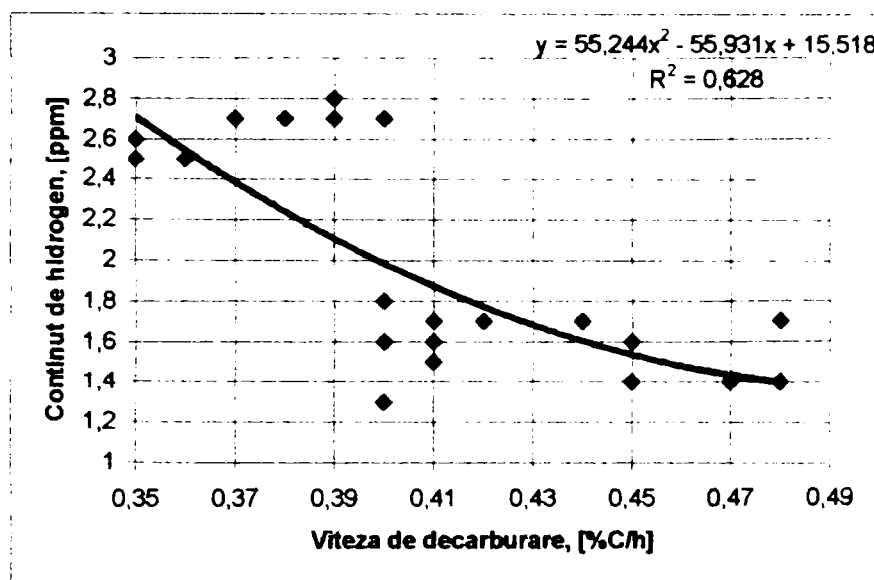


Fig.2.23. Variația conținutului de hidrogen în funcție de viteza de decarburare [50].

Ecuatia de corelație privind conținutul de hidrogen în funcție de viteza de decarburare a băii metalice :

$$|H_2| = 55,244 \cdot v_c^2 - 55,931 \cdot v_c + 15,518 \quad R^2 = 0,628 \quad (2.53)$$

Îndepărtarea hidrogenului din baia metalică în timpul afinării se explică prin faptul că, cu cât crește viteza de decarburare cu atât se intensifică agitarea băii metalice, este favorizată difuzia hidrogenului din baia metalică în bula de CO și îndepărtarea în atmosfera agregatului. De asemenea, fierberea de la vatră asigură omogenizarea oțelului atât din punct de vedere chimic cât și termic, conducând astfel la îndepărtarea avansată a hidrogenului din toată masa de oțel.

În fig.2.25 respectiv fig.2.26 se prezintă variația conținutului de hidrogen în funcție de durata vidării la diferite presiuni. Se observă că în oțel conținutul de hidrogen este cu atât mai scăzut cu cât durata vidării este mai mare. Din această cauză pentru a obține un conținut de hidrogen în oțel corespunzător pentru această marcă de oțel este necesară o menținere sub vid a oțelului de 15 - 20 min.

Ecuatiile de corelație cu privire la variația conținutului de hidrogen în funcție de durata vidării la presiunea de 3 torr respectiv la presiunea de 1 torr sunt:

$$|H_2| = -0,0104 \cdot t^2 + 0,2032 \cdot t + 1,2144 \quad R^2 = 0,4087 \quad (2.54)$$

$$|H_2| = -0,032 \cdot t^2 + 0,3348 \cdot t + 1,2354 \quad R^2 = 0,2876 \quad (2.55)$$

Lingourile experimentale au urmat fluxul tehnologic din cadrul SC Siderurgica SA Hunedoara. Acestea au fost încălzite în vederea forjării conform diagramei din

fig.2.27, care a urmărit eliminarea tensiunilor termice și structurale cu scopul evitării fisurării oțelului.

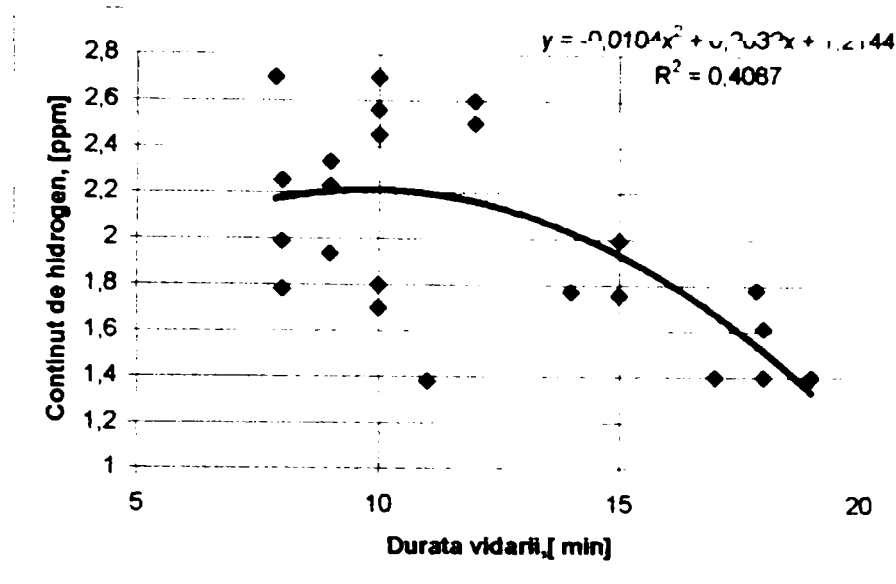


Fig.2.25. Variația conținutului de hidrogen în funcție de durata vidării (sub 3 torr) [51].

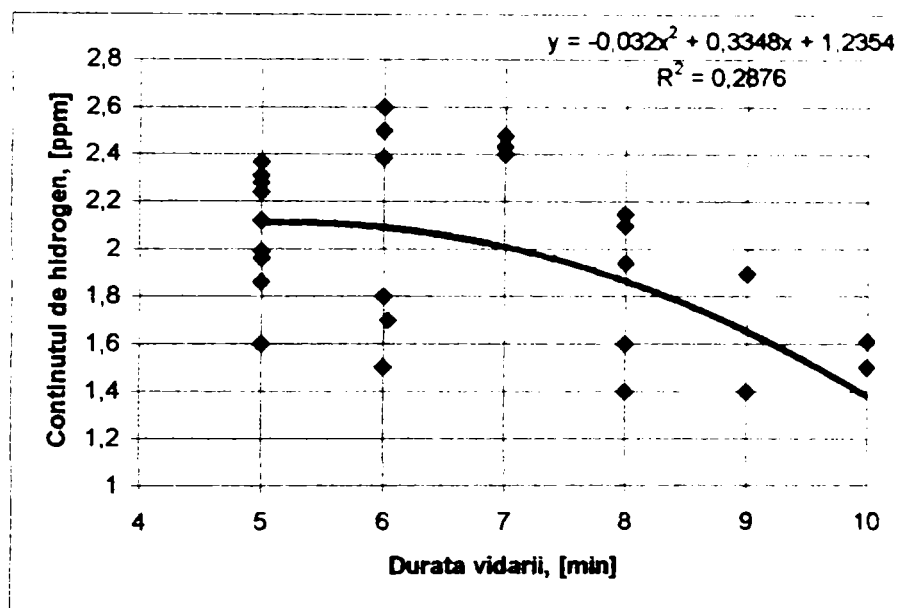


Fig.2.26. Variația conținutului de hidrogen în funcție de durata vidării (sub 1 torr) [51].

Un element favorabil în desfășurarea operațiilor de forjare și refulare a lingourilor experimentale a fost și starea tehnică și relativ îmbunătățită a utilajului de forjare la garniturile de lucru ale preseii care au fost schimbate cu puțin timp înainte, ceea ce a condus la utilizarea la maxim posibil a puterii preseii, prin reducerea pierderilor de presiune.

Tratamentul termic primar al reperelor obținute prin forjarea lingourilor experimentale trebuie să se desfășoare conform diagramei de normalizare și recoacere (anexa 2.3), urmărindu-se să fie un tratament de recoacere - dehidrogenare cu scopul de a asigura lipsa oricărui defect de natură termică (crăpături, fulgi, fisuri, etc.) și o permeabilitate termică foarte bună la controlul cu ultrasunete, pentru a putea evita eventualele defecte interne în stadiul cel mai avansat posibil, fiind vorba în

special de lingouri de dimensiuni mari. Tratamentul termic primar s-a realizat conform diagramei din fig.2.28.

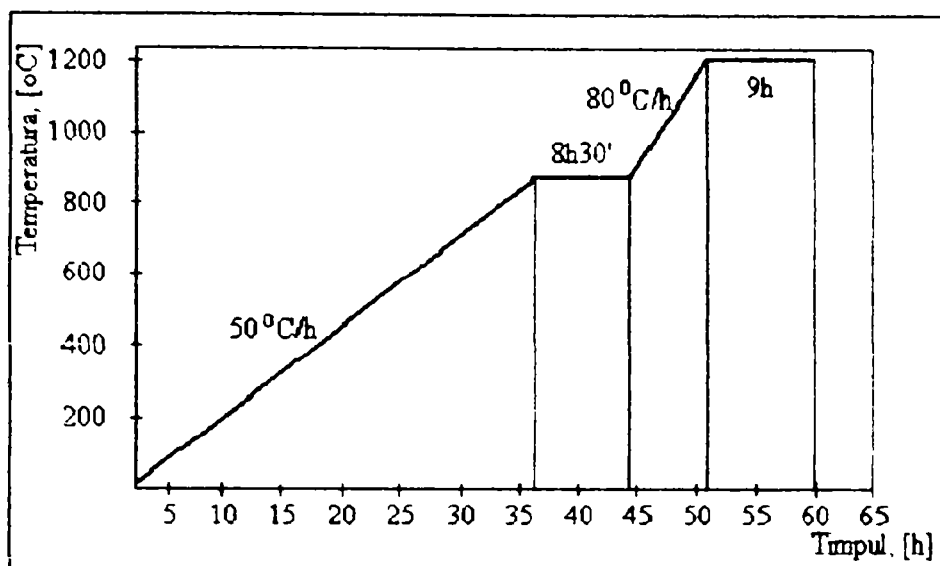


Fig.2.27. Diagrama de încălzire realizată la lingourile experimentale [52].

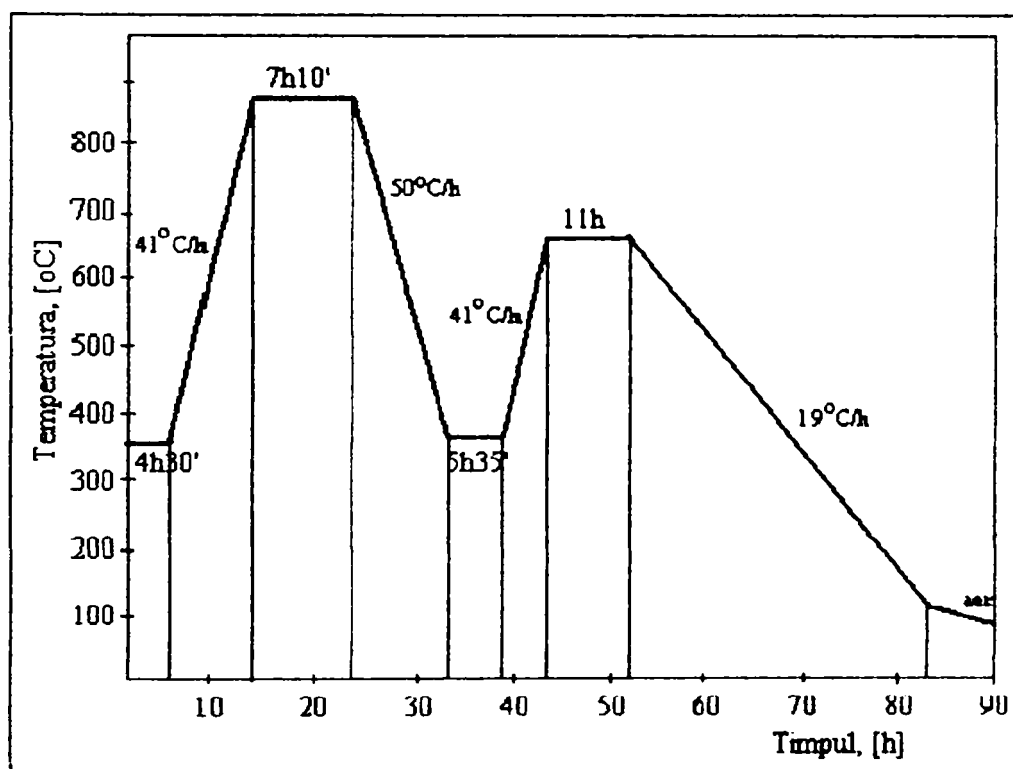


Fig.2.28. Diagrama de tratament termic primar realizată pentru lingourile experimentale [52].

Prin forjare și refulare s-a urmărit realizarea unor grade de corioaj și refulare superioare (tab.2.3) [53].

Din lingourile experimentale s-au pregătit probe “buzdugan” din materialul rezultat prin găurire, probe care au fost supuse analizei mărimii de grăunte, punctajului de incluziuni și a încercărilor mecanice a căror rezultate s-au încadrat în standarde (tab.2.4 respectiv tab.2.5).

Reperetele au fost controlate ultrasonic. La reperetele obținute din șarjele 1, 2, 3 și 5 nu a fost pus în evidență nici un tip de defect, ele fiind complet curate. Reperetele

obținute din șarja 4 în urma controlului ultrasonic au fost declarate rebut, deoarece materialul s-a dovedit a fi necorespunzător, lucru semnalat pe toată înălțimea reperelor respective (fig.2.28).

Tab.2.3.

Nr. șarjă	Coroiaj			Refulare		
	picioar	mijloc	maselotă	picioar	mijloc	maselotă
1.	2,71	4,84	3,46	73,46	77,30	72,11
2.	2,05	3,41	2,54	64,06	72,84	71,54
3.	2,72	4,86	3,48	73,47	77,31	72,15
4.	2,20	3,51	2,57	64,15	72,54	71,54
5.	2,71	4,84	3,45	73,46	77,30	72,11

Tab.2.4.

Proba	Oxizi	Sulfuri	Silicati	Nitruri	Suma
1	1,0	1,5	1,0	0	3,5
2	2,0	1,0	1,0	0	4,0
3	1,0	0,5	1,0	0	2,5
4	1,0	1,0	1,5	0	3,5
5	1,5	1,0	1,5	0	4,0

Tab.2.5

Proba	$R_{p0,2}$	R_m	A	Z	HB	KCU 300/3		
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]	[%]		[J/cm ²]		
1	1100	1230	13	58	235	53	59	47
2	1162	1240	14	55	234	46	55	46
3	1218	1310	13	51	236	44	46	47
4	1212	1299	13	51	232	52	58	47
5	1212	1299	13	51	235	44	48	47

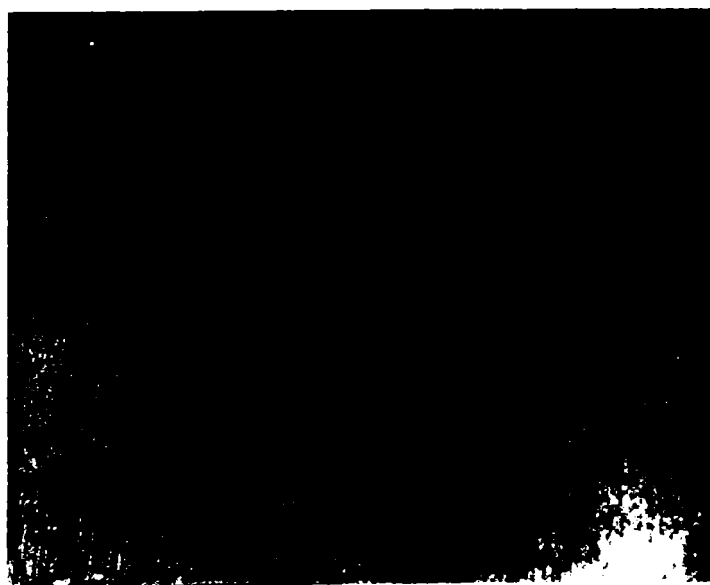


Fig.2.28. Fulgi.

Comparând datele experimentale obținute pentru șarja 4 (conținutul de hidrogen a fost de 2,7 ppm), cu datele pentru celelalte șarje analizate (conținutul de hidrogen a variat în limitele 1,4-1,7 ppm) pentru depistarea cauzelor care au determinat rebutarea reperelor, s-a ajuns la concluzia că materialul s-a dovedit a fi necorespunzător din cauza fulgilor. Conținutul de hidrogen la șarja 3 a fost de 2,5 ppm dar în urma tratamentului de hidrogenare a scăzut sub 1,8 ppm, lucru care nu s-a produs la șarja 4, conținutul de hidrogen în acest caz a fost 2 ppm conducând la apariția defectelor în reperatele obținute și la rebutarea acestora [54].

Analizând rezultatele experimentale și diagramele prezentate se obțin următoarele concluzii și propuneri:

- conținutul de hidrogen în oțel trebuie să fie sub 1,8 ppm, marca 30CrNiMo8 fiind un oțel sensibil la apariția crăpăturilor; realizarea acestui conținut de hidrogen (sub 1,8 ppm) implică evitarea neregulilor de la elaborare (încărcătură metalică ruginită, umiditatea materialelor de adaos, etc.) și turnare (umiditate din zidăria oalelor de turnare și a plăcii de bază a lingotierei uscate insuficient, din aerul atmosferic antrenat în timpul turnării, etc.) din care hidrogenul poate proveni, cu mențiunea că oțelul în stația de vidare trebuie supus unui vid înaintat (sub 15 torri) ;

- încălzirea trebuie să se facă cu viteză limitată, maxim 25°C/h până la 850°C, cuptorul fiind rece la încărcarea lingourilor iar menținerea în palierele de 850°C și 1180°C trebuie să fie corespunzătoare dimensiunilor lingourilor de 23,5 tone pentru omogenizarea temperaturii în secțiune, conform fig.2.29 ;

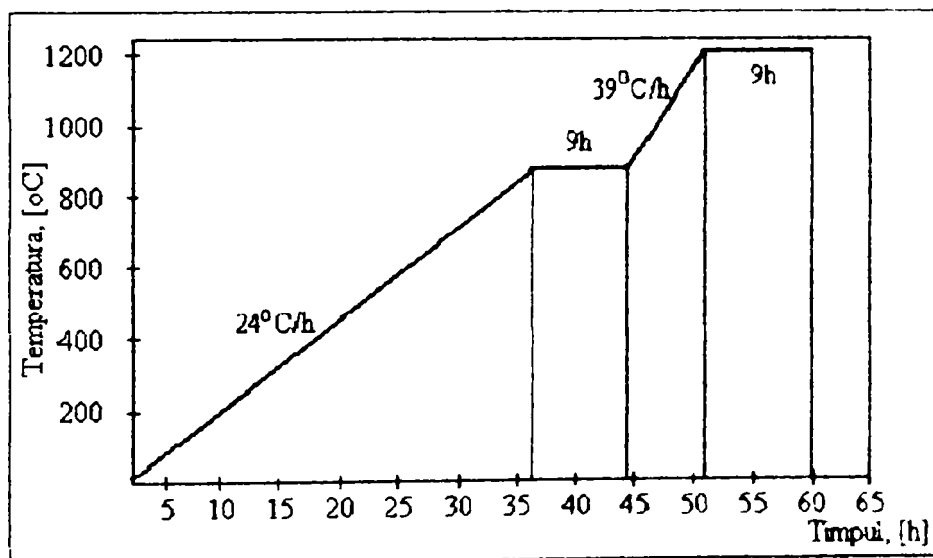


Fig.2.29. Diagrama de încălzire propusă pentru lingoul de 23,5 t [49].

- elaborarea și turnarea oțelului din această marcă se va desfășura conform instrucțiunilor tehnologice cu mențiunea realizării unui conținut de hidrogen sub 1,8 ppm, iar dacă acesta depășește această valoare se are în vedere tratamentul de dehidrogenare conform diagramei din fig.2.30, și tab.2.8 ;

Tab.2.8.

		$t = f(H_2)$											
H_2 , [ppm]		1,8	1,9	2,0	2,1	2,3	2,5	2,7	3,0	3,6	4,4	5,22	6,5
t, [h]		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55

- respectarea domeniului de deformare optim (1180 – 850°C) ;
- realizarea unui tratament termic primar de normalizare + recoacere cu respectarea unei răcirii dirijate încetinite, cu scopul evitării fisurării sau a crăpării reperelor din cauza tensiunilor termice și a prevenirii apariției fulgilor ;

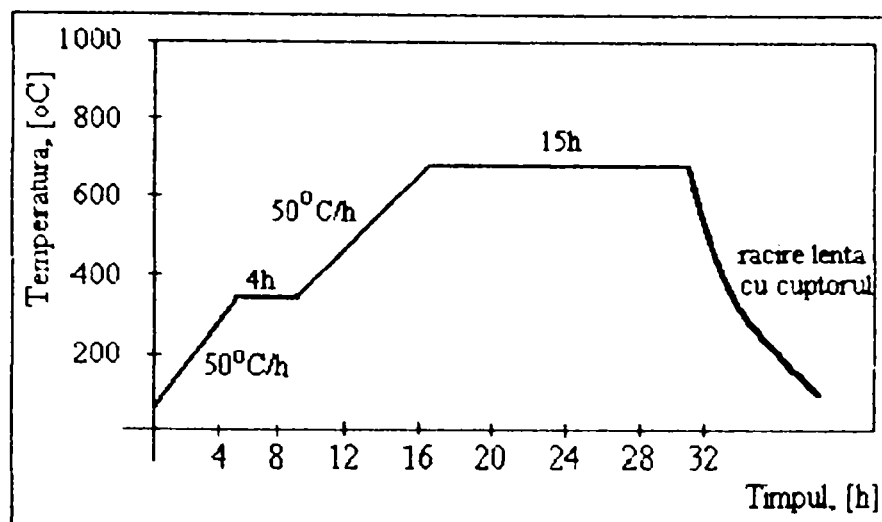


Fig.2.30. Diagrama de dehidrogenare propusă pentru lingoul de 23,5 t [49].

- un aport important pentru diminuarea pericolului de apariție a tensiunilor termice și structurale o are și temperatura la care se încarcă repera și durata de menținere în palier la această temperatură, care determină realizarea omogenizării temperaturii în secțiune ;

- asigurarea unor grade de corioaj și de refulare superioară (peste 2,5 respectiv peste 70%), cu scopul distrugerii structurii de solidificare a lingoului.

2.5. Concluzii

Din analiza cercetărilor existente și a rezultatelor prezentate în literatura de specialitate cu privire la încălzirea lingourilor din oțel în vederea procesării acestora prin forjare se conturează următoarele concluzii:

1. Dinamica regimurilor de încălzire este determinată de: compoziția chimică a oțelului, dimensiunile lingourilor, regimul termic al cuptorului, temperatura lingourilor în momentul introducerii în cuptor, viteza și durata de încălzire, diferența de temperatură admisă pe secțiune, valoarea maximă admisă pentru tensiunile termice, respectiv gradul de oxidare a suprafeței lingourilor.

2. Valoarea diferenței de temperatură pe secțiunea lingourilor trebuie precizată cu suficientă exactitate pentru fiecare grupă de oțeluri și mărime de lingouri deoarece aceasta este determinantă în apariția tensiunilor termice, care pot cauza distrugerea compactității oțelului.

3. Prin modelarea matematică bidimensională s-au obținut suprafețe de corelație a distribuției temperaturii pe secțiunea lingourilor și a curbelor de contur, ceea ce permite determinarea temperaturii în orice punct din secțiunea acestora, pe baza cărora se poate regla regimul de încălzire în funcție de diferența de temperatură admisă pe secțiune.

4. La oțelurile aliate cu crom, nichel și molibden susceptibile la fulgi, calitatea semifabricatelor forjate este influențată în mare măsură de conținutul de hidrogen.

Dacă acesta depășește 1,8ppm, indiferent de corectitudinea proceselor de încălzire și deformare plastică, la controlul ultrasonic produsele nu corespund din punct de vedere calitativ.

5. Analiza calității produselor prelucrate prin deformare plastică trebuie să aibă în vedere următoarele surse de origine a defectelor: tehnologia de elaborare-turnare, regimul de răcire a lingourilor, regimul de încălzire, tehnologia de deformare plastică respectiv tehnologia de tratament termic.

6. Studiul și cercetarea comparativă a regimurilor de încălzire a lingourilor mari din oțel desfășurată în acest capitol este necesară pentru stabilirea regimului de desfășurare în condiții de eficiență tehnico-economică maximă, a procesului de prelucrare plastică a lingourilor. În acest scop, cercetările experimentale pentru realizarea tezei vor urmări, ca regimul de încălzire și procesul de deformare plastică să decurgă conform tehnologiei existente, pentru a permite scoaterea în evidență a influenței structurii lingourilor asupra calității produselor obținute cât și pentru realizarea de corelații și modele matematice utile desfășurării proceselor de prelucrare prin intermediul presiunii.

CAPITOLUL 3

CERCETĂRI EXPERIMENTALE CU PRIVIRE LA DIRIJAREA SOLIDIFICĂRII LINGOURILOR. PRELUCRAREA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR

Experimentările efectuate au urmărit studierea dirijării solidificării lingourilor din oțel prin adaosuri de germeni de cristalizare în zona centrală a acestora, cu scopul de a influența structura internă. Stimularea germinării eterogene, pe suprafețe generate de particule introduse în centrul lingoului aflat în stare lichidă, conduce la formarea unui front secundar de solidificare și de absorbție a căldurii în această zonă.

Prin introducerea de microrăcitori în oțelul lichid din lingotieră s-a dorit crearea în zona centrală a lingoului a unui număr sporit de centri de cristalizare, având drept suport afirmația lui Efimov [16] care a precizat că unul din procedeele de finisare a structurii din zona axială a lingoului este amestecarea ei intensă sub acțiunea unor factori externi sau prin introducerea de germeni artificiali de cristalizare.

Cercetările și experimentările efectuate au căutat să studieze efectele subrăcirii zonei centrale a lingoului 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 lingoului turnat;
- între grăunțele cristaline a lingoului turnat și caracteristicile mecanice există o legătură sensibilă;
- semifabricatele obținute în cadrul experimentelor prezintă o creștere și o omogenitate semnificativă a proprietăților mecanice față de semifabricatele obținute prin metoda clasică, drept răspuns a modificării structurii.

Experimentările au avut scopul de a îmbunătăți calitatea produselor forjate, și au fost orientate pe ideea îmbunătățirii structurii cristaline a lingourilor de oțel, prin acțiuni efectuate asupra oțelului lichid, și anume: adaosul de microrăcitori în zona centrală a lingoului cu oțel lichid, care să creeze un nou front de cristalizare și solidificare, acest nou front creat absorbind o parte din căldura latentă de solidificare și căldura de supraîncălzire a oțelului, lucru care conduce în final la realizarea unor lingouri de oțel cu proprietăți și caracteristici mecanice superioare lingourilor de oțel turnate în mod obișnuit, fără adaos de microrăcitori.

Cercetările experimentale privind posibilitățile de îmbunătățire a calității lingourilor din oțel s-au efectuat în Hala tehnologică a Facultății de Inginerie Hunedoara și pe platforma industrială la S.C.Siderurgica S.A. Hunedoara, în cadrul unui contract de cercetare științifică.

3.1. Experimentări în fază de laborator

Experimentările în fază de laborator au avut drept scop dirijarea procesului de solidificare a lingourilor din oțel. Experimentările s-au efectuat pentru lingouri din oțel marca OLC 45 (1C45, conform SR EN 10083-2), cu masa de 100 kg, păstrându-se similitudinea cu lingoul cu masa de 9 tone. Oțelul a fost elaborat în cuptorul cu inducție de capacitate 100kg, din Hala Tehnologică a Facultății de Inginerie Hunedoara. Compoziția chimică a oțelului turnat este prezentată în tab.3.1, temperatura oțelului lichid în timpul turnării fiind determinată cu ajutorul unui termocuplu de imersie. Ca microrăcitori s-au folosit granule obținute prin tăiere din sârmă laminată (OL 37, S185 – conform SR EN 10025), cu diametrul de 2-6mm, tăiată la lungimea de 3-5mm în cantitate de 2, 3 și 4kg/t. Efectul microrăcitorilor s-a studiat în funcție de diametrul granulelor și de cantitatea specifică de microrăcitori. Lotul experimental a avut pentru comparație lingouri turnate în aceleași condiții după metoda clasică. Introducerea granulelor s-a realizat la procente de umplere a lingotierei de 30%, 60% și 90%. Stabilirea acestor nivele s-a făcut având în vedere cercetările efectuate pe plan local [56, 57, 58] și lucrările publicate în literatura de specialitate [59, 60, 62]. După terminarea turnării oțelului în lingotierele experimentale de 100kg (fig.3.1), partea superioară a lingourilor a fost acoperită cu praf antiretasură.

Tab.3.1. Analiza chimică și temperatura oțelului turnat în lingourile experimentale.

Nr. crt.	Compoziția chimică, [%]											Temperatura, [°C]		
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	As	Al	T _{cupt}	T _{coala}	T _t
1	0,46	0,64	0,32	0,016	0,015	0,22	0,12	0,14	0,03	0,010	0,02	1615	1585	1575
2	0,48	0,64	0,30	0,012	0,016	0,18	0,14	0,20	0,03	0,012	0,022	1625	1595	1570
3	0,46	0,62	0,27	0,014	0,022	0,18	0,09	0,12	0,02	0,014	0,015	1600	1585	1570
4	0,47	0,67	0,37	0,014	0,022	0,18	0,08	0,12	0,02	0,016	0,035	1610	1590	1575
5	0,45	0,68	0,19	0,016	0,025	0,22	0,09	0,21	0,03	0,016	0,020	1615	1590	1575
6	0,45	0,63	0,33	0,015	0,015	0,21	0,11	0,12	0,03	0,011	0,02	1612	1588	1576
7	0,47	0,65	0,30	0,011	0,017	0,20	0,12	0,16	0,03	0,012	0,022	1620	1590	1573
8	0,48	0,65	0,20	0,013	0,021	0,19	0,09	0,12	0,02	0,014	0,015	1606	1589	1572
9	0,46	0,66	0,35	0,014	0,020	0,18	0,10	0,13	0,02	0,016	0,024	1610	1590	1575
10	0,45	0,62	0,19	0,016	0,025	0,20	0,09	0,21	0,03	0,016	0,020	1615	1595	1578
11	0,47	0,63	0,32	0,015	0,014	0,22	0,12	0,14	0,03	0,010	0,02	1615	1585	1575
12	0,45	0,64	0,30	0,012	0,016	0,18	0,15	0,20	0,03	0,012	0,021	1625	1595	1570
13	0,46	0,62	0,28	0,012	0,022	0,17	0,09	0,12	0,02	0,014	0,015	1603	1585	1573
14	0,47	0,67	0,37	0,014	0,022	0,18	0,08	0,12	0,02	0,016	0,035	1614	1590	1575
15	0,45	0,68	0,18	0,014	0,025	0,22	0,09	0,21	0,03	0,016	0,020	1615	1590	1572
16	0,46	0,66	0,32	0,016	0,016	0,21	0,11	0,14	0,03	0,010	0,02	1615	1585	1575
17	0,45	0,64	0,31	0,012	0,014	0,18	0,14	0,20	0,03	0,012	0,022	1622	1595	1570
18	0,46	0,62	0,25	0,014	0,022	0,18	0,09	0,15	0,02	0,015	0,014	1600	1585	1570
19	0,47	0,63	0,37	0,014	0,020	0,17	0,08	0,12	0,02	0,016	0,035	1612	1590	1575
20	0,45	0,64	0,19	0,013	0,024	0,22	0,09	0,21	0,03	0,016	0,020	1615	1590	1570

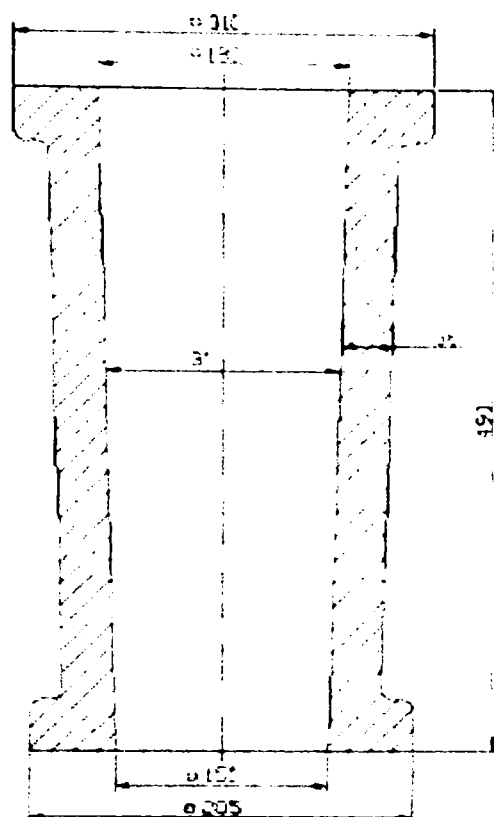


Fig.3.1. Lingotiera experimentală de 100kg.

Particulele metalice, care joacă rol de microrăcitori, trebuie să îndeplinească o serie de condiții: conținut mic de impurități nocive, formă sferică sau apropiată, densitate mare în vrac și cost relativ mic cu cel al oțelului [55].

După răcire și dezbateră lingourile experimentale au fost examinate ultrasonic, apoi au fost încălzite și deformate plastic prin forjare, până la secțiunea pătrată cu latura de 30mm, în cadrul secției de forjă a S.C.Siderurgica S.A. Hunedoara. După tăierea capetelor lingourilor s-a observat o creștere a scoaterii de metal bun în favoarea lingourilor la care s-au făcut adaosuri de microrăcitori. Din semifabricatele obținute după forjare s-au prelevat probe atât pentru studiul metalografic al structurii cât și pentru determinarea valorilor caracteristicilor mecanice (conform SR EN 1002-1/1995): rezistența la rupere la tracțiune R_m [N/mm^2], limita de curgere $R_{p0,2}$ [N/mm^2], alungirea procentuală după rupere A_5 [%] și coeficientul de gătuire Z [%].

Datele experimentale referitoare la încercările mecanice sunt prezentate în tab.3.2. Au fost comparate datele obținute de la lingourile turnate cu microrăcitori cu datele obținute de la lingourile turnate clasic.

În urma experimentărilor s-a urmărit modul în care se produce solidificarea oțelului turnat cu microrăcitori. Au fost efectuate studii ale microstructurii lingourilor turnate pentru a scoate în evidență forma și mărimea grăuntelui primar obținut în urma solidificării. În fig.3.2 se prezintă microstructura probei pentru lingoul turnat cu microrăcitori și a celui turnat clasic.

În urma studiului la microscop al probelor metalografice s-a putut observa că în lingourile cu adaos de microrăcitori se obține o finisare a structurii grăuntelui, lucru care duce la o omogenitate chimică. Studiul lingoului turnat clasic a confirmat structura grosolană, cu porozități, specifică pieselor turnate.

Tab.3.2. Datele obținute pentru lingourile experimentale de 100kg.

Nr. crt.	Diametru [mm]	Cantitate spec. [kg/t]	Caracteristicile mecanice			
			$R_{p0.2}$, [N/mm ²]	R_m , [N/mm ²]	A_5 , [%]	Z , [%]
1	0	0	348	608	23	47
2	2	2	428	668	30	61
3	2	3	430	688	32	63
4	2	4	447	698	35	65
5	3	0	346	605	24	47
6	3	2	405	662	30	60
7	3	3	435	682	32	62
8	3	4	425	690	35	64
9	4	0	351	607	25	46
10	4	2	409	656	30	59
11	4	3	419	680	31	61
12	4	4	437	688	33	63
13	5	0	355	610	25	49
14	5	2	407	657	29	58
15	5	3	417	678	31	60
16	5	4	433	685	33	62
17	6	0	350	613	23	46
18	6	2	400	655	30	57
19	6	3	410	674	31	59
20	6	4	429	682	34	61



a.



b.

Fig.3.2. Microstructura probei, atac Nital 2%, x300:

a – cu microrăcitori; b – fără microrăcitori.

Pentru a observa modul de comportare al microrăcitorului în masa de topitură s-a introdus în lingotierele experimentale, bare din sârmă cu diametrele cuprinse între 2-6 mm și menținute perioade diferite de timp, în funcție de diametrul acestora.

La scoaterea din lingotieră s-a observat:

- în toate cazurile, în jurul sârmei s-a produs fenomenul de cristalizare locală a oțelului cu dendrite orientate perpendicular pe axa longitudinală a sârmei (fig.3.3);

- la sârma cu diametrul de 2mm și 3 mm, după menținerea în lingotieră timp de 2 secunde, s-a observat fragmentarea ei în mai multe bucăți la scoaterea din oțelul lichid, același fenomen evidențiindu-se și în cazul sârmelor de 5mm și 6 mm, după un timp de menținere în lingotieră de 4 - 5 secunde.

Cantitatea de căldură absorbită de o granulă pentru transformarea stării solid-lichid, se poate determina cu relația:

$$Q = M_{mr} [c(T_t - T_o) + L_t] \quad (3.1)$$

unde: Q - cantitatea de căldură absorbită de o granulă, în J;

M_{mr} - masa microrăcitorilor, în kg;

c - căldura specifică a oțelului, în J/kg°C;

T_t - temperatura de topire, în °C;

T_o - temperatura mediului ambiant, în °C;

L_t - căldura latentă de topire a oțelului, în J/kg.

Înlocuind în relația anterioară valorile specifice se obține:

$$Q = 2,22 \cdot 10^{-3} [711,2(1520 - 20) + 271960] = 1761,46 [J] \quad (3.2)$$

Viteza de transmitere a căldurii cedată de oțelul în curs de solidificare a granulei în curs de topire se măsoară prin cantitatea de căldură cedată (respectiv înmagazinată) în unitatea de timp, astfel

$$\frac{Q}{t} = K \frac{S \cdot \Delta T}{l}, [J/s] \quad (3.3)$$

sau, timpul necesar pentru topirea integrală a unei granule introduse în oțelul lichid

$$t = Q \frac{l}{K \cdot S \cdot \Delta T}, [s] \quad (3.4)$$

unde: S - suprafața pe care se face schimbul de căldură, în m²;

ΔT - variația de temperatură până la trecerea în stare lichidă a granulei în °C;

l - dimensiunea (lungimea) granulei, în m;

K - coeficientul de conductivitate termică al oțelului, în J/mh°C.

În urma calculelor se obține:

$$t = 3,5 [s] \quad (3.5)$$

Diferența de timp de topire (pentru bare, 4-5 sec. iar pentru granule cca. 3 sec., ambele din sârma de 6 mm), se datorește faptului că suprafața specifică pe care are loc absorbția de căldură este mult mai mare în cazul granulelor decât în cazul barelor, granulele cu diametrul mai mic de 6 mm se vor topi într-un timp mai scurt, ceea ce conduce la concluzia, că la toate variantele experimentale granulele ajung la faza lichidă.

Acest fenomen permite o omogenizare din punct de vedere chimic și în același timp, produce o subrăcire locală, accelerând procesul de solidificare.

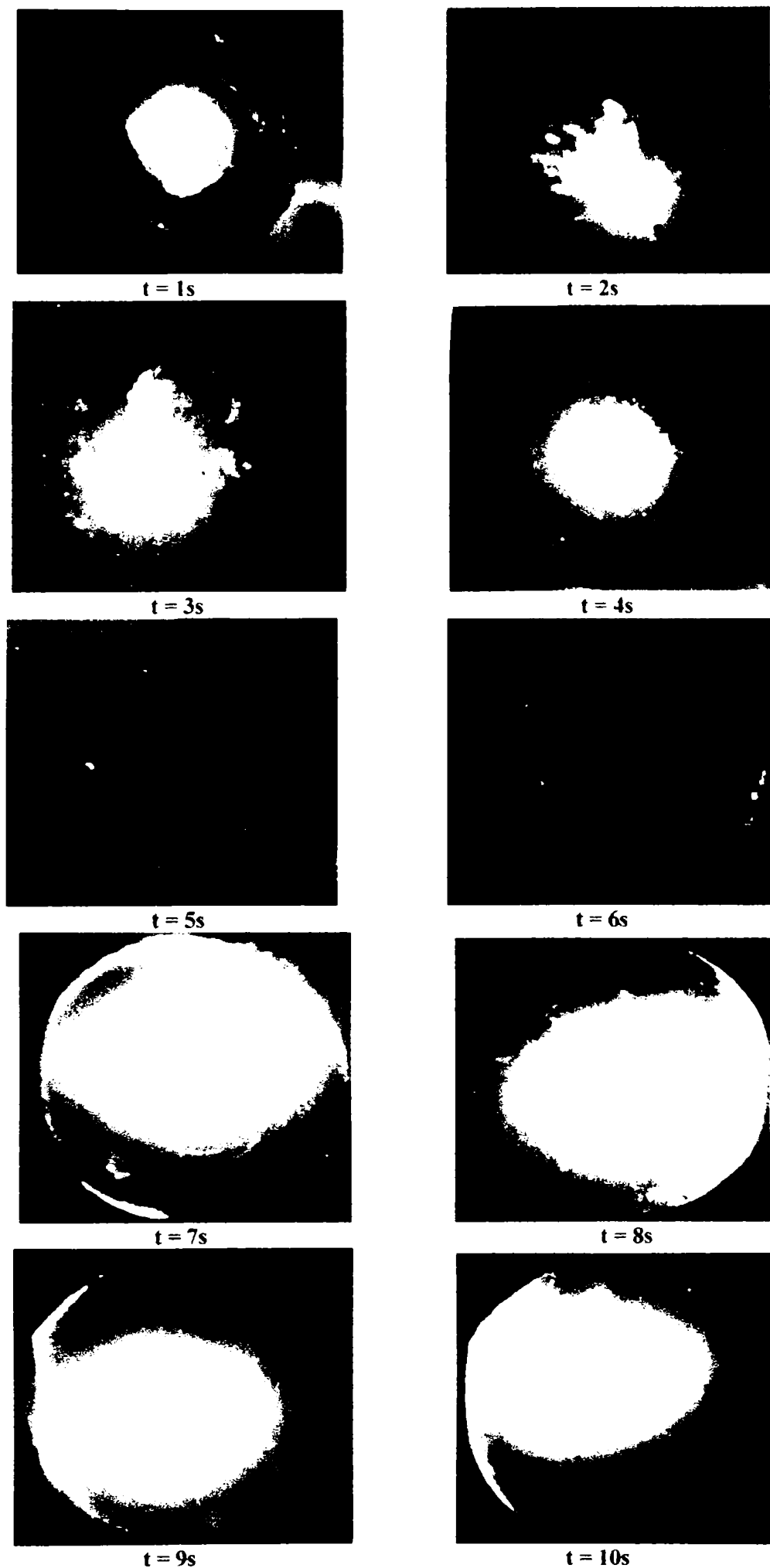


Fig.3.3. Influența microrăcitorilor asupra solidificării oțelului, în funcție de timpul de menținere (pentru $t = 1 - 10$ secunde).

Datele obținute în urma experimentărilor au fost prelucrate cu ajutorul programului de calcul EXCEL, astfel în fig.3.4 se prezintă variația rezistenței la rupere la tracțiune, în fig.3.5 variația limitei de curgere, în fig.3.6 variația alungirii procentuale după rupere respectiv în fig.3.7 variația coeficientului de gătuire.

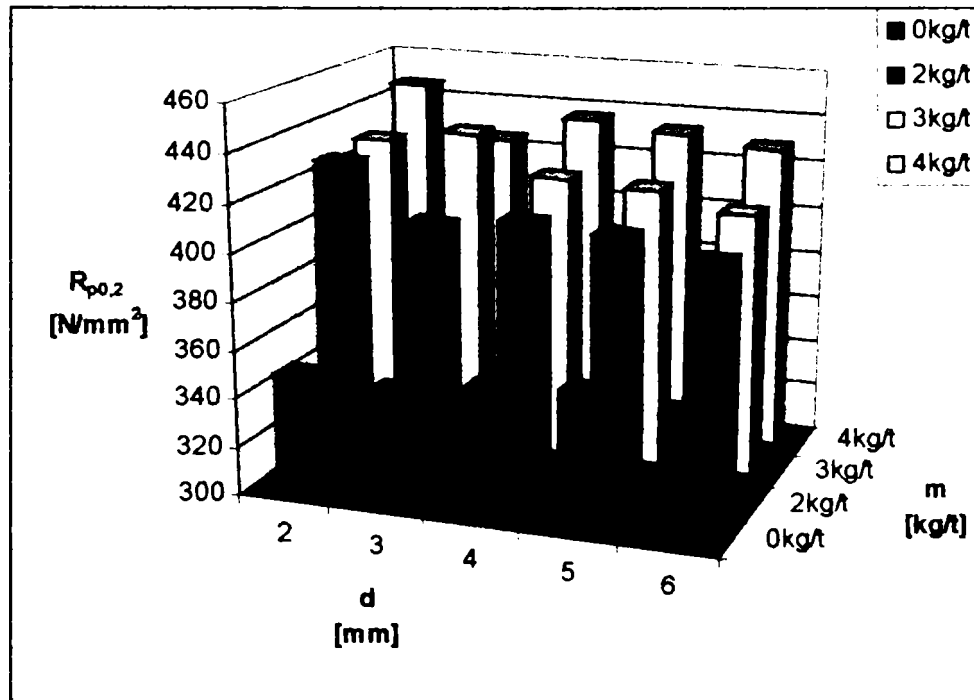


Fig.3.4. Variația limitei de curgere pentru diferite adaosuri de microrăcitori cu diametrul de 2-6mm.

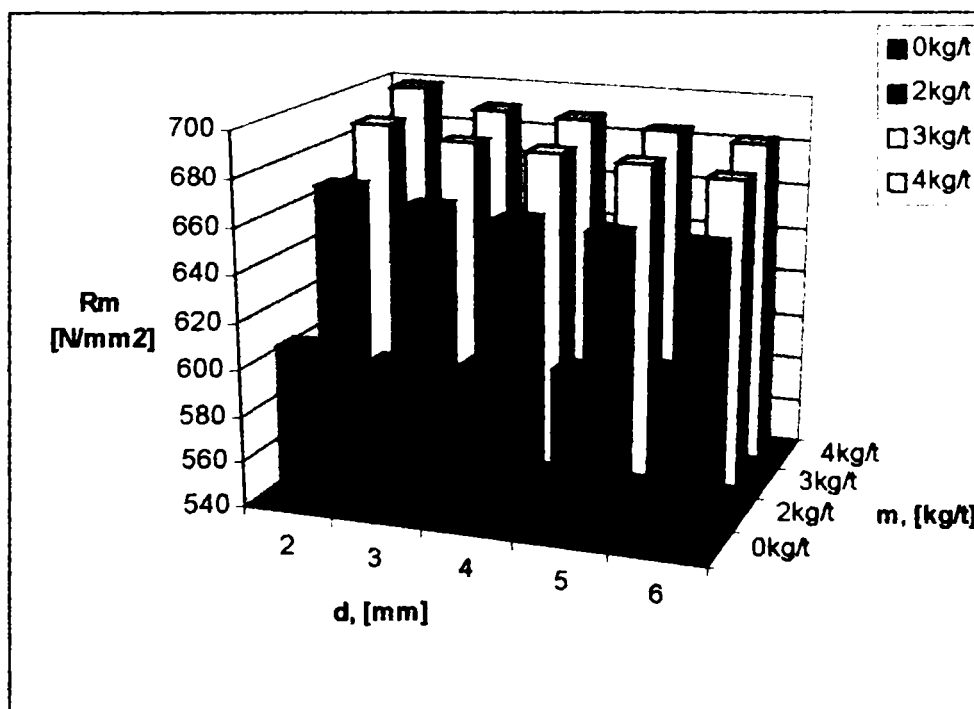


Fig.3.5. Variația rezistenței la rupere la tracțiune pentru diferite adaosuri de microrăcitori cu diametrul de 2-6mm.

Microrăcitorii se găsesc astfel o perioadă de timp în suspensie în topitura de oțel lichid și provoacă la răcirea și solidificarea oțelului mai multe efecte: de răcire, de cristalizare, de aliere sau de obținere a unor proprietăți fizice speciale.

În prezența microrăcitorilor, solidificarea oțelului suferă schimbări radicale:

- capătă un caracter volumic succesiv, frontul de solidificare fiind fragmentat și multiplicat la nivelul numărului granulelor inoculate; astfel suprafața de răcire crește foarte mult;

- segregăția zonală directă și indirectă este brusc frânată, datorită micșorării posibilității de transfer de masă prin spațiile dintre microfronturile de solidificare;

- 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

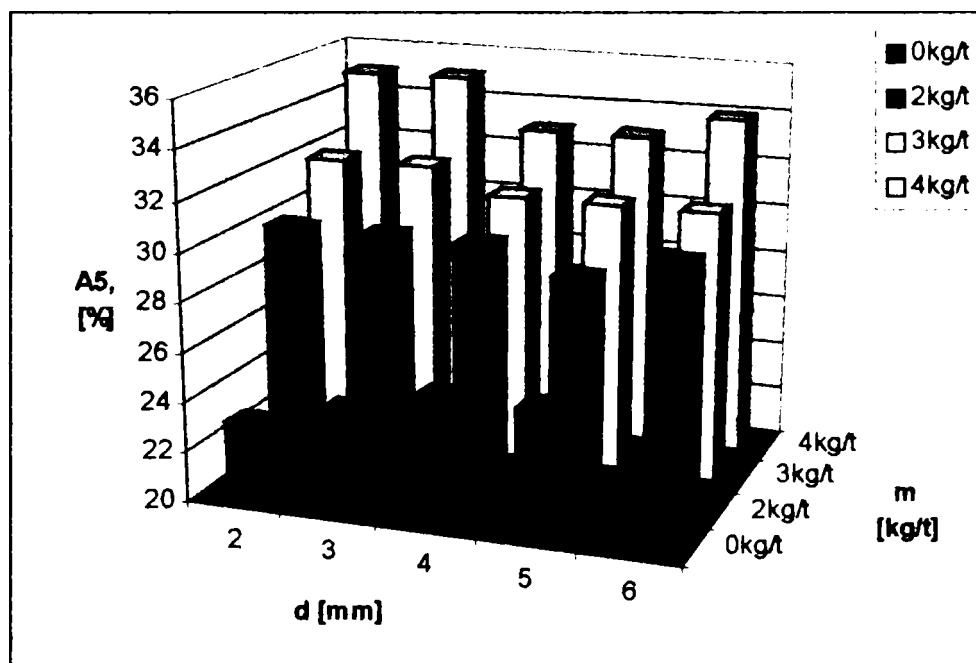


Fig.3.6. Variația alungirii procentuale după rupere pentru diferite adaosuri de microrăcitori cu diametrul de 2-6mm.

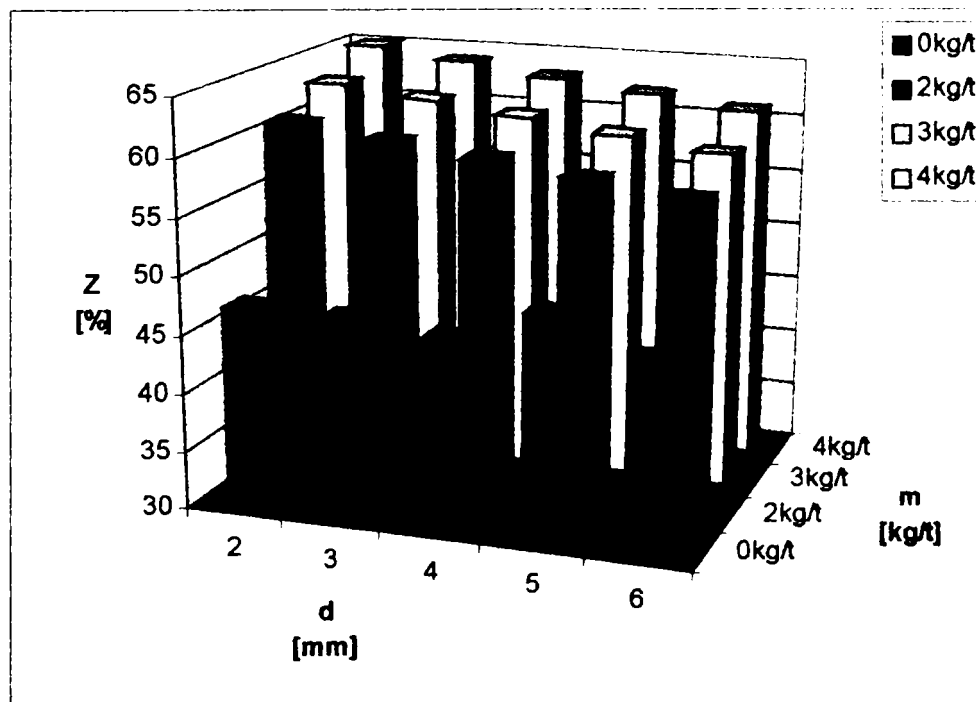


Fig.3.7. Variația coeficientului de gătire pentru diferite adaosuri de microrăcitori cu diametrul de 2-6mm.

În urma analizei rezultatelor experimentale obținute în fază de laborator și a diagramelor rezentate rezultă: o creștere semnificativă a caracteristicilor mecanice, finisarea grăuntelui cristalin și o reducere a dispersiei valorilor caracteristicilor mecanice.

3.2. Experimentări la scară industrială

În cadrul cercetărilor privind posibilitățile de dirijare a solidificării lingourilor din oțel, experimentările industriale s-au efectuat pe lingouri din oțel carbon de calitate marca OLC 45, elaborat în cuptoare electrice cu arc și destinate forjării, cu masa de 9t.

Principala preocupare a experimentărilor la scară industrială a fost realizarea unor lingouri cu structură internă favorabilă deformării plastice, care să conducă la o creștere a scoaterii de metal și care să asigure proprietăți mecanice superioare, ca urmare a stimulării germinării eterogene în zona centrală a lingoului prin utilizarea microrăcitorilor ca suport de germinare.

S-a optat pentru varianta elaborării în cuptorul electric cu arc deoarece acest tip de agregat permite elaborarea oricărei mărci de oțel și se adaptează relativ ușor fluxului de elaborare-turnare. S-a avut în vedere respectarea tehnologiei de elaborare, o încadrare a temperaturii de turnare și a vitezei de turnare în limitele stabilite prin instrucțiunile tehnologice.

Etape parcurse în cadrul experimentărilor:

- pregătirea microrăcitorilor pe clase și cantități exacte pentru experimentări;
- pregătirea formelor de turnare și a ansamblurilor de turnare;
- elaborarea mărcii de oțel care urmează să fie turnată;
- turnarea oțelului în formele de turnare și adaosul de microrăcitori;
- încălzirea lingourilor în vederea deformării plastice;
- deformarea plastică propriu-zisă a lingourilor;
- prelevarea și pregătirea probelor necesare analizelor;
- determinarea valorilor încercărilor mecanice $R_{p0,2}$, R_m , A_5 și Z ;
- studiul metalografic;
- alegerea metodei de analiză matematică a datelor obținute;
- prelucrarea datelor experimentale, concluzii.

În cadrul experimentărilor s-a plecat de la următoarele ipoteze simplificatoare:

- toate lingourile se toarnă în forme de același tip;
- cantitățile specifice de microrăcitori din fiecare clasă granulometrică sunt stabilite a fi 1kg/t, 1,5 kg/t, 2kg/t, 3kg/t și 4kg/t;
- lotul experimental de lingouri urmează același flux de încălzire, deformare plastică, studiu metalografic și încercări mecanice.

După analizarea datelor rezultate din experimentările efectuate în fază de laborator s-a trecut la turnarea oțelului utilizând microrăcitori în lingouri cu masa de 9t. Au fost turnate 25 de lingouri cu masa de 9t, din oțel marca OLC 45, iar în paralel cu variantele experimentale s-au urmărit lingouri turnate în mod obișnuit.

După terminarea turnării, lingourile experimentale au urmat fluxul tehnologic de încălzire și deformare plastică din cadrul societății S.C. Siderurgica S.A.Hunedoara.

În calitate de microrăcitori s-au folosit granule obținute prin tăiere din sârmă marca OL 37 cu diametrul de 2, 3, 4, 5 și 6 mm.

Schema modului de adăugare a microrăcitorilor în lingotieră în timpul umplerii cu oțel este prezentată în fig.3.8. Protecția oglinzii de metal s-a făcut cu gaz inert, argon, care a asigurat un capac de protecție zonei de contact dintre oțelul lichid care urcă în lingotieră și granulele utilizate ca suport pentru germinarea eterogenă în zona centrală a lingoului. Gazul inert a fost insuflat în lingotieră pe toată durata adăugării microrăcitorilor. După terminarea turnării oțelului, partea superioară a lingoului a fost acoperită cu praf antiretasură de tip ARO 4.

Turnarea s-a făcut în lingotiere, pe poduri de turnare, alimentate cu oțel printr-o pâlnie de turnare. Schema de amplasare a lingotierelor pe podul de turnare este prezentată în fig.3.9.

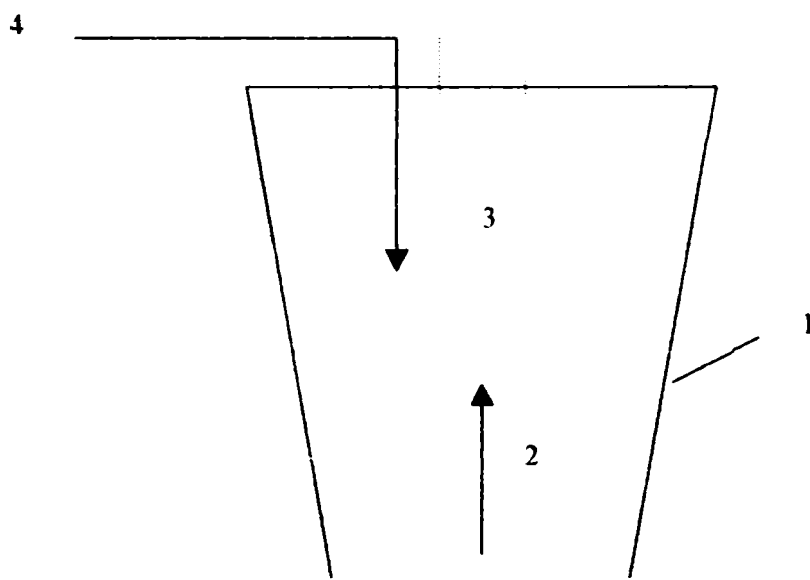


Fig.3.8. Schema modului de adăugare a microrăcitorilor în lingotieră în timpul umplerii cu oțel:
1 – lingotieră; 2 – oțel lichid; 3 – microrăcitori; 4 – gaz inert.

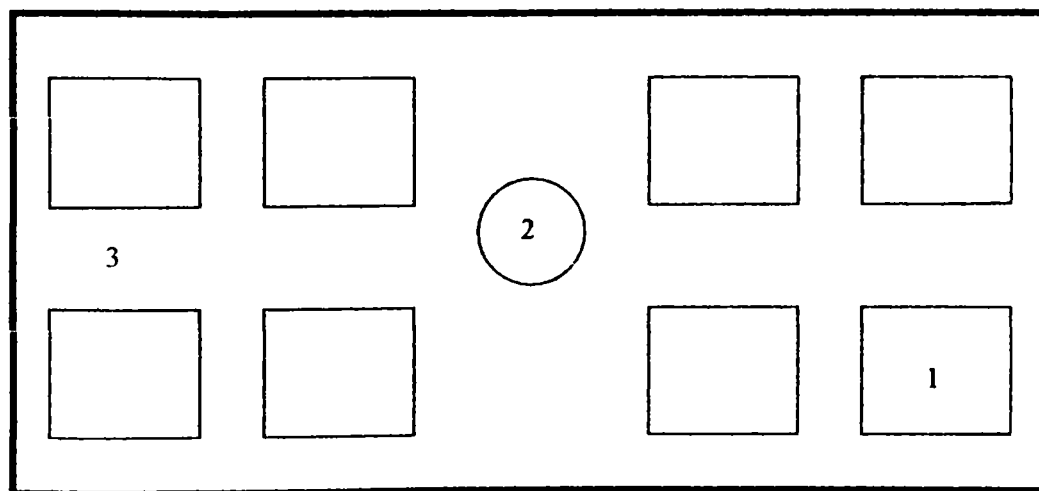


Fig.3.9. Schema de amplasare a lingotierelor pe podurile de turnare:
1 – lingotiere; 2 – pâlnie pentru alimentarea cu oțel; 3 – pod de turnare.

Pentru efectuarea experimentului în deplină siguranță, bazându-ne pe concluziile și observațiile de la experimentele efectuate pe probe s-a acceptat ca diferența de temperatură să fie de minim 60°C, cantitatea de oțel turnată fiind de 225t. S-a dorit garantarea realizării experimentelor în condiții reale ținându-se seama de costurile uriașe ce sunt implicate pentru această cantitate de oțel.

Lotul experimental a avut pentru comparație lingouri turnate în aceleași condiții după metoda clasică. Pentru introducerea microrăcitorilor în lingotiere s-au respectat aceleași procente de umplere din cadrul experimentărilor în fază de laborator. S-a dorit ca microrăcitorii să modifice în bine circulația convectivă care are loc în centrul lingoului în timpul solidificării. Compoziția chimică a oțelului turnat este prezentată în tab.3.3.

Tab.3.3. Compoziția chimică a oțelului elaborat, marca OLC 45.

Nr. crt.	Compoziția chimică, [%]										
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	As	Al
1	0,50	0,69	0,20	0,100	0,028	0,16	0,08	0,15	0,03	0,016	0,020
2	0,46	0,64	0,32	0,016	0,015	0,22	0,12	0,14	0,03	0,010	0,032
3	0,48	0,64	0,30	0,012	0,016	0,18	0,14	0,20	0,03	0,012	0,022
4	0,46	0,62	0,27	0,014	0,022	0,18	0,09	0,12	0,02	0,014	0,015
5	0,47	0,67	0,37	0,014	0,022	0,18	0,08	0,12	0,02	0,016	0,035
6	0,45	0,68	0,19	0,016	0,025	0,22	0,09	0,21	0,03	0,016	0,020
7	0,47	0,67	0,31	0,010	0,018	0,20	0,08	0,12	0,02	0,014	0,043
8	0,46	0,66	0,22	0,016	0,018	0,24	0,11	0,16	0,05	0,007	0,020
9	0,46	0,63	0,26	0,015	0,026	0,17	0,09	0,13	0,02	0,015	0,025
10	0,46	0,62	0,28	0,010	0,020	0,20	0,14	0,18	0,04	0,012	0,033
11	0,45	0,68	0,30	0,010	0,024	0,19	0,09	0,14	0,03	0,016	0,025
12	0,44	0,66	0,26	0,014	0,016	0,22	0,16	0,20	0,04	0,016	0,030
13	0,42	0,62	0,34	0,015	0,028	0,27	0,13	0,20	0,04	0,012	0,030
14	0,49	0,61	0,29	0,016	0,020	0,27	0,13	0,17	0,03	0,018	0,015
15	0,46	0,52	0,27	0,038	0,022	0,19	0,10	0,20	0,03	0,012	0,010
16	0,42	0,65	0,33	0,032	0,020	0,26	0,12	0,16	0,03	0,012	0,020
17	0,46	0,56	0,32	0,015	0,024	0,56	0,11	0,16	0,04	0,014	0,032
18	0,48	0,60	0,37	0,019	0,020	0,28	0,10	0,15	0,03	0,010	0,015
19	0,48	0,63	0,25	0,021	0,014	0,26	0,10	0,15	0,05	0,010	0,015
20	0,44	0,71	0,31	0,018	0,025	0,33	0,10	0,17	0,03	0,010	0,030
21	0,46	0,67	0,33	0,015	0,020	0,17	0,07	0,16	0,02	0,015	0,020
22	0,44	0,66	0,31	0,020	0,018	0,19	0,08	0,15	0,02	0,017	0,024
23	0,47	0,76	0,35	0,014	0,015	0,19	0,11	0,15	0,04	0,015	0,030
24	0,42	0,66	0,34	0,015	0,017	0,19	0,16	0,18	0,04	0,010	0,032
25	0,44	0,62	0,27	0,016	0,020	0,21	0,11	0,17	0,03	0,015	0,029

Pentru a putea afla parametrii de performanță ai probelor luate din semifabricatele experimentale s-au efectuat încercările mecanice care sunt determinate

în mod curent în scopul obținerii unor baze de date pentru calculul de proiectare a structurilor de rezistență, care constituie în același timp datele conform legislației pentru recepția oțelurilor. Astfel s-au determinat următoarele caracteristici (conform SR EN 1002-1/1995):

- rezistența la rupere la tracțiune - R_m - [N/mm²];
- limita de curgere - $R_{p0,2}$ - [N/mm²];
- alungirea procentuală după rupere - A_5 - [%];
- coeficientul de gătuire - Z - [%].

Sarjele au fost urmărite în continuare pe flux, luându-se din fiecare lingou probe pentru determinarea proprietăților fizico-mecanice comparative între oțelul turnat obișnuit și cel turnat cu microrăcitori. Caracteristicile mecanice pentru toate variantele experimentale sunt prezentate în tab.3.5 și tab.3.6.

Tab.3.5. Caracteristicile mecanice ($R_{p0,2}$ și R_m).

Nr. crt.	d [mm]	$R_{p0,2}$, [N/mm ²]						R_m , [N/mm ²]					
		Consum specific de microrăcitori, [kg/t]											
		0	1	1,5	2	3	4	0	1	1,5	2	3	4
1	2	345	397	410	424	430	445	600	624	642	660	675	690
2	2	348	400	412	428	428	447	608	632	650	668	688	698
3	2	352	404	418	423	432	457	618	642	660	678	691	708
4	2	360	405	423	427	450	467	625	648	667	685	700	715
5	2	372	415	426	435	460	474	630	654	672	690	705	720
6	3	346	392	401	405	435	425	601	620	635	655	670	685
7	3	348	396	402	407	420	427	605	627	645	662	682	690
8	3	350	400	405	411	421	431	614	638	655	672	686	702
9	3	361	402	409	417	417	438	620	643	662	680	695	710
10	3	370	409	411	422	422	441	629	650	668	685	700	715
11	4	347	392	401	407	417	435	602	616	632	652	668	682
12	4	351	391	403	409	419	437	607	623	642	659	680	688
13	4	350	397	408	412	415	446	612	635	652	669	682	700
14	4	360	398	412	416	416	452	621	640	660	677	692	708
15	4	370	404	419	424	424	458	629	646	665	682	698	713
16	5	350	384	398	401	411	431	603	613	629	650	666	680
17	5	355	386	399	407	417	433	610	620	639	657	678	685
18	5	362	391	404	410	419	440	615	633	650	667	680	698
19	5	370	397	408	415	415	447	620	637	657	675	690	706
20	5	372	404	412	417	417	452	630	643	662	680	696	710
21	6	348	380	394	398	401	426	604	610	627	648	664	678
22	6	350	387	393	400	400	429	613	617	636	655	674	682
23	6	355	397	401	403	403	435	619	630	647	665	680	695
24	6	361	400	403	409	409	441	624	635	655	672	688	703
25	6	370	407	407	413	413	446	631	640	659	677	692	709

Tab.3.6.Characteristicile mecanice (A₅ și Z).

Nr. crt.	d [mm]	A ₅ , [%]						Z, [%]					
		Consum specific de microrăcitori, [kg/t]											
		0	1	1,5	2	3	4	0	1	1,5	2	3	4
1	2	22	26	28	30	32	35	45	55	57	59	61	63
2	2	23	27	29	31	33	36	47	57	59	61	63	65
3	2	25	29	31	33	35	38	49	59	61	63	65	67
4	2	24	28	30	32	34	39	51	61	63	65	67	69
5	2	27	31	33	35	37	40	53	63	65	67	69	71
6	3	21	25	27	29	31	34	46	54	56	58	60	62
7	3	24	26	28	30	32	35	47	56	58	60	62	64
8	3	22	28	30	32	34	37	49	58	60	62	64	66
9	3	23	27	29	31	33	38	52	60	62	64	66	68
10	3	23	30	32	34	36	39	50	62	64	66	68	70
11	4	23	24	26	28	30	34	47	53	55	57	59	61
12	4	25	26	28	30	31	33	46	55	57	59	61	63
13	4	24	27	29	31	32	34	49	57	59	61	63	65
14	4	22	28	28	32	33	35	51	59	61	63	65	67
15	4	26	30	31	32	35	36	52	61	63	65	67	69
16	5	23	24	26	28	30	32	48	52	55	57	58	60
17	5	25	26	27	29	31	33	49	54	56	58	60	62
18	5	24	27	28	30	32	33	51	56	58	60	62	64
19	5	25	28	29	31	33	34	52	58	60	62	64	66
20	5	23	29	30	32	34	36	50	60	62	64	66	68
21	6	22	24	26	29	30	31	49	52	54	56	58	59
22	6	23	26	28	30	31	33	46	53	55	57	59	61
23	6	24	27	29	31	32	33	50	55	57	59	61	63
24	6	25	28	30	29	30	31	52	57	59	61	63	65
25	6	26	29	31	30	32	34	50	59	61	63	65	67

În continuare au fost efectuate studii ale microstructurii lingourilor turnate pentru a scoate în evidență forma și mărimea grăuntelui primar obținut în urma solidificării. S-a urmărit modul în care se produce solidificarea oțelului turnat atunci când în zona centrală este introdusă o anumită cantitate de microrăcitori, care produce o subrăcire importantă a oțelului lichid. Determinarea microstructurii s-a făcut conform normelor SR ISO 643/1993 referitoare la semifabricatele de oțel deformate plastic. Din probele prelevate au fost efectuate atât microstructuri cât și epruvete pentru încercări mecanice.

Caracterizarea mărimii grăuntelui s-a făcut în primă fază prin comparare cu imagini tip iar probele s-au înscris între indicii 6 – 8. În această situație numărul de grăunți pe milimetru pătrat sunt cuprinși astfel:

- indicele 6 de la 382 la 766;

- indicele 7 de la 766 la 1538;
- indicele 8 de la 1538 la 3072,

lucru acesta făcând foarte dificilă determinarea numărului de grăunți prin numărare la mărirea x100. Pentru stabilirea exactă a numărului de grăunți s-a utilizat metoda echivalării indicelui mărimii de grăunte prin modificarea măririi de lucru la x400 pentru microscop. Acest lucru a permis reducerea numărului de grăunți din câmp:

- indicele 6 de la 22 la 46;
- indicele 7 de la 46 la 94;
- indicele 8 de la 94 la 190.

Pentru studiul macro au fost luate probe în conformitate cu STAS 11961/1-83, din semifabricatele rezultate în urma deformării plastice a lingourilor experimentale. Probele pentru studiul macro s-au luat la dimensiunea \square 100 mm. S-a studiat cu precădere porozitatea centrală, porozitatea generală, pătratul de segregatie și aspectul general al secțiunii. Rezultatele analizei macro sunt prezentate în tab.3.7.

Concomitent cu probele pentru studiul macro au fost luate probe pentru studiul microscopic al structurii oțelului deformat plastic până la dimensiunea \square 100 mm. Analiza acestor probe a scos în evidență o neuniformitate structurală în cazul semifabricatelor obținute în urma deformării plastice a lingourilor turnate clasic (martor). În cazul semifabricatelor obținute din lingourile turnate cu adaos de microrăcitori a rezultat o structură cristalină uniformă din punct de vedere al dimensiunii grăuntelui. Aspectele prezentate mai sus sunt redade în fig 3.10.

Tab.3.7. Punctajele acordate probelor experimentale.

	Nr. probă	Porozitate centrală	Porozitate generală	Pătrat segregatie	Observații
Exp.	1	0	0	0	-
	2	0	0	0,5	-
	3	0,5	0,5	0	-
	4	0,5	0	0	-
	5	0	0,5	0	-
Clasic	1	1	0,5	0,5	-
	2	1	1	1	Crăpătură marginală
	3	0,5	0,5	1	Fisură centrală
	4	1	0,5	1,5	Fisură centrală
	5	1	1,5	1,5	Fisură centrală

Se observă că în cazul lingourilor turnate cu microrăcitori granulația este mai fină și constituenții metalografici uniform repartizați (fig.3.10a) în timp ce la lingourile turnate clasic structura este mai grosolană și constituenții au o repartizare neuniformă (fig.3.10b).

Deci, creșterea proprietăților de plasticitate este determinată de efectul microrăcitorilor asupra structurii în faza de solidificare prin stoparea formării dendritelor grosolane și formarea încă din această fază a unei structuri mai fine.

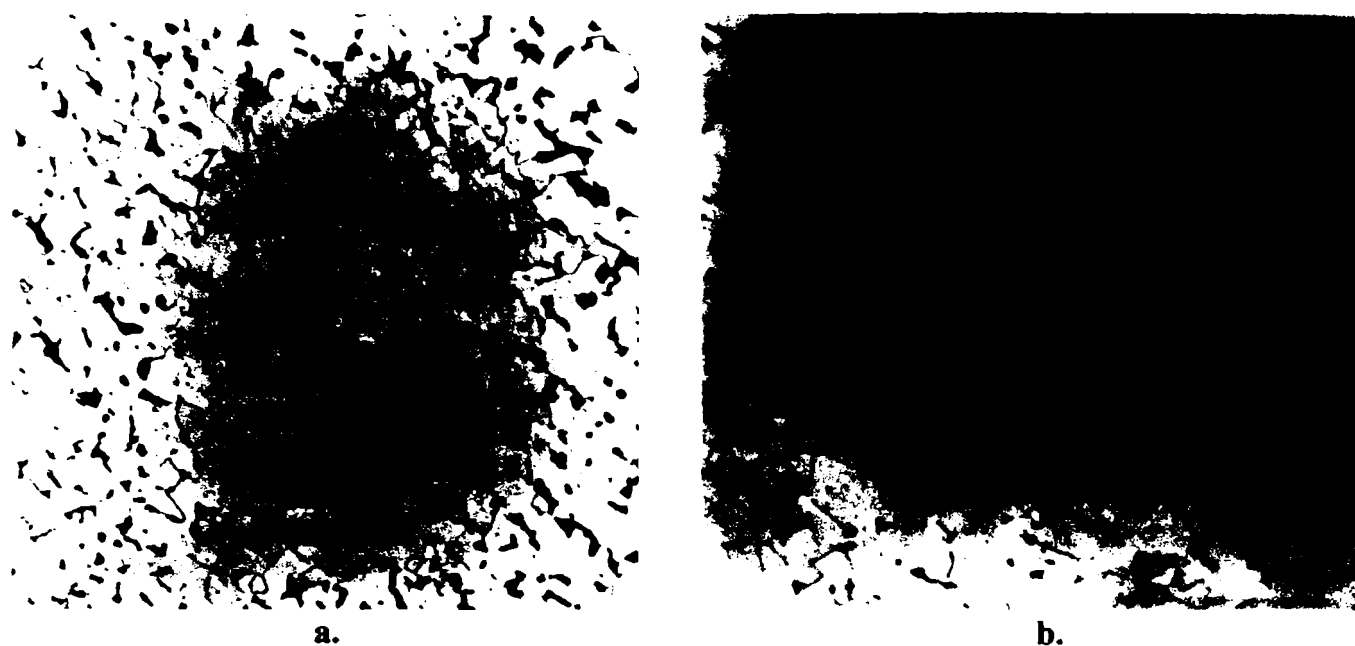


Fig.3.10. Microstructură obținută din probe, atac Nital 2%, x100:
a – cu microrăcitori; b – fără microrăcitori.

Determinarea grăuntelui cristalin a arătat legătura dintre dimensiunea acestuia și mărimea și cantitatea de microrăcitori utilizată. Este evident efectul benefic al inoculării de suprafațe de germinare în zona centrală a lingoului, care a condus la o scădere a dimensiunii grăuntelui cristalin și la o îmbunătățire a caracteristicilor mecanice.

În urma studiului la microscop al probelor metalografice s-a putut observa că în lingourile cu adaos de microrăcitori se obține o finisare a structurii grăuntelui, lucru care duce la o omogenitate chimică.

Înainte de deformarea plastică s-a efectuat un examen ultrasonic asupra lingourilor experimentale turnate. Parametrii CUS (control ultrasonic Krautkramer Bronson) sunt următorii:

- viteza de propagare 5800 m/s;
- palpator ϕ 24, 1MHz, amplificare 78dB, tip B1S-N;
- palpator ϕ 24, 2MHz, amplificare 78dB, tip B2S-N.

Controlul ultrasonic al lingourilor experimentale a scos în evidență informația confirmată și de studiul metalografic al probelor. Studiul lingoului turnat clasic, a confirmat structura grosolană, cu porozități specifică pieselor turnate. Lingourile experimentale turnate cu microrăcitori prezintă o granulație fină a structurii, la care se adaugă lipsa porozităților de turnare.

Deformarea plastică s-a realizat în cadrul secției de forjă a S.C. "Siderurgica" S.A. Hunedoara. După tăierea capatelor s-a observat o creștere a scoaterii de metal bun în favoarea lingourilor la care s-a făcut adaos de microrăcitori (tab. 3.8).

Tab.3.8.

Nr. crt.	Nr. sariă	Marca	Scoateri de metal, [%]	
			Turnat clasic	Turnat cu microrăcitori

S-a remarcat, în urma studierii datelor obținute pentru caracteristicile mecanice:

- creșterea sensibilă a tuturor caracteristicilor mecanice ($R_{p0.2}$, R_m , A_5 , Z), în special o creștere a celor de plasticitate în medie cu 15 – 30%;
- o omogenitate semnificativă a valorilor caracteristicilor mecanice.

Pentru a scoate în evidență factorii care au condus la creșterea scoaterii și a valorilor pentru caracteristicile fizico-mecanice s-a studiat structura probelor cu microrăcitori în diferite variante de adaos a microrăcitorilor și a probelor din lingourile turnate clasic, observându-se că la lingourile cu microrăcitori granulația este mai fină și constituenții metalografici uniform repartizați în timp ce la lingourile obișnuite structura este mai grosolană și constituenții au o repartizare neuniformă. Deci, creșterea proprietăților de plasticitate este determinată de efectul microrăcitorilor asupra structurii în faza de solidificare prin stoparea formării dendritelor grosolane și formarea încă din această fază a unei structuri mai fine.

Modul de dizolvare și acțiunea microrăcitorilor în masa de oțel a fost urmărită pe probele din șarjele experimentale studiate și prin control ultrasonic, rezultând că semifabricatele obținute corespund din acest punct de vedere.

Realizarea lingourilor de oțel cu structură cristalină îmbunătățită prin adaosuri de microrăcitori s-a făcut din dorința de a asigura o bază de date și concluzii pentru lingourile mari de oțel, cu masă mai mare de 10t, deformate plastic prin forjare. Pe plan mondial, pentru realizarea produselor cu destinație specială este utilizat tot mai frecvent fluxul tehnologic compus din turnare lingou-forjare.

3.3. Prelucrarea și interpretarea rezultatelor experimentale

Prin analiză de regresie cu ajutorul programelor EXCEL și MATLAB au fost obținute curbele de regresie care redau variația caracteristicilor mecanice în funcție de parametrii tehnologici de turnare. S-au utilizat pentru comparație datele obținute în cazul turnării lingourilor în mod clasic prezentate anterior.

S-au obținut ecuații de corelație neliniară (polinomială de gradul II, III și IV) între parametrii dependenți (caracteristicile mecanice - $R_{p0.2}$, R_m , A_5 , Z) și parametrii independenți (consumul specific de microrăcitori respectiv diametrul acestora). S-au reprezentat grafic corelațiile polinomiale de gradul II și III, deoarece am considerat că sunt suficiente pentru o apreciere bună a fenomenelor tehnologice și de asemenea am avut în vedere faptul că, valorile pentru coeficienții de corelație la ecuațiile polinomiale de gradul II și IV respectiv la ecuațiile exponențiale sau logaritmice sunt foarte apropiate de cele prezentate, iar grafic curbele de corelație de cele mai multe ori se suprapun.

Având în vedere forma analitică mai simplă pentru corelațiile polinomiale de gradul II sau III în comparație cu cele exponențiale sau logaritmice, este de preferat să se lucreze mai mult cu acestea, dacă, coeficienții de corelație au valori apropiate. Astfel în fig.3.11 se prezintă variația limitei de curgere, în fig.3.12 variația rezistenței la tracțiune, în fig.3.13 variația alungirii procentuale după rupere iar în fig.3.14 variația coeficientului de gătuire în funcție de consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora.

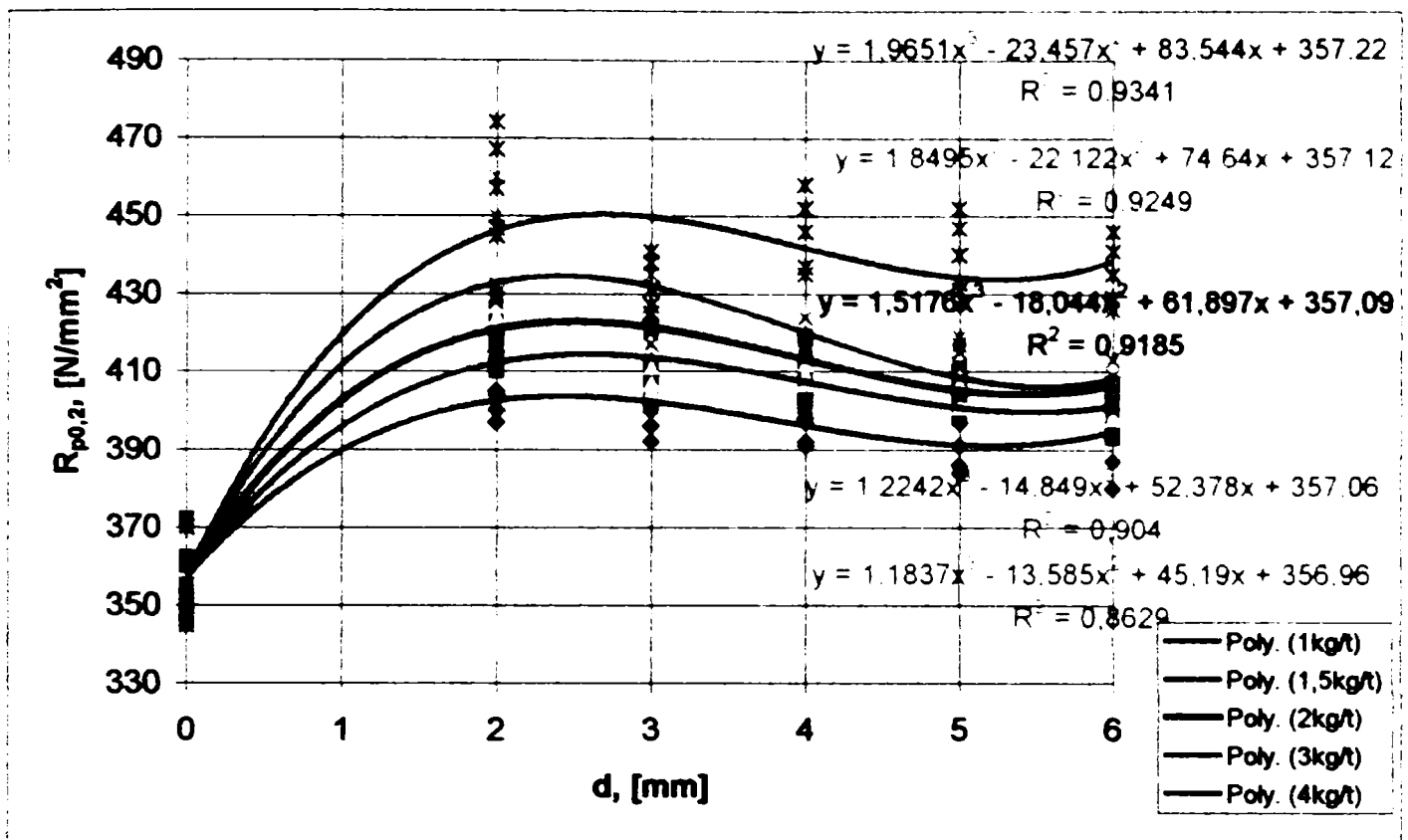


Fig.3.11. Variația limitei de curgere ($R_{p0.2}$) în funcție de consumul specific de microrăcitori (m - kg/t) și diametrul acestora (d).

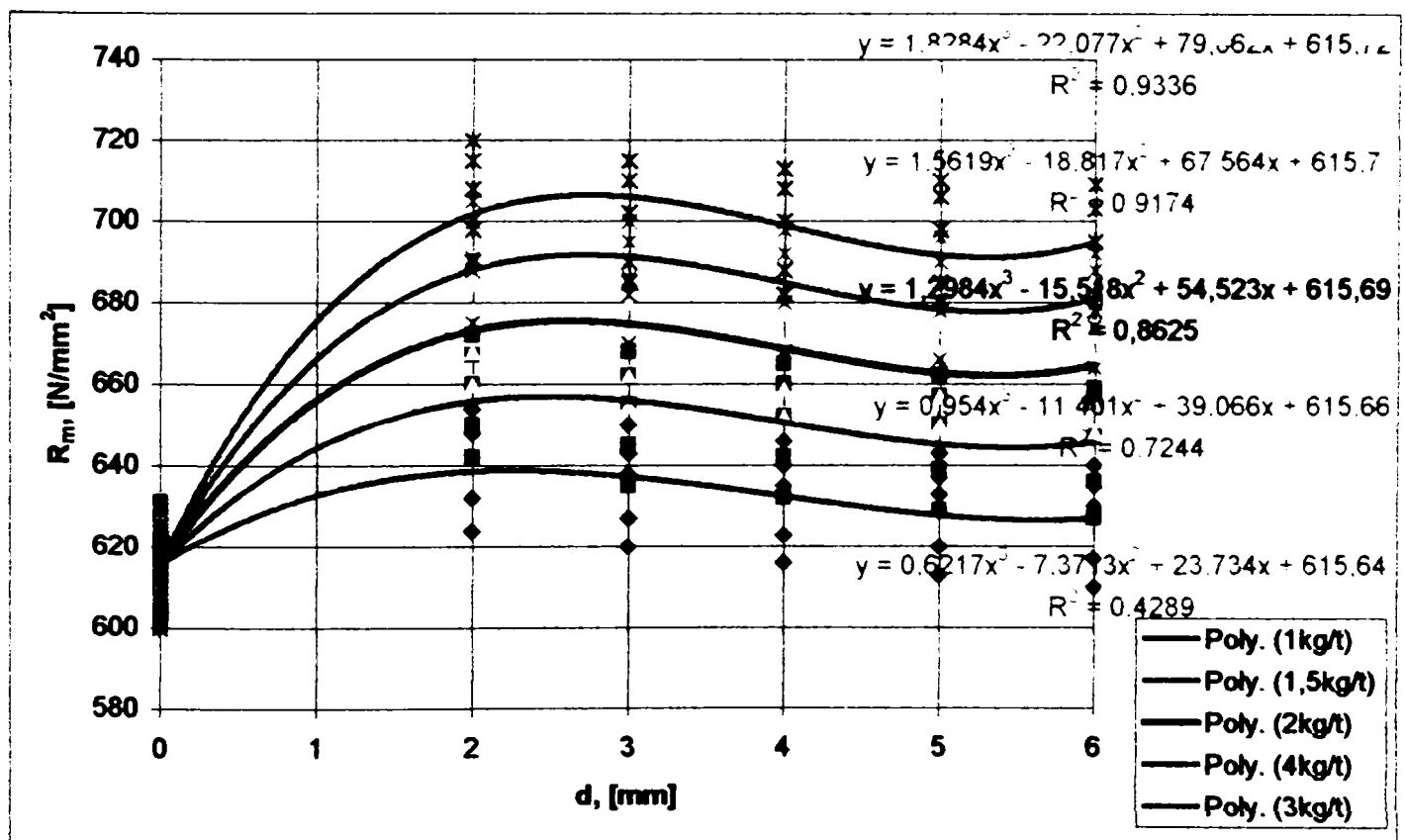


Fig.3.12. Variația rezistenței la tracțiune (R_m) în funcție de consumul specific de microrăcitori (m - kg/t) și diametrul acestora (d).

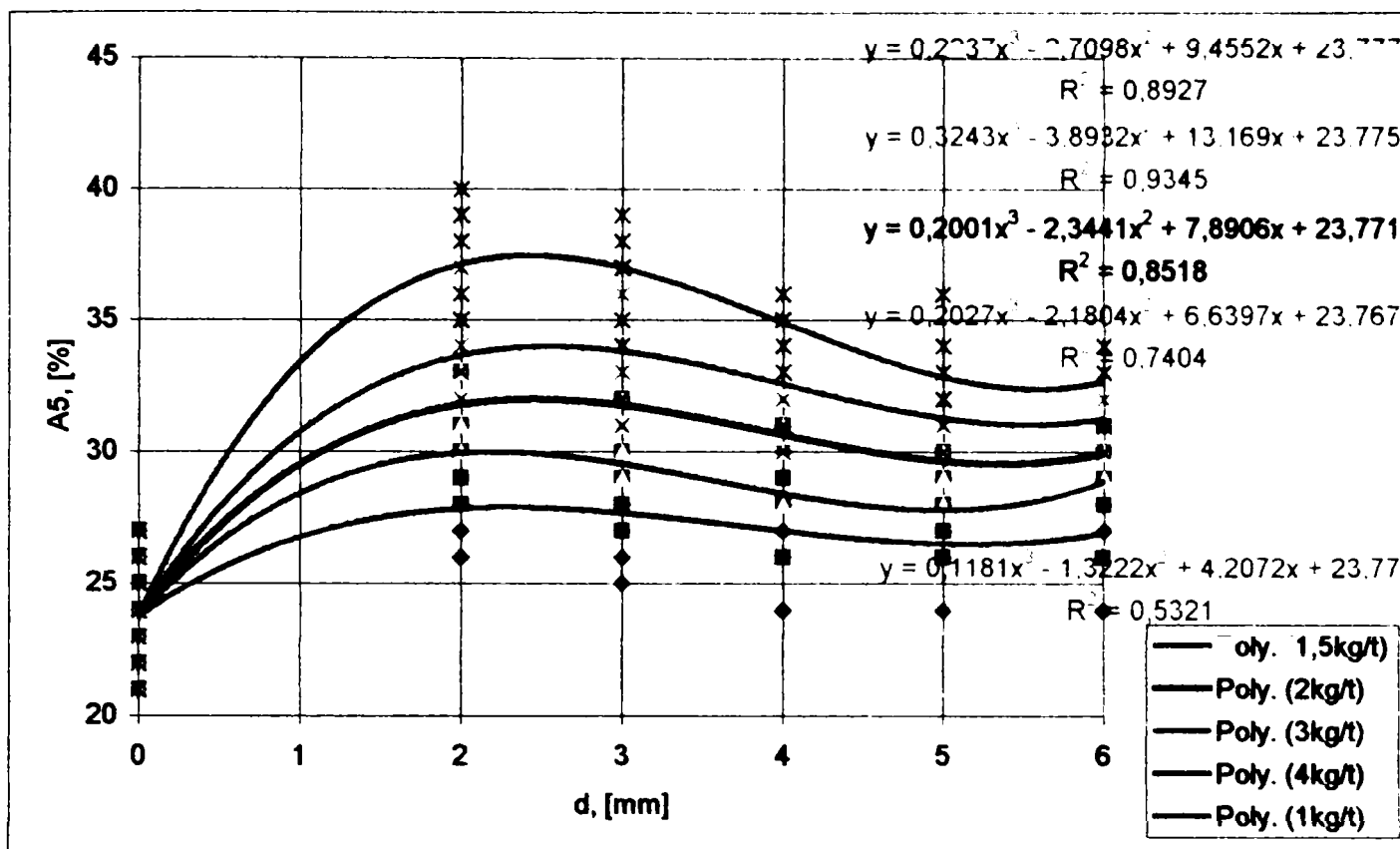


Fig.3.13. Variația alungirii procentuale după rupere (A_5) în funcție de consumul specific de microrăcitori (m - kg/t) și diametrul acestora (d).

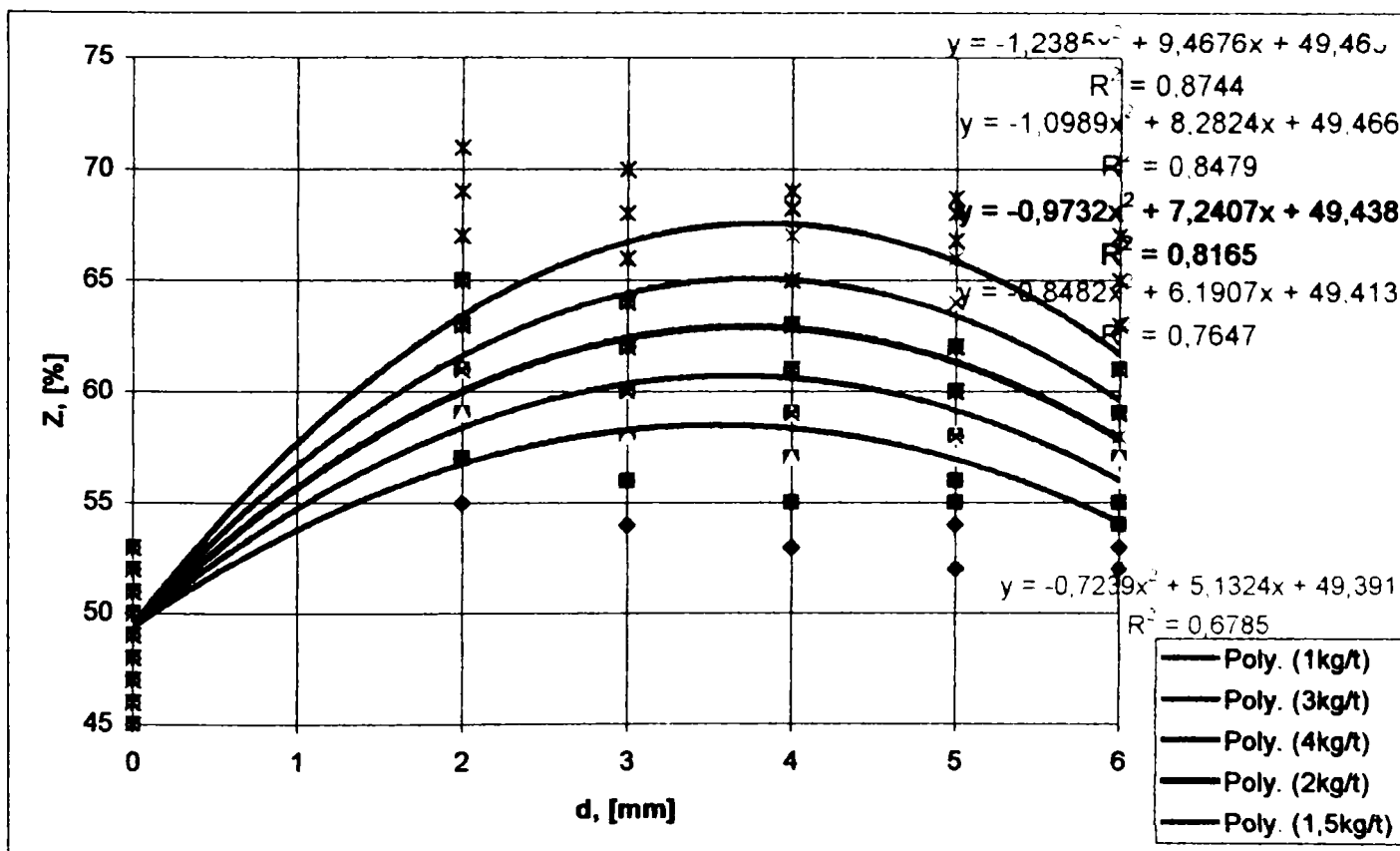


Fig.3.14. Variația coeficientului de gătuire (Z) în funcție de consumul specific de microrăcitori (m - kg/t) și diametrul acestora (d).

Din analiza diagramelor prezentate se constată următoarele:

- domeniile de variație a caracteristicilor mecanice în funcție de consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora, sunt bine delimitate în toate cazurile, se observă că se obțin valori optime ale caracteristicilor studiate pentru diametrele microrăcitorilor în limitele 3-5mm respectiv pentru consumul specific de microrăcitori cuprins între 2-4 kg/t;

- pentru ecuațiile stabilite coeficienții de corelație variază în limite destul de mari, de la $R = 0,4289$ la $R = 0,9341$, predominând valorile $0,8165 < R < 0,9249$, astfel încât având în vedere datele din literatura de specialitate [63, 64, 65], considerăm că aceste ecuații și respectiv reprezentări grafice sunt semnificative;

- există o corelație semnificativă între parametrii care caracterizează adaosul de microrăcitori și caracteristicile calitative ale oțelului;

- cunoașterea ecuațiilor și curbelor de corelație permit determinarea mai precisă a influenței consumului specific de microrăcitori și a diametrului acestora asupra valorilor caracteristicilor mecanice obținute precum și optimizarea acestora în sensul îmbunătățirii calității pieselor obținute;

- se observă o creștere a proprietăților de rezistență și de plasticitate în special obținându-se o creștere a celor de plasticitate cu 15 – 30%;

- pentru aceeași cantitate de microrăcitori se constată o îmbunătățire a caracteristicilor, atât a celor de rezistență cât și de plasticitate o dată cu creșterea diametrului până la circa 3-5 mm, unde se atinge o valoare maximă după care urmează o ușoară scădere. Creșterea este mult mai pronunțată comparativ cu scăderea acestor caracteristici (partea I și partea II a curbelor). Acest fenomen se poate explica prin faptul că o creștere a diametrului microrăcitorilor până la 2 mm asigură o microrăcire suficient de mare în microvolumen astfel încât să poată avea loc germinarea (cu număr foarte mare de centri de cristalizare). Creșterea diametrului microrăcitorilor conduce și la o scădere a numărului de microrăcitori care la rândul ei va determina o scădere a centrilor de cristalizare pe de o parte iar pe de altă parte există riscul nedizolvării în întregime a microrăcitorilor în oțel;

- se constată că indiferent de diametrul microrăcitorilor o creștere a cantității adăugate conduce la o îmbunătățire a caracteristicilor de rezistență și de plasticitate. Această creștere este pronunțată în intervalul 2 – 4 kg/t.

Prin prelucrarea datelor obținute în urma experimentărilor efectuate utilizând programul propriu SIDHD 3 și programul MATLAB am obținut o serie de ecuații de corelație multiplă, între parametrii dependenți: rezistența la tracțiune (R_m , [N/mm²]), limita de curgere aparentă ($R_{p0,2}$, [N/mm²]), alungirea procentuală după rupere (A_5 , [%]) și coeficientul de gătuire (Z , [%]) și doi parametri independenți: dimensiunile microrăcitorilor (d , [mm]) și cantitatea specifică de microrăcitori (m , [kg/t]), conform modelului matematic prezentat în anexa 3.1.

În fig.3.15 – 3.18 sunt prezentate corelațiile tridimensionale între caracteristicile mecanice (limita de curgere aparentă, rezistența la tracțiune, alungirea procentuală după rupere, coeficientul de gătuire), consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora, respectiv curbele de contur.

Ecuția suprafeței de regresie pentru $R_{p0,2}$ este:

$$R_{p0,2} = -3,4286 \cdot m^2 + 3,0205 \cdot d^2 + 3,5931 \cdot md + 18,2044 \cdot m - 19,9893 \cdot d + 403,4533 \quad (3.6)$$

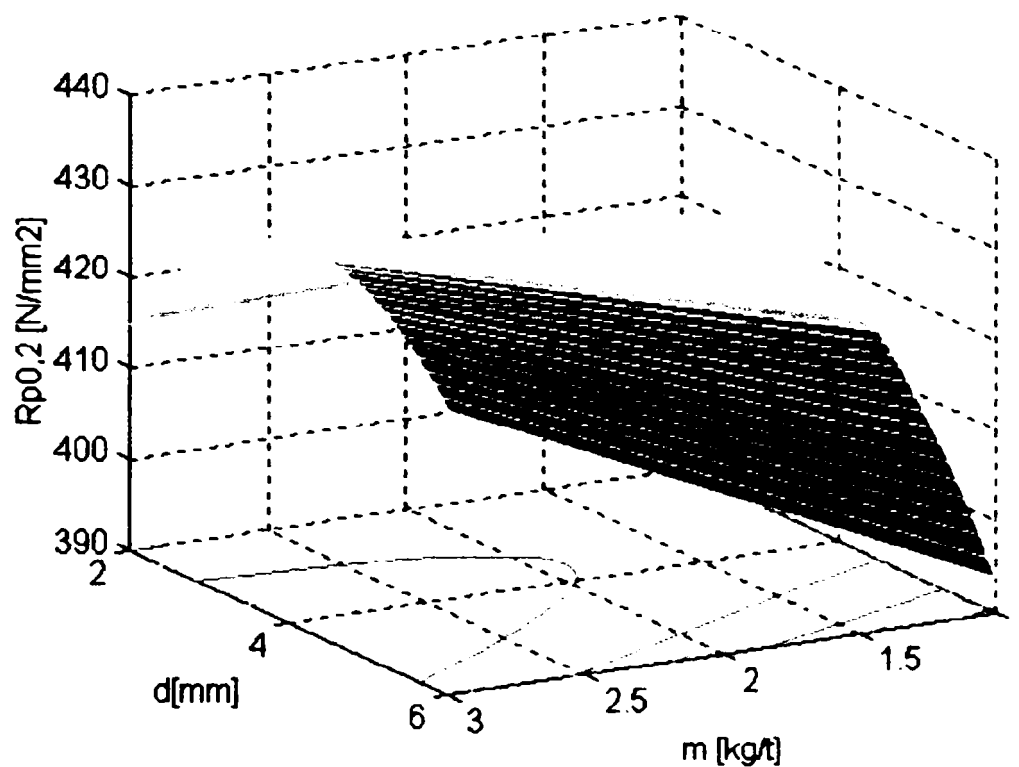


Fig. 3.15. Variația $R_{p0,2}$, în funcție de consumul de microrăcitori (m) și diametrul acestora (d).

Ecuția suprafeței de regresie pentru R_m este:

$$R_m = 2,4143 \cdot m^2 - 2,7045 \cdot d^2 - 1,6603 \cdot md - 15,6755 \cdot m + 32,6294 \cdot d + 660,6762 \quad (3.7)$$

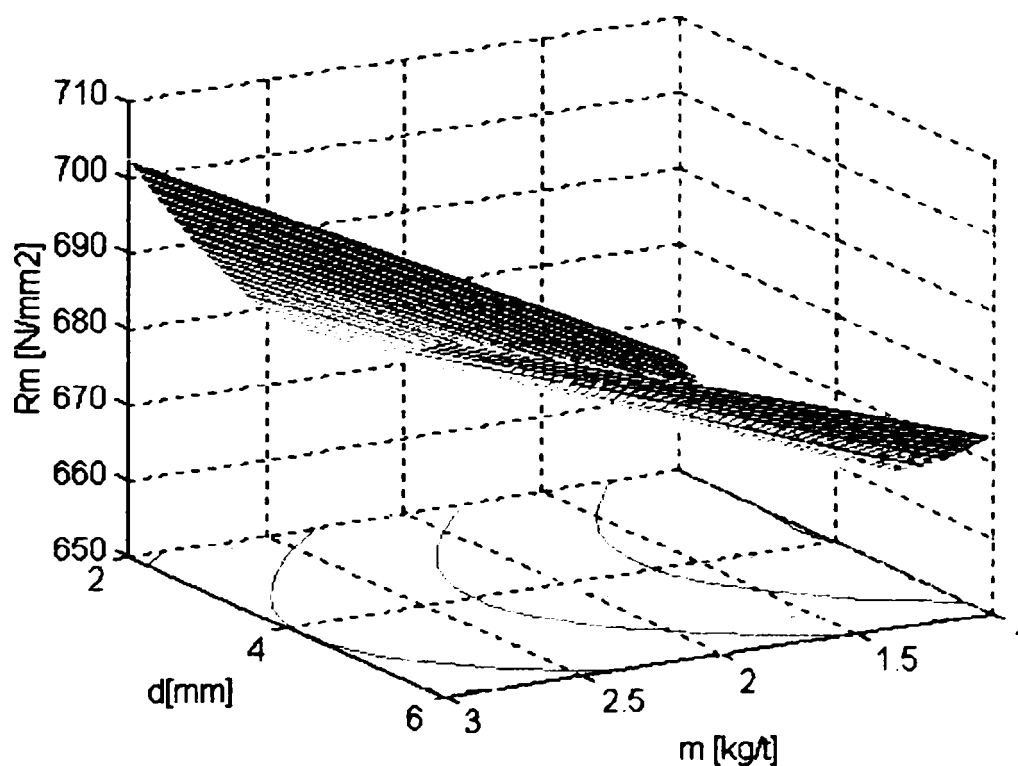


Fig. 3.16. Variația R_m , în funcție de consumul de microrăcitori (m) și diametrul acestora (d).

Ecuția suprafeței de regresie pentru A_5 este:

$$A_5 = -0,0714 \cdot m^2 - 0,2192 \cdot d^2 - 0,2948 \cdot md + 0,3895 \cdot m + 4,6139 \cdot d + 26,5619 \quad (3.8)$$

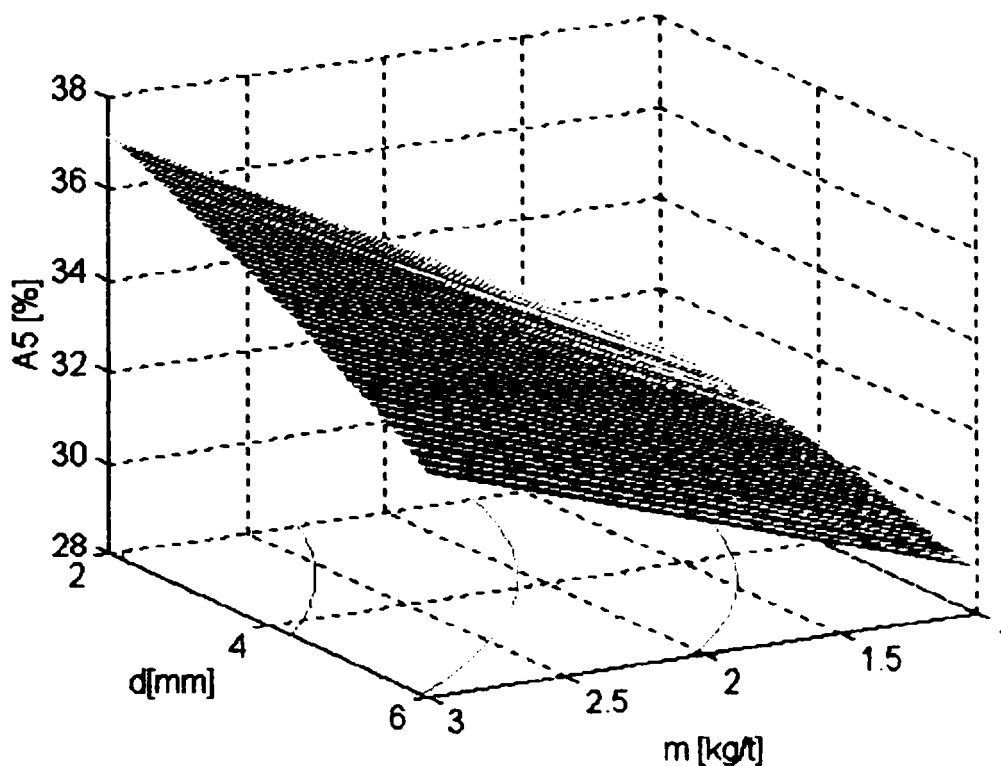


Fig. 3.17. Variația A_5 , în funcție de consumul de microrăcitori (m) și diametrul acestora (d).

Ecuția suprafeței de regresie pentru Z este:

$$Z = 0,100 \cdot m^2 - 0,5309 \cdot d^2 + 0,0293 \cdot md - 1,6474 \cdot m + 5,1384 \cdot d + 61,0061 \quad (3.9)$$

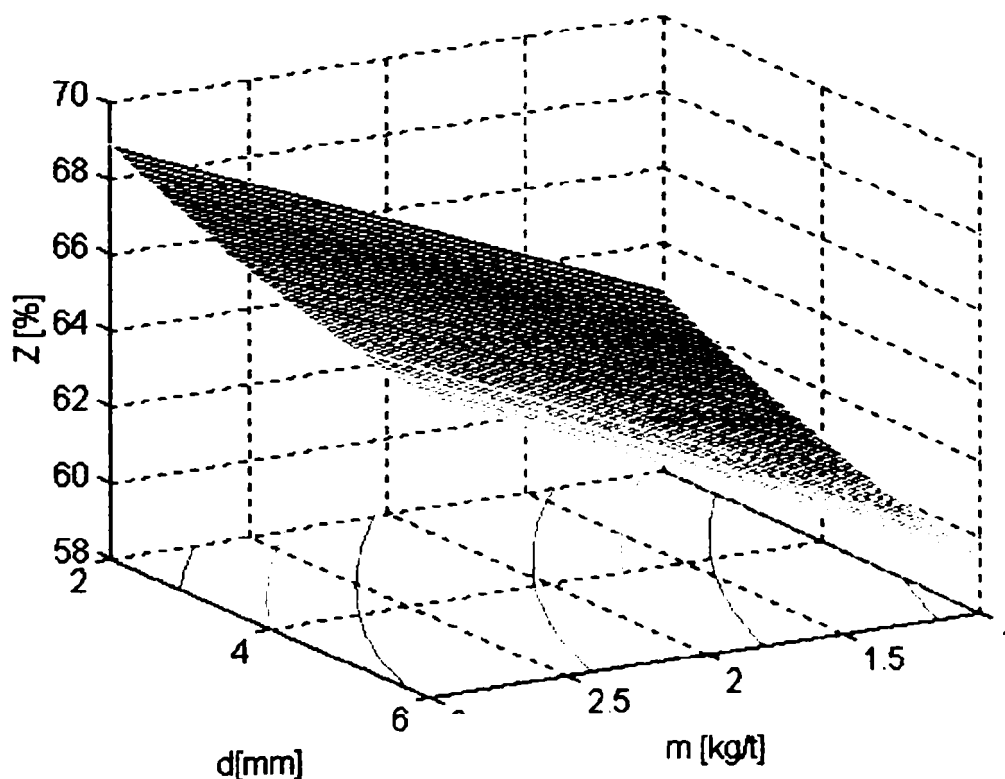


Fig. 3.18. Variația Z , în funcție de consumul de microrăcitori (m) și diametrul acestora (d).

Pentru fiecare ecuație se prezintă în anexa 3.2 valorile medii ale parametrilor urmăriți, dispersia, abaterea standard, valorile pentru punctul staționar (punct de maxim și punct de minim), valoarea coeficientului de corelație și valoarea pentru eroarea standard.

Din analiza ecuațiilor de corelație exprimate sub formă analitică și mai ales sub formă grafică rezultă o serie de observații și concluzii, atât cu caracter general, cât și specific, astfel:

- variația parametrilor independenți în limitele tehnologice, determină și pentru parametrul dependent de asemenea tot o variație în limitele tehnologice, cu situarea acestuia pe o suprafață sau în vecinătatea acesteia având în vedere, dispersia, abaterea și eroarea standard;

- reprezentările grafice sunt suprafețe care prezintă ca punct staționar, punct șea, coordonatele acestora se situează uneori în limitele tehnologice de variație pentru parametrii independenți, respectiv în limitele prevăzute de standarde pentru parametrul dependent, iar uneori destul de departe de limitele tehnologice, sau chiar în domeniul în care valorile parametrilor nu au sens tehnologic;

- prin intersectarea suprafețelor de corelație cu plane de nivel (paralele cu planul orizontal) s-au obținut curbele de nivel, acestea permițând stabilirea limitelor de variație a parametrilor independenți pentru a obține o anumită valoare pentru parametrul dependent, constatându-se că există limite de variație mai mari pentru parametrii independenți în apropierea punctului staționar, mai ales în cazul existenței punctului șea.

Creșterea caracteristicilor calitative cu creșterea cantității de microrăcitor (m , [kg/t]), se justifică din punct de vedere al proceselor fizico-chimice prin intensificarea proceselor de subrăcire în microvolumuri mici și o creștere a numărului de centre de cristalizare, obținând o structură de turnare mai fină (grăunți mai mici) precum și o reducere importantă a gradului de segregare.

De asemenea, s-a remarcat, în urma studierii variației curbelor pentru caracteristicile mecanice determinate următoarele: o creștere sensibilă a tuturor caracteristicilor mecanice ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 , și Z) cu aproximativ 15 - 30% respectiv o omogenitate semnificativă a valorilor acestora.

3.4. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost prezentate cercetările experimentale și concluziile proprii, referitoare la posibilitățile de îmbunătățire a structurii lingourilor mari din oțel prin intervenția asupra zonei centrale a acestora, și anume adaosuri de microrăcitori sub formă de granule la turnarea oțelului, care să favorizeze germinarea eterogenă. Lucrarea abordează experimentările plecând de la ideea că proprietățile mecanice reprezintă funcția de performanță de răspuns a îmbunătățirii structurii lingoului din oțel, orice intervenție în scopul îmbunătățirii structurii trebuie să se regăsească în creșterea valorii proprietăților mecanice și a scoaterii de metal bun. Experimentările au urmărit demonstrarea practică a îmbunătățirii proprietăților pieselor obținute din lingourile turnate cu adaos de microrăcitori, comparativ cu cele obținute clasic.

Cercetările experimentale au fost realizate în fază de laborator în cadrul Halei Tehnologice a Facultății de Inginerie Hunedoara, respectiv în fază industrială în cadrul Oțelăriei Electrice de la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara.

În urma analizei și prelucrării rezultatelor experimentale au rezultat următoarele concluzii:

1. La lingourile turnate cu microrăcitori, comparativ cu lingourile turnate classic, se obține o îmbunătățire a calității prin creșterea caracteristicilor mecanice.

2. Studiul microstructurii a scos în evidență dependența dintre dimensiunea grăuntelui cristalin și limita de curgere. Se poate afirma, cu datele obținute, că germinarea eterogenă, favorizată în zona centrală de microrăcitori, a condus în cazul probelor experimentale la scăderea porozității centrale și generale respectiv la obținerea unei structuri uniforme a grăuntelui cristalin.

3. Structura de turnare este mai fină în cazul lingourilor cu adaos de microrăcitori în comparație cu structura lingourilor turnate clasic. Astfel, structura lingourilor turnate clasic este specifică pieselor turnate în care găsim grăunți cristalini mari și alungiți în direcția pierderii de căldură, iar în cazul lingourilor turnate cu microrăcitori se observă o globulizare a grăunților cristalini concomitent cu micșorarea acestora, micșorarea grăunților cristalini în cazul lingourilor experimentale poate fi explicată prin cedarea unei cantități de căldură din oțelul lichid microrăcitorilor;

4. La lingourile turnate cu microrăcitori s-a obținut o aplatizare a formei retasurii și reducerea pe această cale a volumului acesteia, având ca efect o creștere substanțială a scoaterii de metal. Creșterea scoaterii (8-10%) s-a dovedit a fi direct proporțională cu reducerea temperaturii de turnare și creșterea cantității de microrăcitori administrați;

5. În cazul lingourilor experimentale s-a obținut o reducere a gradientului de temperatură în intervalul de solidificare a oțelului de 1,5 - 2 ori și o mai bună uniformizare a acestuia pe secțiunea lingourilor, respectiv o creștere a proprietăților de rezistență și de plasticitate cu 15-30% ;

6. Prin analiză de regresie cu ajutorul programului MS EXCEL 2000 au fost obținute ecuațiile de corelație și curbele de regresie care redau variația caracteristicilor mecanice ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 , Z) în funcție de parametri tehnologici specifici turnării oțelurilor cu microrăcitori (consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora);

7. Cu ajutorul programului SIDHD3 au fost obținute corelații tridimensionale între caracteristicile mecanice, consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora. De asemenea, au fost prezentate curbele de contur pentru aceste suprafețe. Prin intermediul acestor curbe se poate determina consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora pentru valori ale caracteristicilor mecanice în anumite limite dorite.

8. Domeniile de variație a caracteristicilor mecanice în funcție de consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora, sunt bine delimitate în toate cazurile, se observă că se obțin valori optime ale caracteristicilor studiate pentru un consum specific de microrăcitori în limitele 2 – 4 kg/t cu diametrul în intervalul 3-5 mm;

9. Cunoașterea ecuațiilor și curbelor de corelație respectiv a suprafețelor permite determinarea mai precisă a influenței consumului specific de microrăcitori și a diametrului acestora asupra valorilor caracteristicilor mecanice obținute precum și optimizarea acestora în sensul îmbunătățirii calității produselor obținute prin prelucrare plastică;

10. În urma utilizării acestor metode de dirijare a solidificării lingourilor mari din oțel, se obțin o serie de avantaje tehnico-economice în industria metalurgică, și anume:

- micșorarea volumului retasurii, conducând la o creștere a scoaterii de metal;
- micșorarea temperaturii de turnare;
- optimizarea procesului de solidificare;
- asigurarea unei omogenități a proprietăților mecanice și în același timp o creștere a acestora;
- reducerea semnificativă a cantității de oțel rebutat datorită contractiei și a reducerii susceptibilității la fisurare;

11. Rezultatele cercetării fundamentale și concluziile acumulate în cadrul acestor experimentări constituie baza realizării scopului final al tezei și anume, confirmarea rezultatelor obținute prin modelare în cadrul proceselor de dirijare a solidificării lingourilor mari din oțel.

CAPITOLUL 4**MODELAREA MATEMATICĂ A FACTORILOR DE INFLUENȚĂ ASUPRA CALITĂȚII OȚELURILOR**

Dezvoltarea industriei metalurgice impune introducerea unor instrumente de analiză de mare eficiență, care să permită într-o perioadă minimă parcurgerea drumului de la cercetare la producția de bunuri materiale [66]. Modelarea proceselor constituie astfel un instrument de bază util atât în faza de concepție cât și în cea de analiză a funcționării instalațiilor metalurgice. Combinată cu utilizarea calculatoarelor, modelarea proceselor permite determinarea regimurilor optime ale proceselor metalurgice.

Modelul matematic este elementul de bază în conducerea cu calculatorul a proceselor tehnologice și de aceea exactitatea și obiectivitatea s-a condiționează conducerea corectă și cu eficacitate tehnico-economică corespunzătoare. Dar nu întotdeauna modelele matematice sunt suficient de perfecționate astfel încât să prezinte garanția necesară că în urma aplicării se va obține rezultatul optim, din acest motiv, îmbunătățirea situației unei probleme analizate la un moment dat constituie pentru momentul studiului tot o optimizare. De aceea, noțiunea de optim capătă o dublă semnificație, definitivă și relativă, în raport cu nivelul posibilităților modelului matematic utilizat.

Metodele cunoscute, utilizate în vederea obținerii datelor asupra solidificării și răcirii lingourilor se pot diviza în următoarele categorii [67]:

- metode experimentale;
- metode de modelare fizică;
- metode de modelare matematică.

Metodele experimentale sunt bazate pe măsurători efectuate asupra lingoului și lingotierei, dintre care cele mai utilizate sunt legate de modificarea fluxului termic începând cu interiorul lingoului, prin intermediul lingotierei și mediul înconjurător.

Având în vedere dificultățile experimentale care apar la efectuarea măsurătorilor și cheltuielilor ridicate s-au dezvoltat numeroase metode de modelare fizică, astfel transmiterea de căldură în lingou se modelează prin răcirea unor lichide respectiv modelarea analogică cea mai utilizată fiind cea electrică.

Modelarea matematică a fenomenului de solidificare și răcire a lingourilor se bazează pe reprezentarea matematică a acestui fenomen. Pentru a defini transmiterea de căldură în lingou și lingotieră este necesară cunoașterea condițiilor inițiale, legea de variație a fluxului de căldură lingou-lingotieră respectiv a fluxului de căldură lingotieră mediu ambiant. Unele condiții limită se pot ușor schematiza, altele însă conduc la sisteme de ecuații, care nu au fost soluționate până în prezent pe cale analitică.

4.1. Contribuții privind modelarea solidificării lingourilor în cazul utilizării de microrăcitori

În situația în care microrăcitorii sunt repartizați uniform, se creează premiza, apariției germenilor de solidificare și în interiorul lingoului, simultan cu solidificarea declanșată de la suprafața de separație a oțelului cu mediul înconjurător (lingotieră, mediul gazos de deasupra).

Metoda de turnare cu microrăcitori se recomandă în special pentru turnarea lingourilor mari din oțel care au tendința cea mai mare de formare a unor defecte de turnare, cum sunt: segregările, microretasurile, retasurile, porozitățile axiale și crăpăturile la cald [68].

Procesul de cristalizare a oțelurilor cu germeni exogeni introduși prin intermediul microrăcitorilor diferă substanțial de cel al oțelurilor turnate obișnuit. În urma analizei condițiilor în care se formează germenii de cristalizare exogeni, pot exista trei situații, și anume:

- microrăcitorii preiau parțial supraîncălzirea oțelului, în acest caz se consideră că aceștia nu determină apariția centrilor de cristalizare;
- microrăcitorii elimină complet supraîncălzirea oțelului și se atinge temperatura de început de cristalizare, caz în care aceștia determină apariția multor centri de cristalizare;
- microrăcitorii determină scăderea temperaturii oțelului sub temperatura lichidus, aceștia se topesc parțial devenind centri de cristalizare.

Ca urmare, microrăcitorii introduși în aliajul lichid în timpul turnării preiau căldura de supraîncălzire și o parte din căldura de solidificare iar o parte din aceștia rămân în aliajul lichid ca germeni de cristalizare. Pentru obținerea efectului dorit, trebuie ca microrăcitorii să fie uniform distribuiți în masa de oțel lichid, astfel ca zonele de acțiune și de subrăcirii create de fiecare microrăcitor să se suprapună parțial sau să fie tangente.

Desfășurarea proceselor fizico-chimice între microrăcitori și oțelul lichid prezintă o importanță deosebit de mare și au un caracter complex, motiv pentru care cu greu se stabilesc unele relații matematice.

Microrăcitorii utilizați în vederea dirijării procesului de solidificare trebuie să îndeplinească următoarele condiții [69]:

- 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 vederea corelării optime a factorilor tehnologici se impune stabilirea parametrilor de bază ai metodei de turnare cu microrăcitori, și anume: determinarea cantității optime de microrăcitori respectiv a duratei de topire a acestora și a temperaturii oțelului.

Pentru ușurarea calcului se folosesc ipoteze simplificatoare, și anume: se consideră că microrăcitorii se distribuie uniform în masa de oțel lichid și au formă sferică respectiv în timpul introducerii acestora în lingotieră încetează schimbul de căldură între oțel și aceasta.

Durata de topire a microrăcitorilor depinde de următorii factori: temperatura de turnare a oțelului (T_t), temperatura lichidus a oțelului (T_l), dimensiunea medie a microrăcitorilor (r) respectiv consumul specific de microrăcitori (m , kg/t).

Timpul de topire a microrăcitorilor (t) este compus din timpul de preîncălzire a microrăcitorilor până la temperatura lichidus a oțelului (t_1) respectiv timpul de topire a microrăcitorilor la această temperatură (t_2):

$$t = t_1 + t_2, [s] \quad (4.1)$$

Ecuția de bilanț termic pentru calculul duratei de preîncălzire a microrăcitorilor:

$$\alpha \cdot (T_o - T_{mr}) \cdot A_{mr} \cdot dt_1 = V_{mr} \cdot \rho_{mr} \cdot c_{mr} \cdot dT_{mr} \quad (4.2)$$

în care: α este coeficientul de schimb de căldură, în $W/m^2 \cdot ^\circ C$;

T_o – temperatura oțelului în timpul încălzirii microrăcitorilor, în $^\circ C$;

T_{mr} – temperatura microrăcitorilor în timpul încălzirii, în $^\circ C$;

A_{mr} – suprafața microrăcitorilor, în m^2 ;

V_{mr} – volumul microrăcitorilor, în m^3 ;

ρ_{mr} – densitatea microrăcitorilor, în kg/m^3 ;

c_{mr} – căldura specifică a microrăcitorilor, în $J/kg \cdot ^\circ C$.

Coeficientul de schimb de căldură se calculează cu relația [69]:

$$\alpha = 0,135 \cdot \lambda \cdot \sqrt[3]{\frac{\beta \cdot g \cdot \Delta T}{\nu \cdot a}} \quad (4.3)$$

în care: λ este conductivitatea oțelului lichid, în $W/m \cdot ^\circ C$;

β - coeficientul de dilatare volumetrică, $1/^\circ C$;

g – accelerația gravitațională, în m/s^2 ;

$\Delta T = T_o - T_{mr}$ – căderea de temperatură, în $^\circ C$;

ν - coeficientul de vâscozitate cinematică, în m^2/s ;

a – coeficientul de difuzivitate termică, în m^2/h .

Pentru calculul temperaturii oțelului (T_o) se utilizează ecuația de bilanț termic între oțelul lichid și microrăcitori:

$$M \cdot c \cdot (T_t - T_o) = M_{mr} \cdot c_{mr} \cdot T_{mr} \quad (4.4)$$

unde: M este masa de oțel lichid, în kg;

c – căldura specifică a oțelului, în $J/kg \cdot ^\circ C$;

T_o – temperatura oțelului în timpul încălzirii microrăcitorilor, în $^\circ C$;

T_{mr} – temperatura microrăcitorilor în timpul încălzirii, în $^\circ C$;

T_t – temperatura de turnare a oțelului, în $^\circ C$.

c_{mr} – căldura specifică a microrăcitorilor, în $J/kg \cdot ^\circ C$;

M_{mr} – masa microrăcitorilor, în kg;

$$\text{iar, } M_{mr} = M \frac{m}{1000} \quad (4.5)$$

în care m reprezintă consumul specific de microrăcitori, în kg/t.

Înlocuind relația (4.5) în relația (4.4) rezultă temperatura oțelului în timpul preîncălzirii microrăcitorilor:

$$T_o = T_t - \frac{m \cdot c_{mr} \cdot T_{mr}}{1000 \cdot c} \quad (4.6)$$

Temperatura oțelului în timpul preîncălzirii microrăcitorilor până la temperatura lichidus se determină cu relația:

$$T_o = T_i - \frac{m \cdot c_{mr} \cdot T_i}{1000 \cdot c} \quad (4.7)$$

Introducând relația (4.3) și (4.6) în ecuația de bilanț (4.2) se obține:

$$dt_1 = \frac{V_{mr} \cdot \rho_{mr} \cdot c_{mr}}{A_{mr} \cdot 0,135 \cdot \lambda} \sqrt{\frac{v \cdot a}{\beta \cdot g}} \frac{dT_{mr}}{\left[T_i - T_{mr} \left(\frac{m}{1000 \cdot c} + 1 \right) \right]^3} \quad (4.8)$$

Rezolvând această ecuație rezultă durata de preîncălzire a microrăcitorilor până la temperatura lichidus, și anume:

$$t_1 = \frac{1000 \cdot r_o \cdot \rho_{mr} \cdot c_{mr} \cdot c}{\alpha(m \cdot c_{mr} + 1000 \cdot c)} \left[\sqrt{\frac{1000 \cdot T_i \cdot c_{mr}}{1000 \cdot T_i \cdot c - T_i(m \cdot c_{mr} + 1000 \cdot c)}} - 1 \right] \quad (4.9)$$

Pentru determinarea duratei de topire (t_1) a microrăcitorilor trebuie să se determine temperatura oțelului (T_o') în timpul topirii acestora. Aceasta se determină din ecuația de bilanț termic:

$$M \cdot c(T_o - T_o') = L_{mr} \cdot M_{mr} \quad (4.10)$$

unde: M este masa de oțel lichid, în kg;

c – căldura specifică a oțelului, în J/kg °C;

T_o – temperatura oțelului în timpul încălzirii microrăcitorilor, în °C;

T_o' – temperatura oțelului în timpul topirii microrăcitorilor, în °C;

M_{mr} – masa microrăcitori, în kg.

L_{mr} – căldura latentă de topire a microrăcitorilor, în J/kg.

Ținând seama de relația (4.5) se obține:

$$T_o' = T_o - \frac{L_{mr} \cdot m}{1000 \cdot c} \quad (4.11)$$

Durata de topire (t_2) se determină din ecuația de bilanț termic:

$$\alpha(T_o' - T_i) A_{mr} \cdot dt_2 = L \cdot \rho(-dV_{mr}) \quad (4.12)$$

$$\text{Notăm: } dr = \frac{dV_{mr}}{A_{mr}}$$

$$\text{Se obține astfel } dt_2 = -\frac{\rho \cdot L \cdot dr}{\alpha(T_o - T_i)} \quad (4.13)$$

Utilizând relația (4.7) și integrând obținem:

$$t_2 = \frac{r \cdot L \cdot \rho}{\alpha \left[T_i - T_i \left(\frac{m \cdot c_{mr}}{1000 \cdot c} \right) \right]} \quad (4.14)$$

După terminarea completă a topirii microrăcitorilor se produce o scădere a temperaturii aliajului la T . Pentru determinarea acestei temperaturi se scrie ecuația de bilanț termic [70]:

$$c \cdot M(T_i - T) = \frac{M}{1000} m [c_{mr} \cdot T_i + c(T - T_i) + L] \quad (4.15)$$

După efectuarea calculelor se obține următoarea relație pentru temperatura oțelului:

$$T = \frac{1000 \cdot c \cdot T_i + (m \cdot c - m \cdot c_{mr}) T_i - m \cdot L}{m \cdot c + 1000 \cdot c} \quad (4.16)$$

Ținând seama de scăderea în timp a temperaturii oțelului din oala de turnare, de ritmul turnării și de acest procent optim se poate calcula consumul specific optim de microrăcitori necesar pentru diferite tipuri de lingouri.

Dacă în relația (4.16) se simplifică cu căldura specifică a oțelului (c) se obține relația:

$$T = \frac{1000 \cdot T_i + \left(1 - \frac{c_{mr}}{c}\right) \cdot m \cdot T_i - m \frac{L}{c}}{m + 1000} \quad (4.17)$$

Dacă se utilizează următoarele valori pentru proprietățile termofizice ale oțelurilor carbon: $c = 690 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, $c_{mr} = 836 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, $L = 267776 \text{ J/kg}$ și $T_i = 1500^\circ\text{C}$ și se înlocuiesc în relația (4.17), se obține relația pentru temperatura oțelului după terminarea topirii microrăcitorilor:

$$T = \frac{1000 \cdot T_i - 705 \cdot m}{m + 1000} \quad (4.18)$$

unde: T_i este temperatura de turnare a oțelului, în $^\circ\text{C}$;

m – consumul specific de microrăcitori, în kg/t .

Cu ajutorul relației (4.18) s-a trasat nomograma din fig.4.1 care redă temperatura oțelului carbon după introducerea microrăcitorilor.

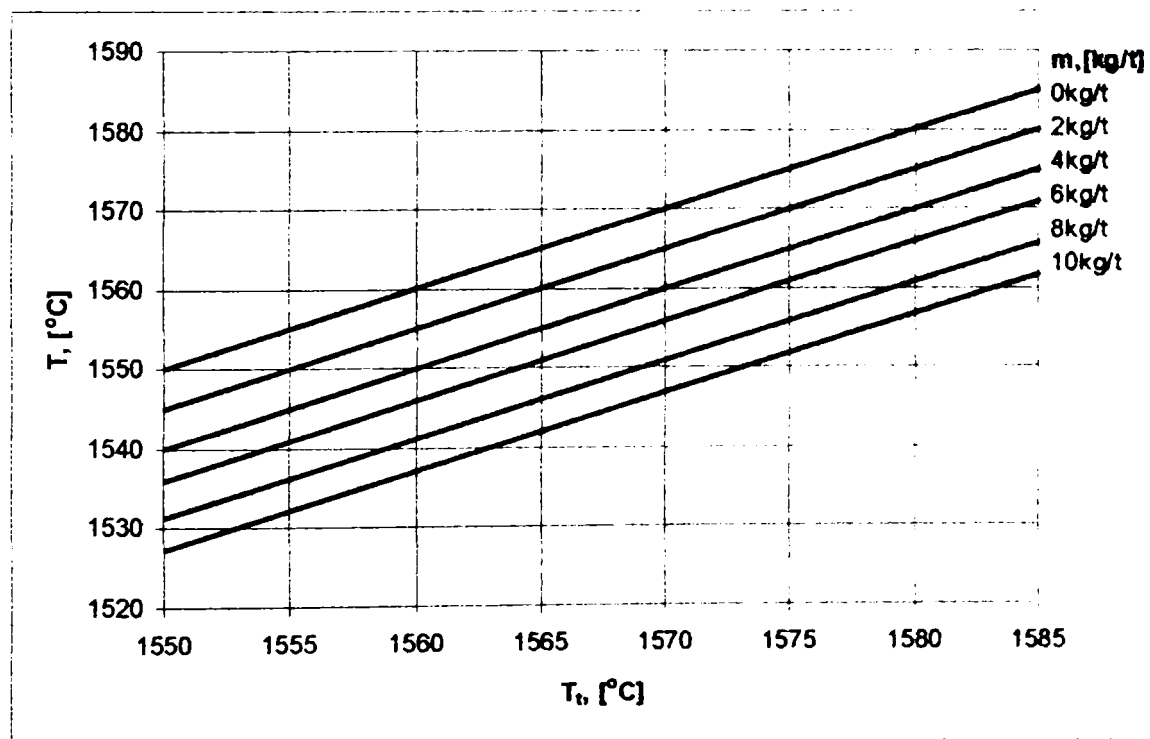


Fig.4.1. Nomogramă pentru determinarea temperaturii oțelului după introducerea microrăcitorilor.

De exemplu, dacă temperatura de turnare a oțelului este de 1575°C și introducând 2 kg/t microrăcitori, temperatura oțelului va scădea la 1570°C respectiv dacă introducem 8 kg/t temperatura oțelului va scădea la 1555°C . De asemenea, din

calculare rezultă că la introducerea cantității de 1kg/t microrăcitori temperatura oțelului scade cu circa 3°C.

Folosind relația (4.18) pentru determinarea temperaturii oțelului după introducerea microrăcitorilor rezultă consumul specific de microrăcitori.

Consumul specific de microrăcitori este optim atunci când se asigură cele mai favorabile condiții de eliminare sau diminuare a defectelor care iau naștere în timpul solidificării. Corelarea factorilor tehnologici, temperatura de turnare a oțelului, grosimea lingotierei, dimensiunea (granulația) microrăcitorilor și cantitatea de microrăcitori dă garanția obținerii de lingouri și respectiv semifabricate și piese compacte și fără defecte.

Consumul specific de microrăcitori necesar pentru scăderea temperaturii oțelului turnat:

$$m = \frac{1000 \cdot (T_i - T)}{T + 705} \quad (4.19)$$

Utilizând relațiile și nomograma obținută se poate determina cantitatea optimă de microrăcitori, în funcție de temperatura de turnare și temperatura lichidus.

Studiul fenomenului necesită clarificarea a două aspecte:

- dependența volumului de oțel afectat de răcire prin administrarea unei cantități definite de microrăcitori;

- dependența microrăcitorilor de temperatura de turnare, pentru un procent de volum dat, afectat de răcire, pentru diferite dimensiuni de lingouri.

Pentru aceasta, definim un fișier, în programul de calcul propriu SIDHD4 în care articolele conțin ca date de bază: masa lingoului, masa microrăcitorilor, temperatura de turnare, raportul dintre raza zonei afectate de răcire și raza microrăcitorului respectiv procentul din volumul oțelului lichid afectat de răcire datorită microrăcitorilor.

Calculăm căldura necesară pentru încălzirea unui microrăcitor de la $T_0 = 20^\circ\text{C}$ și topirea lui, astfel încât, în final, microrăcitorul să fie complet topit, cu temperatura $T_1 = 1520^\circ\text{C}$.

Ecuția de bilanț [72]:

$$Q = M_{mr} \cdot c_{mr} \cdot (T_1 - T_0) + M_{mr} \cdot \lambda = \rho \frac{4\pi r^3}{3} [c_{mr} (T_1 - T_0) + \lambda], \quad [\text{J}] \quad (4.20)$$

unde: T_1 - temperatura lichidus a oțelului, °C;

T_0 - temperatura microrăcitorilor, în °C;

c_{mr} - căldura specifică a microrăcitorilor, în J/kg °C;

M_{mr} - masa de microrăcitorilor, în kg;

r - raza microrăcitorilor, în m;

λ - conductivitatea aliajului lichid, în W/m °C;

ρ - densitatea microrăcitorilor, în kg/m³.

Această căldură este primită de la topitură, care, inițial are temperatura T_i .

Fie R , raza zonei de la care este primită căldura, cu centrul în centrul microrăcitorului, presupus de rază r . Este de așteptat ca în momentul în care

microrăcitorul este topit, în zona respectivă $[r, R]$ să fie un gradient de temperatură, la marginea microrăcitorului fiind temperatura T_1 , iar la distanța R de centru, temperatura T_t .

Admitem o variație liniară a temperaturii în această zonă, la momentul respectiv, $T = a \cdot x + b$, cu condițiile la limită:

- pentru $x = r$ vom avea $T = T_1$;

- pentru $x = R$, rezultă că $T = T_t$.

Atunci: $T_1 = a \cdot r + b$ și $T_t = a \cdot R + b$.

Se obține că: $T_t - T_1 = a(R - r)$ de unde rezultă $a = \frac{T_t - T_1}{R - r}$ respectiv,

$$\frac{T_t - b}{T_1 - b} = \frac{r}{R} \quad (4.21)$$

$$R \cdot T_t - R \cdot b = r \cdot T_1 - r \cdot b \Rightarrow R \cdot T_t - r \cdot T_1 = (R - r)b$$

$$b = \frac{R \cdot T_t - r \cdot T_1}{R - r} \quad (4.22)$$

$$T = \frac{T_t - T_1}{R - r} x + \frac{R \cdot T_t - r \cdot T_1}{R - r}$$

$$dQ = dm \cdot c_{mr} \cdot \Delta T = \rho \cdot 4 \cdot \pi \cdot x^2 \cdot c_{mr} (T_t - T) dx - \rho \cdot 4 \cdot \pi \cdot c_{mr} \cdot x^2 (T_t - a \cdot x - b) dx = \quad (4.23)$$

$$= 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} (T_t - b) x^2 dx - 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} \cdot a \cdot x^3 dx$$

Prin integrare rezultă:

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} \left[(T_t - b) \int_r^R x^2 dx - a \int_r^R x^3 dx \right] = \quad (4.24)$$

$$= 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} \left[\frac{(T_t - b)(R^3 - r^3)}{3} - a \frac{R^4 - r^4}{4} \right]$$

$$\text{Dar } T_t - b = T_t - \frac{R \cdot T_t - r \cdot T_1}{R - r} = \frac{R \cdot T_t - r \cdot T_1 - R \cdot T_t + r \cdot T_1}{R - r} = R \frac{T_t - T_1}{R - r} \quad (4.25)$$

Astfel, se obține:

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} \left[\frac{(T_t - T_1)(R^3 + R^2 \cdot r + R \cdot r^2)}{3} - \frac{(T_t - T_1)(R^3 + R^2 \cdot r + R \cdot r^2 + r^3)}{4} \right] = \quad (4.26)$$

$$= \frac{\pi \cdot \rho \cdot c_{mr}}{3} (T_t - T_1) (R^3 + R^2 \cdot r + R \cdot r^2 - 3 \cdot r^3)$$

Egalând relațiile (4.20) și (4.26) rezultă:

$$c(T_t - T_o) + \lambda = c_{mr} (T_t - T_1) (R^3 + R^2 \cdot r + R \cdot r^2 - 3 \cdot r^3) \quad (4.27)$$

Dacă notăm $\frac{R}{r} = y$, se obține:

$$y^3 + y^2 + y = \frac{4[c_{mr}(T_t - T_o) + \lambda]}{c_{mr}(T_t - T_1)} - 3 \quad (4.28)$$

Pentru $T_t = 1580^\circ\text{C}$, $T_1 = 1520^\circ\text{C}$, $c_{mr} = 465 \text{ J/kg} \cdot \text{grad}$, $T_o = 20^\circ\text{C}$

Rezultă: $\frac{R}{r} = y = 4,81$

Raportul dintre masa zonei de unde microrăcitorul preia căldura și masa microrăcitorului va fi:

$$\frac{M}{M_{mr}} = \frac{R^3 - r^3}{r^3} = \left(\frac{R}{r}\right)^3 - 1 = y^3 - 1 \quad (4.29)$$

Se calculează raportul razelor, conform formulei (4.28) și procentul din volumul afectat de răcire, cu formula:

$$\frac{M_{mr}(y^3 - 1)}{M} \cdot 100 \quad (4.30)$$

în care: M_{mr} reprezintă masa microrăcitorilor;

M - masa lingoului;

y - raportul razelor.

În cazul în care la un lingou de 9t s-au adăugat 2 kg/t microrăcitori, rezultă că aceștia preiau căldura de la $M_{mr}(y^3 - 1)100/M = 18(4,81^3 - 1)100/9000 = 198500/9000 = 22\%$ din volum va fi afectat de acest proces.

Dacă la un lingou de 9 t s-au adăugat 3 kg/t microrăcitori, rezultă că aceștia preiau căldura de la $M_{mr}(y^3 - 1)100/M = 27(4,81^3 - 1)100/9000 = 297700/9000 = 33\%$ din volum va fi afectat de acest proces, respectiv în cazul în care la un lingou de 9t s-au adăugat 4 kg/t microrăcitori, rezultă că aceștia preiau căldura de la $M_{mr}(y^3 - 1)100/M = 36(4,81^3 - 1)100/9000 = 397000/9000 = 44\%$ din volum va fi afectat de acest proces.

În urma prelucrărilor datelor obținute din calcule, în programele de calcul EXCEL, MATLAB și programul propriu SIDHD4 au rezultat o serie de ecuații de corelație și de dependențe grafice.

În fig.4.2 se prezintă dependența volumului afectat de răcire de temperatura de turnare la un lingou de 9t pentru 3kg/t microrăcitori adăugați în timpul turnării pentru îmbunătățirea structurii de turnare a acestuia.

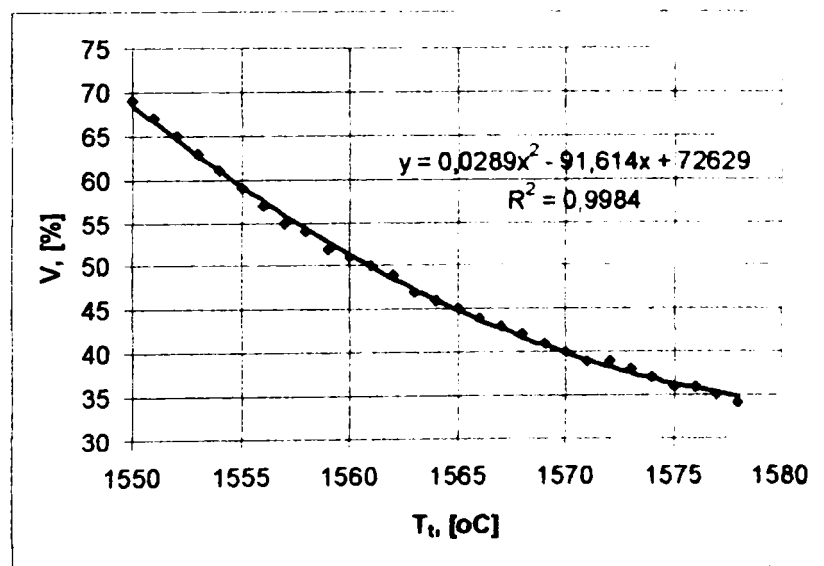


Fig.4.2. Dependența procentului de volum afectat de răcire cu temperatura de turnare la un lingou de 9t pentru un consum specific de 3kg/t de microrăcitori.

$$\text{Ecuația de corelație: } V = 0,0289 \cdot T_t^2 - 91,614 \cdot T_t - 72629, \quad R^2 = 0,9984 \quad (4.31)$$

În fig.4.3 se prezintă variația masei microrăcitorilor utilizați la turnarea unui lingou de 9t pentru un procent afectat de răcire de 33%.

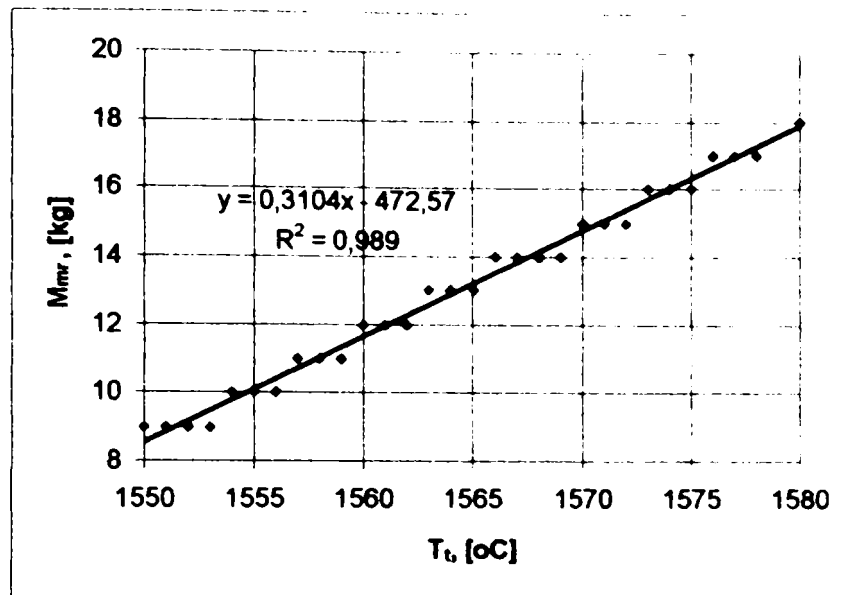


Fig.4.3. Dependenta masei microrăcitorilor cu temperatura de turnare la lingoul de 9t pentru 33% volum afectat de răcire.

$$\text{Ecuatia de corelație: } M_{mr} = 0,3104 \cdot T_t - 472,57, \quad R^2 = 0,989 \quad (4.32)$$

În fig.4.4. este prezentată suprafața de regresie multiplă între parametrul dependent – procentul de volum afectat de răcire (V , [%]) și doi parametri independenți: cantitatea specifică de microrăcitori (m , [kg/t]) și temperatura de turnare (T_t , [°C]), conform modelului matematic SIDDH 4 prezentat în anexa 4.1.

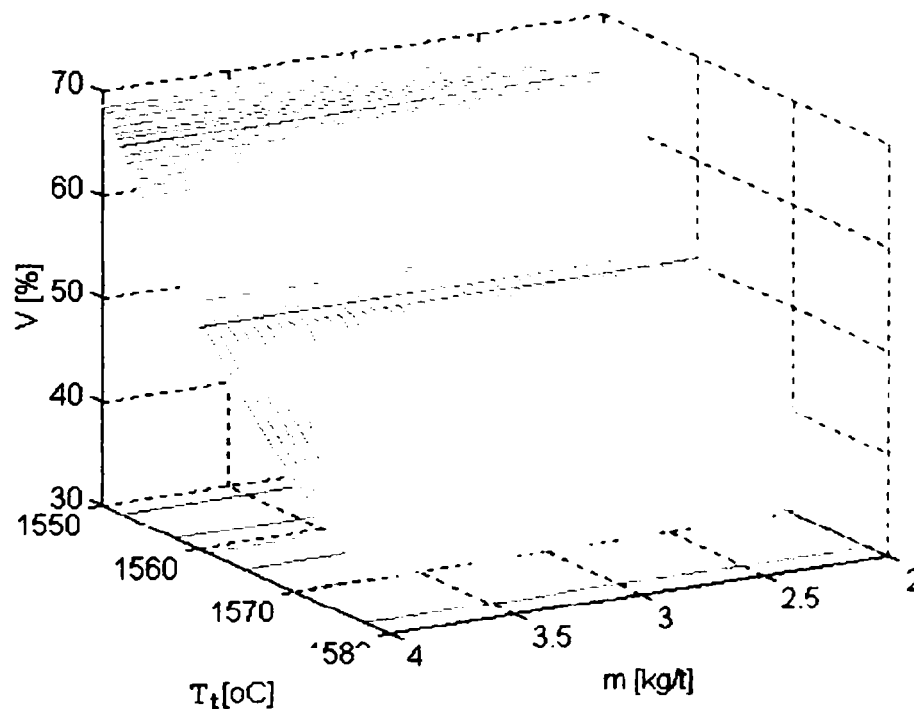


Fig.4.4. Suprafața de regresie pentru procentul de volum afectat de răcire în cazul turnării oțelului cu microrăcitori.

Atât reprezentările grafice cât și valorile ridicate pentru coeficientul de corelație scot în evidență faptul că ecuațiile exprimă foarte bine dependența dintre temperatura de turnare și procentul de volum afectat de răcire respectiv masa microrăcitorilor utilizați. Se observă că procentul de volum afectat de răcire crește

destul de repede cu scăderea temperaturii de turnare, astfel încât se impune un control riguros al masei microrăcitorilor respectiv a consumului specific de microrăcitori adăugați în lingotieră în timpul turnării oțelului.

Prin analiză de regresie cu ajutorul programului MS EXCEL au fost obținute grafic și analitic dependențele dintre temperatura de turnare și masa microrăcitorilor utilizați la turnarea lingourilor mari din oțel. Având în vedere faptul că în cadrul societății Siderurgica Hunedoara se pot prelucra lingouri cu masa numai până la 24t, deoarece presa nu permite prelucrarea unor lingouri de dimensiuni mai mari, am prezentat în fig.4.5 dependența dintre masa microrăcitorilor și temperatura de turnare pentru lingouri cu masa cuprinsă în intervalul 9–24t.

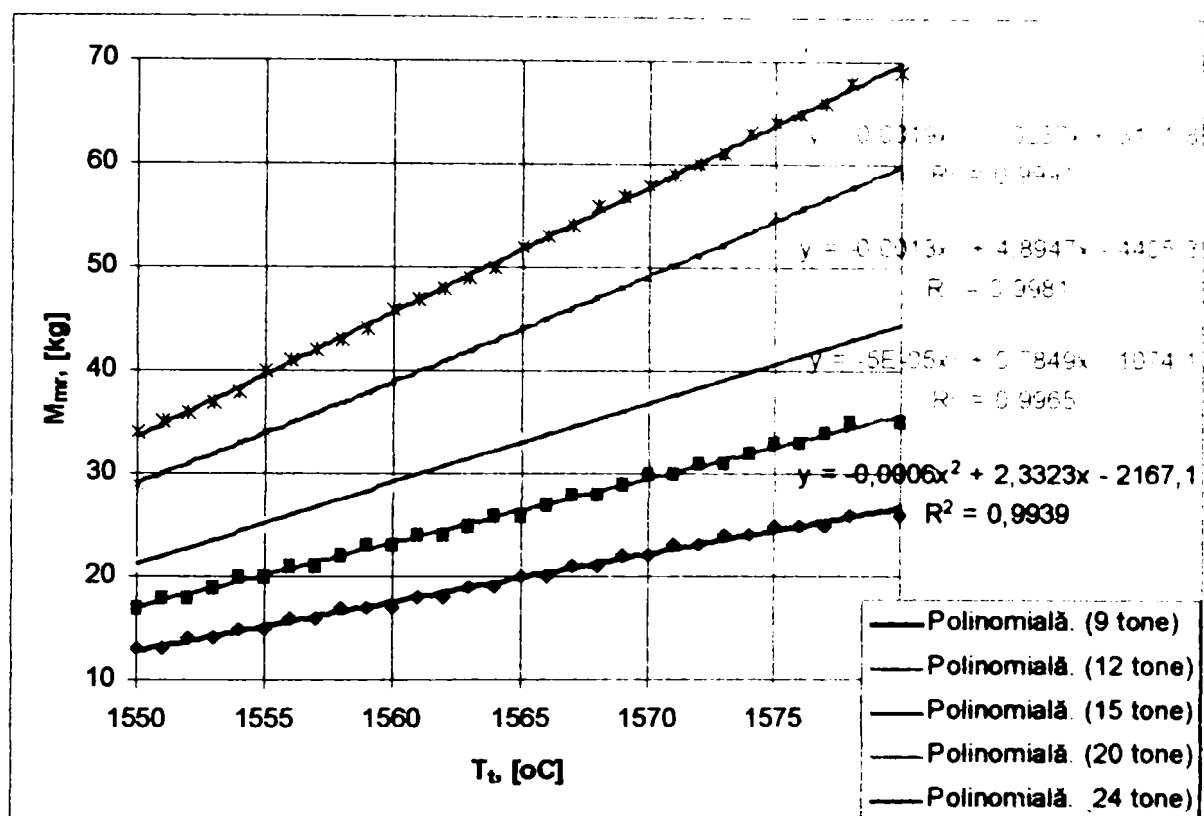


Fig.4.5. Dependenta masei microrăcitorilor de temperatura de turnare pentru lingouri de oțel cu masa 9 – 24t.

Ecuatiile de corelație:

- pentru lingoul cu masa de 9 tone

$$M_{mr} = - 0,0006 \cdot T_t^2 + 2,3323 \cdot T_t - 2167,1 \quad R^2 = 0,9939 \quad (4.33)$$

- pentru lingoul cu masa de 12 tone

$$M_{mr} = - 0,5 \cdot 10^{-5} \cdot T_t^2 + 0,7849 \cdot T_t - 1074,1 \quad R^2 = 0,9965 \quad (4.34)$$

- pentru lingoul cu masa de 15 tone

$$M_{mr} = - 0,0013 \cdot T_t^2 + 4,8947 \cdot T_t - 4405,3 \quad R^2 = 0,9981 \quad (4.35)$$

- pentru lingoul cu masa de 20 tone

$$M_{mr} = 0,0019 \cdot T_t^2 - 5,0237 \cdot T_t + 3171,8 \quad R^2 = 0,9991 \quad (4.36)$$

- pentru lingoul cu masa de 24 tone

$$M = - 0,0003 \cdot T_t^2 + 2,2473 \cdot T_t - 2650,9 \quad R^2 = 0,9989 \quad (4.37)$$

Analizând ecuațiile, atât din punct de vedere al coeficientului de corelație cât și a reprezentării grafice, rezultă că în toate cazurile este bine redată dependența dintre masa microrăcitorilor și temperatura de turnare a oțelului.

4.2. Contribuții privind modelarea matematică a factorilor tehnologici cu influență asupra proprietăților mecanice la oțelurile carbon

În capitolele anterioare s-a scos în evidență influența pozitivă a adăugării microrăcitorilor în timpul turnării lingourilor de oțel, asupra proceselor din timpul solidificării oțelurilor carbon, și anume, asupra proceselor de contracție, proceselor de segregare și a proceselor de cristalizare.

Ne propunem un model matematic care pune în evidență dependența dintre proprietățile mecanice (rezistență și plasticitate) ale oțelurilor carbon și tehnologia de turnare cu microrăcitori.

Modelul matematic propus constituie o ecuație de regresie de forma:

$$u = c_1 x^2 + c_2 y^2 + c_3 z^2 + c_4 xy + c_5 yz + c_6 xz + c_7 x + c_8 y + c_9 z + c_{10} \quad (4.38)$$

în care: u reprezintă variabilele dependente ale procesului analizat (proprietățile mecanice ale oțelului carbon marca 1C45), și anume:

- u_1 – rezistența la tracțiune (R_m , [N/mm²]);
- u_2 – limita de curgere aparentă ($R_{p0,2}$, [N/mm²]);
- u_3 – alungirea procentuală după rupere (A_5 , [%]);
- u_4 – coeficientul de gătuire (Z , [%]);

iar x, y, z - variabilele independente ale procesului, și anume:

- x – dimensiunile microrăcitorilor (d , [mm]);
- y – cantitatea de microrăcitori (m , [kg/t]);
- z – temperatura de turnare (T_t , [°C]).

Prin prelucrarea datelor obținute în urma experimentărilor efectuate, prezentate în capitolul 3, utilizând programul propriu SIDHD 5 și programul MATLAB am obținut o serie de ecuații de corelație multiplă, între parametrii dependenți: rezistența la tracțiune (R_m , [N/mm²]), limita de curgere aparentă ($R_{p0,2}$, [N/mm²]), alungirea procentuală după rupere (A_5 , [%]) și coeficientul de gătuire (Z , [%]) și trei parametrii independenți: dimensiunile microrăcitorilor (d , [mm]), cantitatea de microrăcitori (m , [kg/t]) și temperatura de turnare (T_t , [°C]), conform modelului matematic prezentat în anexa 4.2.

Corelațiile multiple (cu trei parametri) ne-au permis stabilirea unor ecuații între un parametru calitativ (parametrul dependent) și trei parametri independenți.

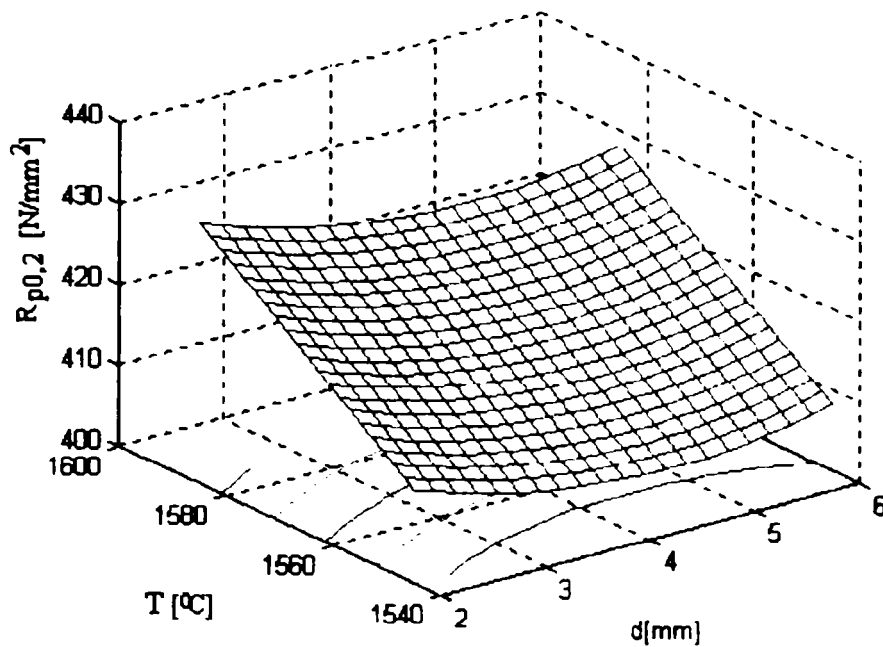
Pentru reprezentarea grafică trebuie însă considerat unul dintre cei trei parametri constant, astfel încât am dat valori, alternativ acestor parametri, și anume i-am considerat egali cu valoarea medie după care am efectuat reprezentările grafice. De asemenea, se prezintă curbele de nivel rezultate la intersecția suprafețelor de corelație cu plane paralele cu planul orizontal (plane de nivel), în dreptul fiecăreia fiind menționată cota planului de secțiune (valorile caracteristicilor mecanice), cu ajutorul cărora se poate determina cu ușurință domeniile de variație pentru parametri analizați.

Ecuația hipersuprafeței de regresie pentru limita de curgere aparentă ($R_{p0,2}$) este:

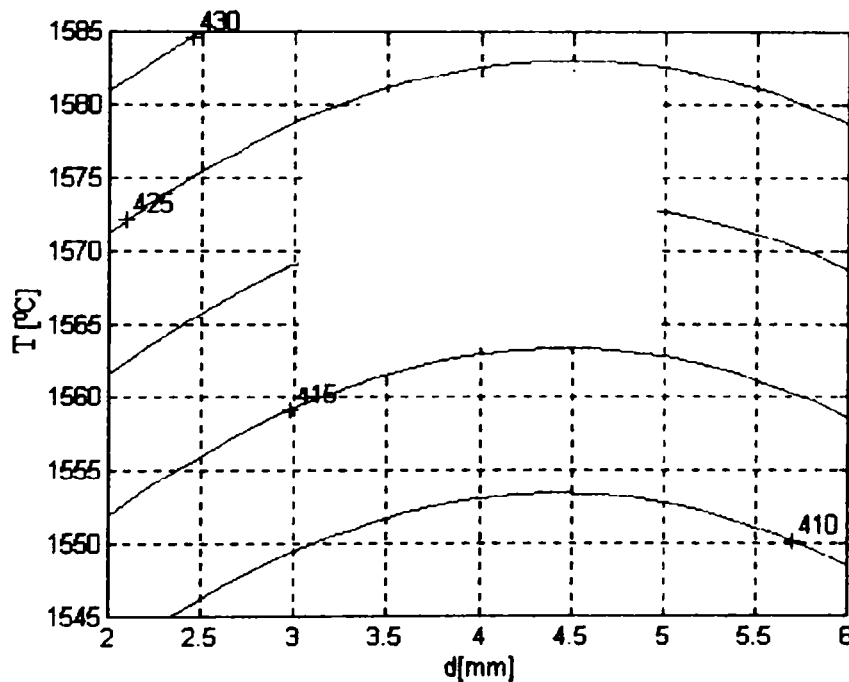
$$R_{p0,2} = -3,997 \cdot m^2 + 0,9814 \cdot d^2 + 0,0001533 \cdot t^2 - 0,4112 \cdot m \cdot d - 0,005089 \cdot d \cdot t + 0,02484 \cdot t \cdot m - 0,002547 \cdot m + 0,006111 \cdot d - 0,00003174 \cdot t + 0,00003806; \\ R^2 = 0,9726 \quad (4.39)$$

uprafeții de regresie (fig.4.6) în cazul în care parametrul menținut cantitatea de microrăcitori adăugată în cazul dirijării solidificării este:

$$R_{p0,2} = 0,0001533 \cdot t^2 - 0,005089 \cdot d \cdot t - 0,7821 \cdot d + 0,04757 \cdot t - 1540 \quad (4.40)$$



a.



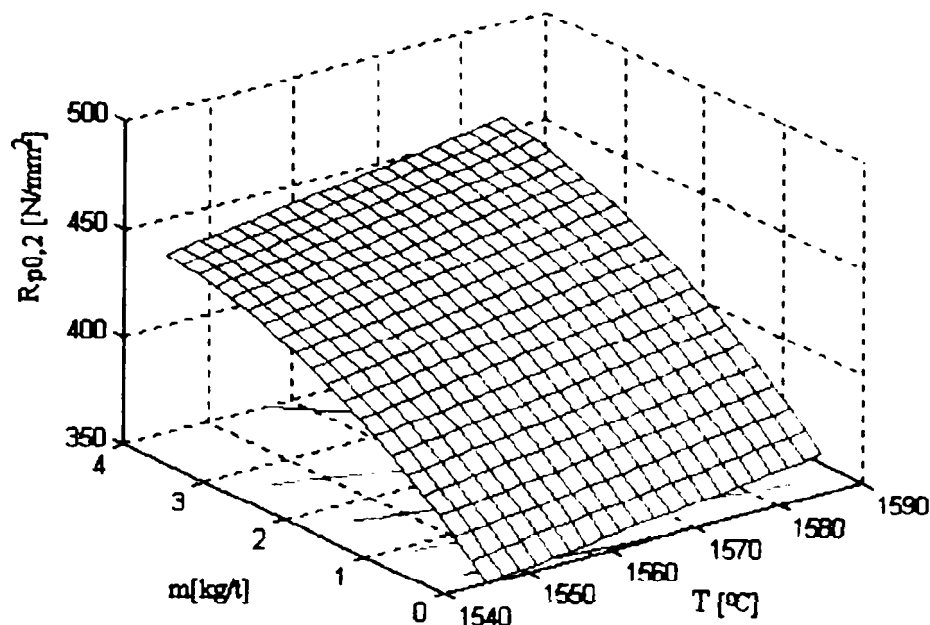
b.

de regresie $R_{p0,2}$ (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru temperaturii de turnare și a diametrului microrăcitorilor.

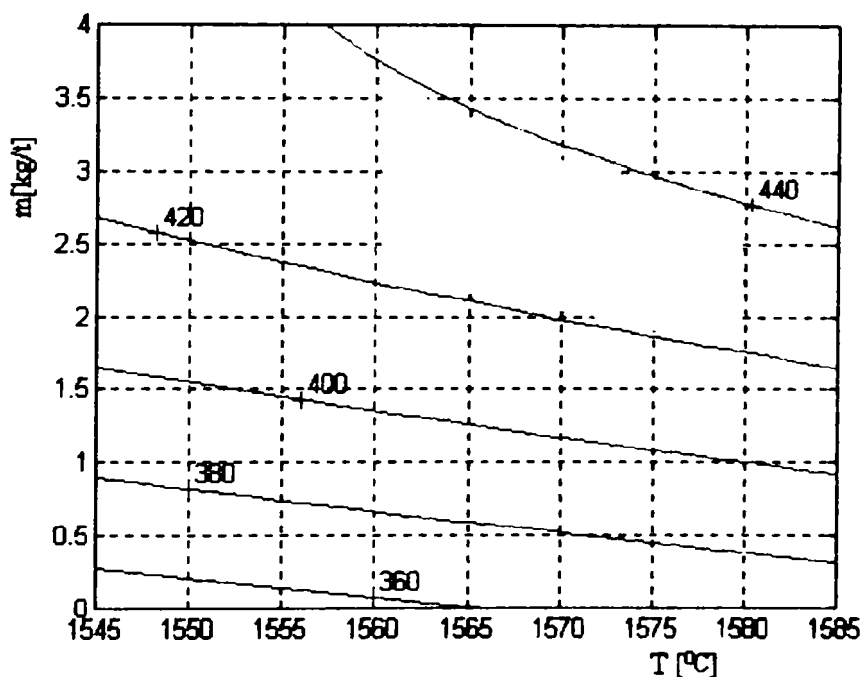
de regresie (fig.4.6) prezintă maxim pentru temperatură înaltă și Pentru a obține valori pentru limita de curgere aparentă în limitele N/mm^2 , tehnologic temperatura de turnare se încadrează în limitele \square , rezultă domeniul optim pentru diametrul microrăcitorilor, și anume

Ecuția suprafeței de regresie (fig.4.7) în cazul în care parametrul menținut constant este diametrul microrăcitorilor:

$$R_{p0,2} = -3,997 \cdot m^2 + 0,0001533 \cdot t^2 + 0,02484 \cdot t \cdot m - 1,647 \cdot m - 0,02039 \cdot t + 15,73 \quad (4.41)$$



a.



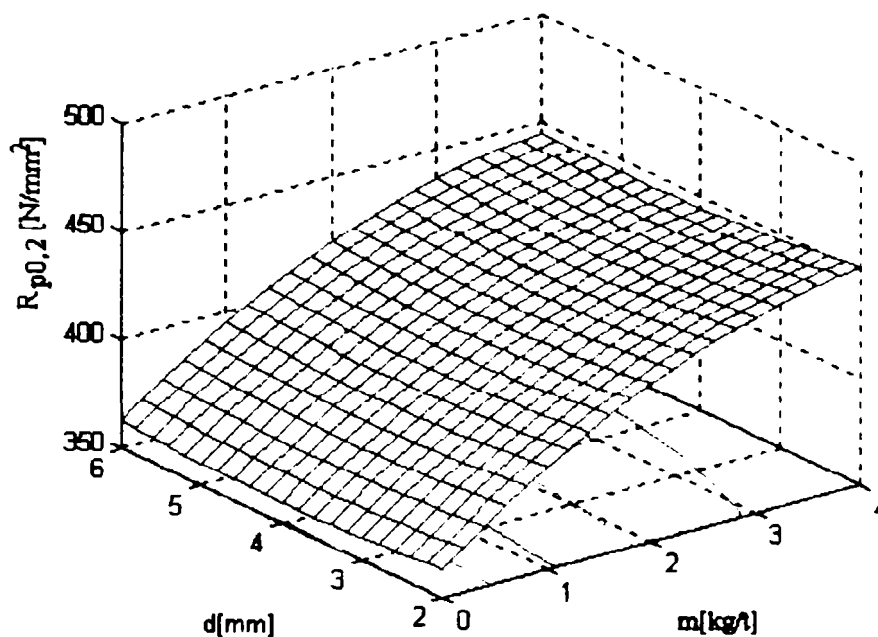
b.

Fig.4.8. Suprafața de regresie $R_{p0,2}$ (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului specific de microrăcitori și a temperaturii de turnare.

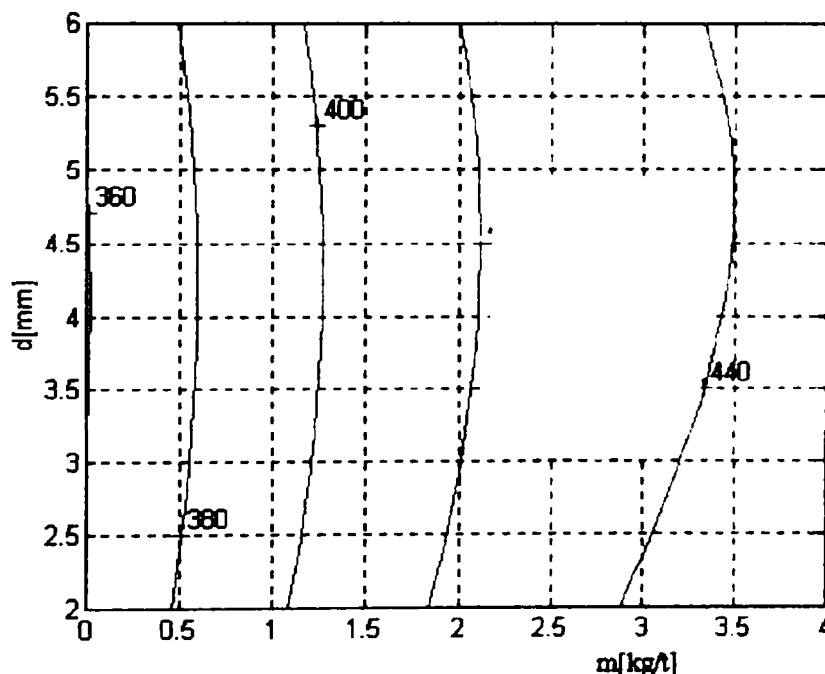
Suprafața de regresie (fig.4.7) prezintă maxim pentru temperatură înaltă și consum specific de microrăcitori maxim. Pentru a obține valori pentru limita de scurgere aparentă în limitele $R_{p0,2} = 420-440 \text{ N/mm}^2$, tehnologic temperatura de turnare se încadrează în limitele $T = 1560-1580^\circ\text{C}$, rezultă domeniul optim pentru consumul specific de microrăcitori, și anume $m = 2-3,5 \text{ kg/t}$.

În fig.4.8 se prezintă suprafața de regresie $R_{p0,2}$ în cazul în care parametrul menținut constant este temperatura de turnare, iar ecuația acesteia este:

$$R_{p0,2} = - 3,997 \cdot m^2 + 0,9814 \cdot d^2 - 0,4112 \cdot m \cdot d + 38,87 \cdot m - 7,958 \cdot d + 375,5; \quad (4.42)$$



a.



b.

Fig.4.9. Suprafața de regresie $R_{p0,2}$ (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului specific de microrăcitori și a diametrului acestora.

Analizând diagrama din fig.4.8. se observă că suprafața de regresie prezintă maxim pentru consum specific de microrăcitori maxim și diametru maxim. Pentru a obține valori pentru limita de curgere aparentă în limitele $R_{p0,2} = 420-440\text{N/mm}^2$, tehnic diametrul microrăcitorilor variază în limitele $d = 3-5\text{mm}$, rezultă domeniul optim pentru consumul specific de microrăcitori, și anume $m = 2-3,5\text{kg/t}$.

Ecuția hipersuprafeței de regresie pentru rezistența la rupere (R_m) este:

$$R_m = - 3,745 \cdot m^2 + 0,03494 \cdot d^2 + 0,0002385 \cdot t^2 - 0,7767 \cdot m \cdot d - 0,004689 \cdot d \cdot t + 0,02739 \cdot t \cdot m - 0,004822 \cdot m + 0,0002206 \cdot d - 0,00002927 \cdot t + 1,393 \cdot 10^{-6};$$

$$R^2 = 0,9920 \quad (4.43)$$

Ecuția suprafeței de regresie (fig.4.9) în cazul în care parametrul menținut constant este consumul specific de microrăcitori adăugat în cazul dirijării solidificării lingourilor de oțel este:

$$R_m = 0,03494 \cdot d^2 + 0,0002385 \cdot t^2 + 0,004689 \cdot d \cdot t - 1,488 \cdot d + 0,05252 \cdot t - 13,77 \quad (4.44)$$

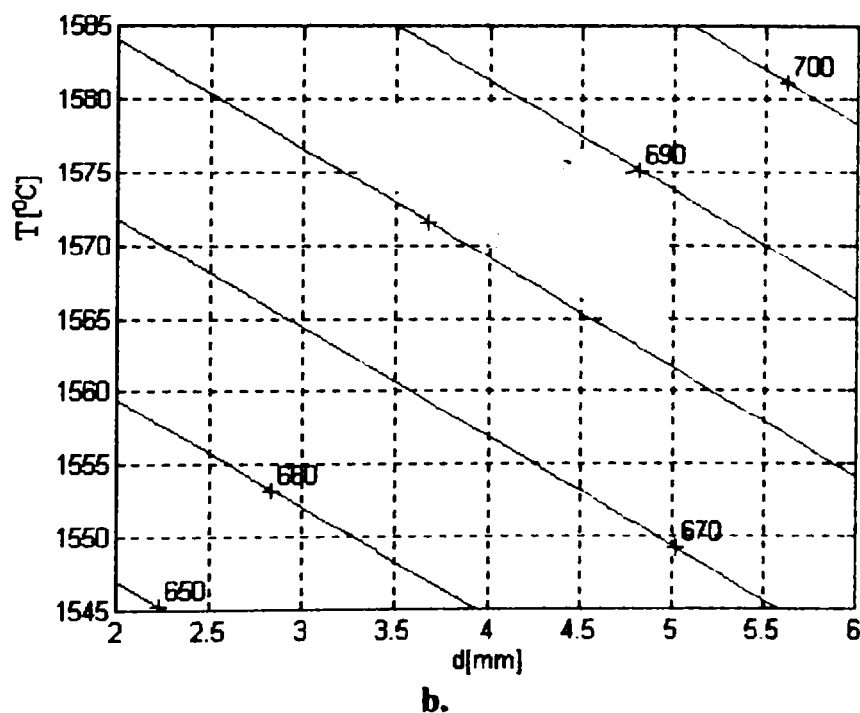
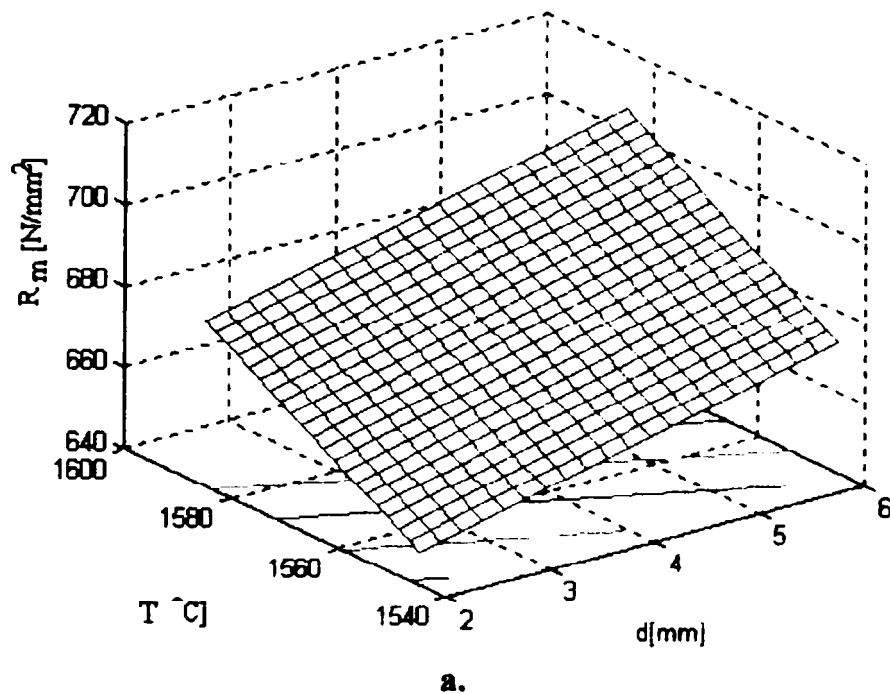


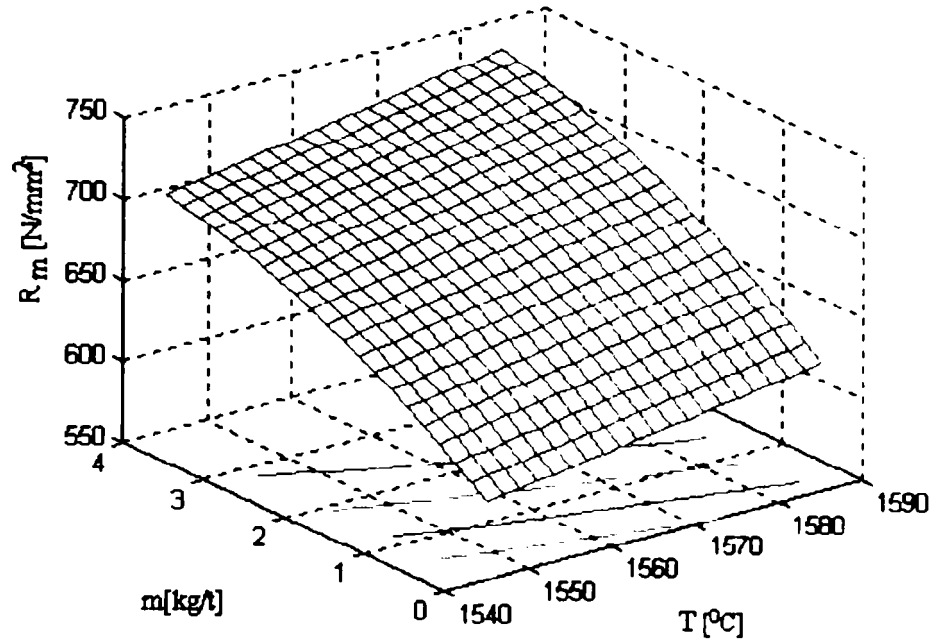
Fig.4.10. Suprafața de regresie R_m (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale temperaturii de turnare și a diametrului microrăcitorilor.

Suprafața de regresie (fig.4.9) prezintă maxim. Pentru a obține valori pentru rezistența la rupere $R_m = 680-700 \text{ N/mm}^2$, tehnic temperatura de turnare variază în

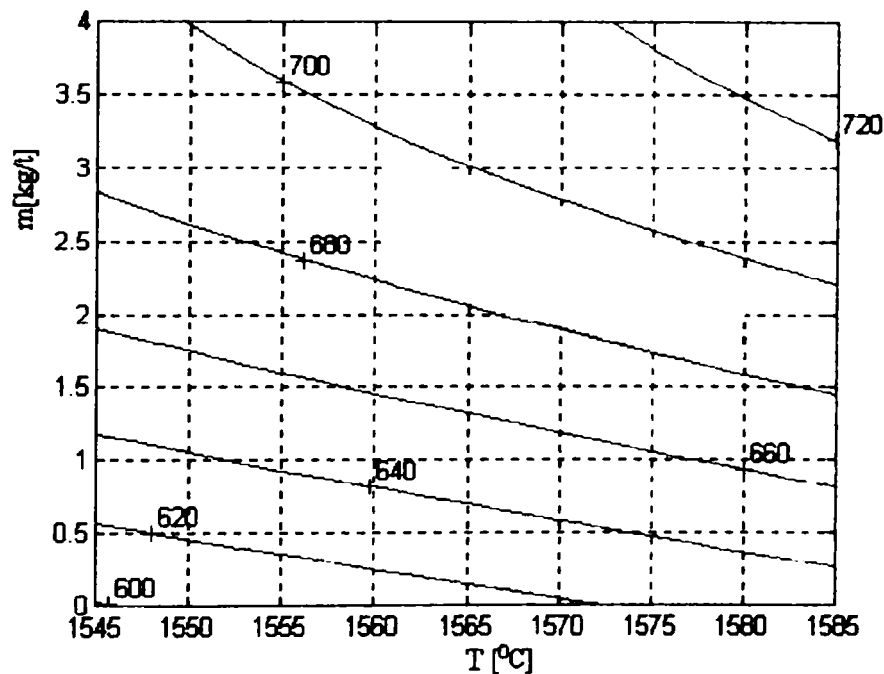
limitele $T = 1560-1580^{\circ}\text{C}$, rezultă domeniul optim pentru diametrul microrăcitorilor, și anume $d = 3-5\text{mm}$.

Ecuția suprafeței de regresie (fig.4.10) în cazul în care parametrul menținut constant este diametrul microrăcitorilor utilizați:

$$R_m = -3,745 \cdot m^2 + 0,0002385 \cdot t^2 + 0,02739 \cdot t \cdot m - 3,112 \cdot m + 0,01878 \cdot t + 0,5599 \quad (4.45)$$



a.



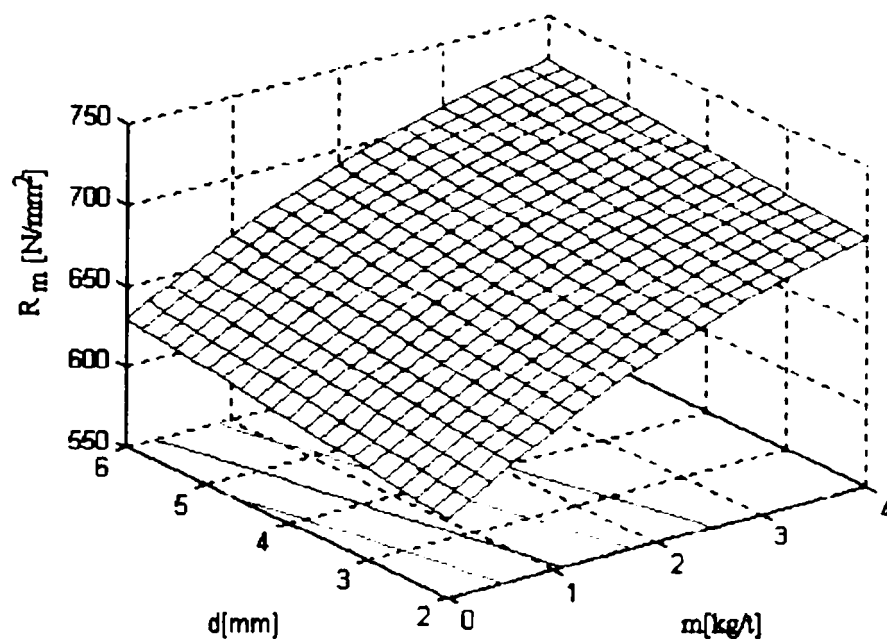
b.

Fig.4.10. Suprafața de regresie R_m (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului de microrăcitori și a temperaturii de turnare.

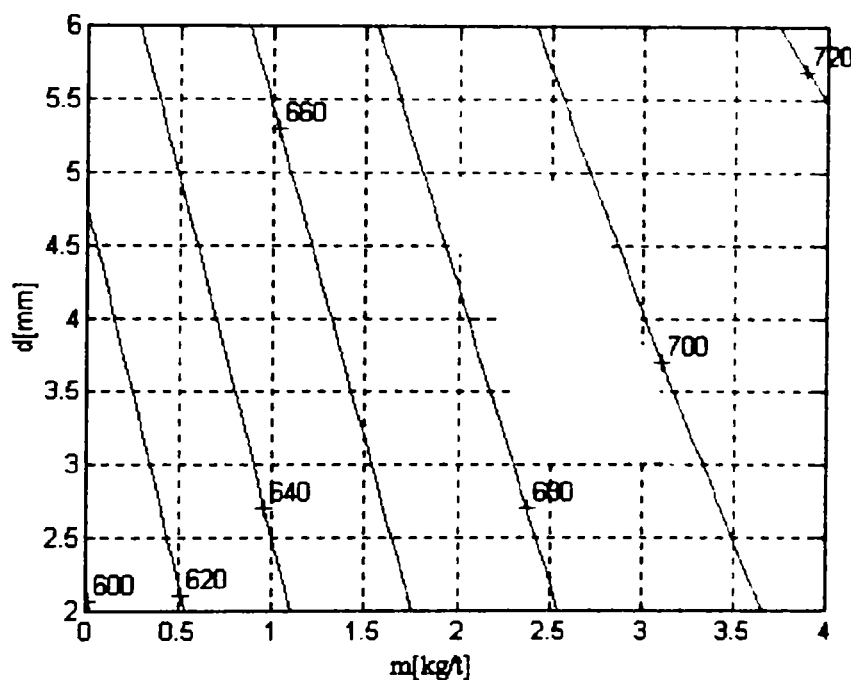
Analizând diagrama din fig.4.10 se observă că suprafața de regresie prezintă maxim pentru consum specific de microrăcitori maxim și temperatură înaltă. Pentru a obține valori pentru rezistența la rupere $R_m = 680-700\text{N/mm}^2$, tehnologic temperatura de turnare variază în limitele $T = 1560-1580^{\circ}\text{C}$, rezultă domeniul optim pentru consumul specific de microrăcitori, și anume $m = 2-3,5\text{kg/t}$.

Ecuția suprafeței de regresie (fig.4.11) în cazul în care parametrul menținut constant este temperatura de turnare:

$$R_m = - 3,745 \cdot m^2 + 0,03494 \cdot d^2 - 0,7767 \cdot m \cdot d + 42,86 \cdot m + 7,338 \cdot d + 584,3 \quad (4.46)$$



a.



b.

Fig.4.11. Suprafața de regresie R_m (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului specific de microrăcitori și a diametrului acestora.

Analizând diagrama din fig.4.11. se observă că suprafața de regresie prezintă maxim. Pentru a obține valori pentru rezistența la rupere $R_m = 680-700 \text{ N/mm}^2$, tehnic diametrul microrăcitorilor variază în limitele $d = 3-5 \text{ mm}$, rezultă domeniul optim pentru consumul specific de microrăcitori, și anume $m = 2-3,5 \text{ kg/t}$.

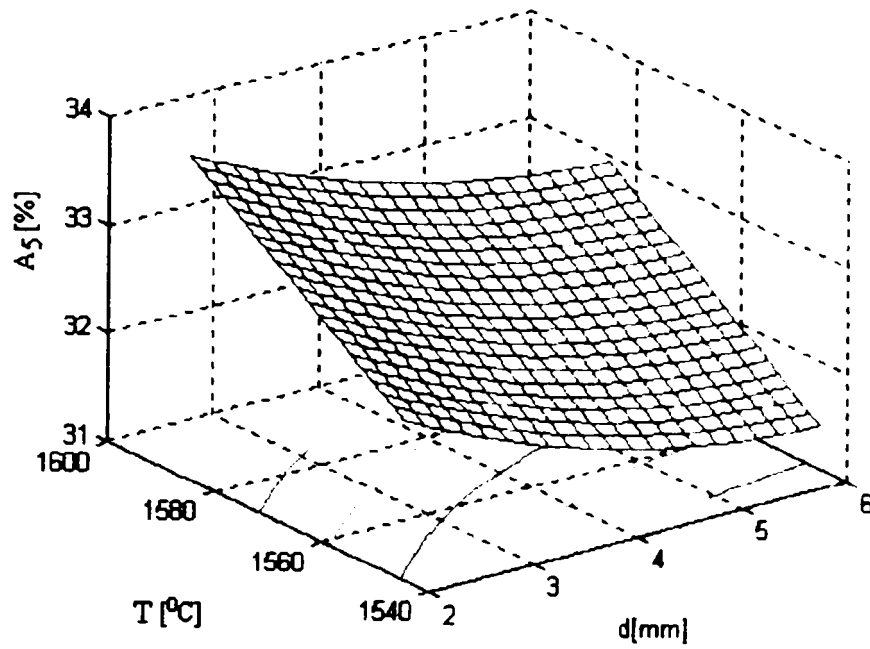
Ecuția hipersuprafeței de regresie pentru limita de curegere aparentă (A_5) este:

$$A_5 = - 0,5567 \cdot m^2 + 0,06035 \cdot d^2 + 9,121 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0,5331 \cdot m \cdot d - 0,0001736 \cdot d \cdot t + 0,004736 \cdot t \cdot m - 0,003318 \cdot m + 0,0003761 \cdot d - 1,069 \cdot 10^{-6} \cdot t + 2,344 \cdot 10^{-6} \quad (4.47)$$

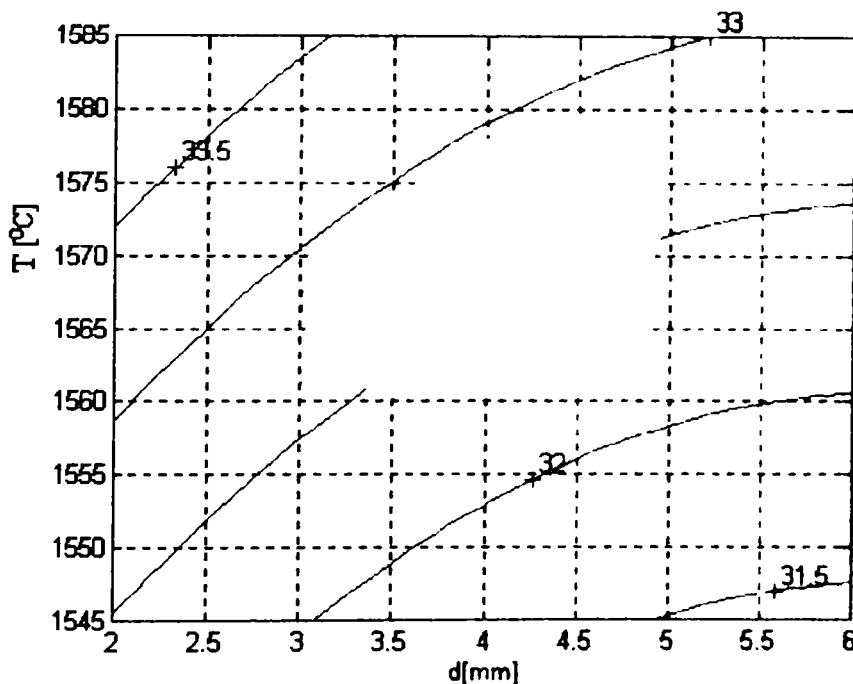
$R^2 = 0,9812$

În cazul în care se menține constant consumul specific de microrăcitori se obține suprafața de regresie prezentată în fig.4.12 respectiv ecuația de corelație:

$$A_5 = 0,06035 \cdot d^2 + 9,121 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0001736 \cdot d \cdot t - 1,021 \cdot d + 0,009078 \cdot t - 2,051 \quad (4.48)$$



a.



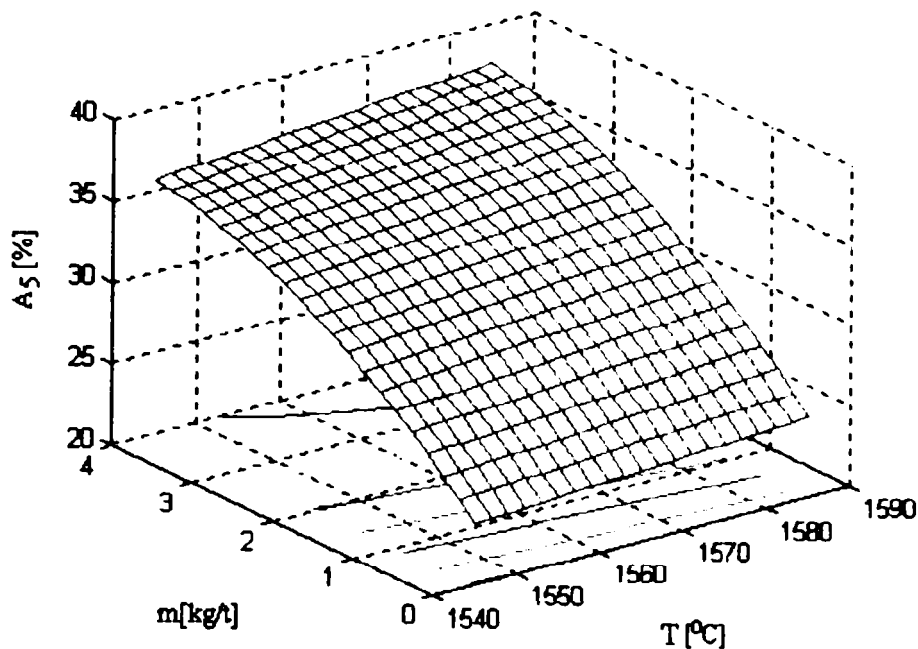
b.

Fig.4.12. Suprafața de regresie A_5 (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale temperaturii de turnare și a diametrului microrăcitorilor.

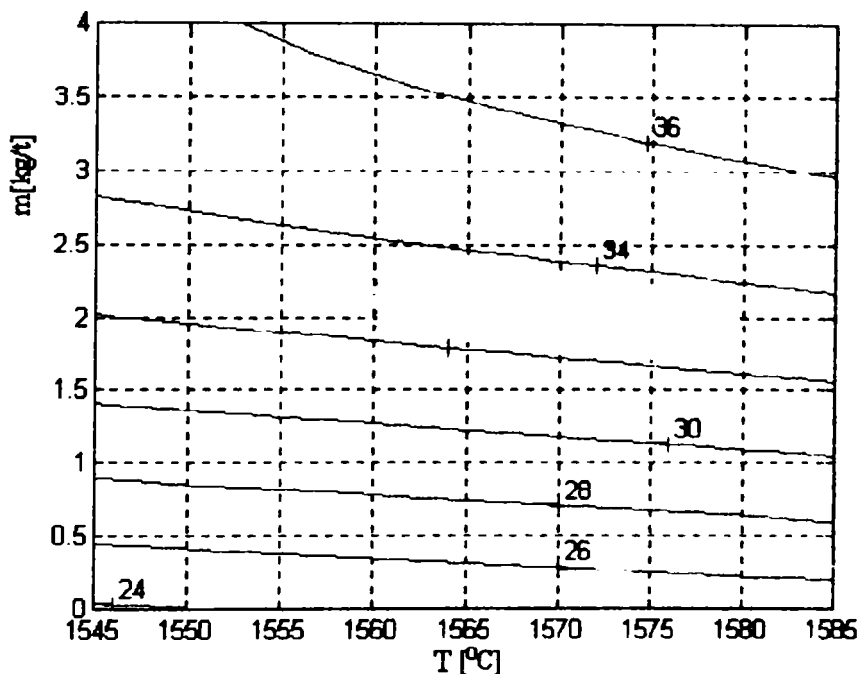
Analizând diagrama din fig.4.12 se observă că odată cu creșterea temperaturii are loc o creștere a caracteristicii de plasticitate a oțelului, suprafața de regresie prezintă minim pentru temperatură scăzută și diametru maxim respectiv maxim pentru diametru minim și temperatură ridicată. Pentru a obține valori pentru limita de curgere aparentă $A_5 = 32-34\%$, tehnologic temperatura de turnare variază în limitele $T = 1560-1580^\circ\text{C}$, rezultă domeniul optim pentru diametrul microrăcitorilor, și anume $d = 3-5\text{mm}$.

Ecuția de regresie (fig.4.13) când se menține constant diametrul microrăcitorilor este:

$$A_5 = -0,5567 \cdot m^2 + 9,121 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,004736 \cdot t \cdot m - 2,136 \cdot m + 0,0006956 \cdot t + 0,9671 \quad (4.49)$$



a.



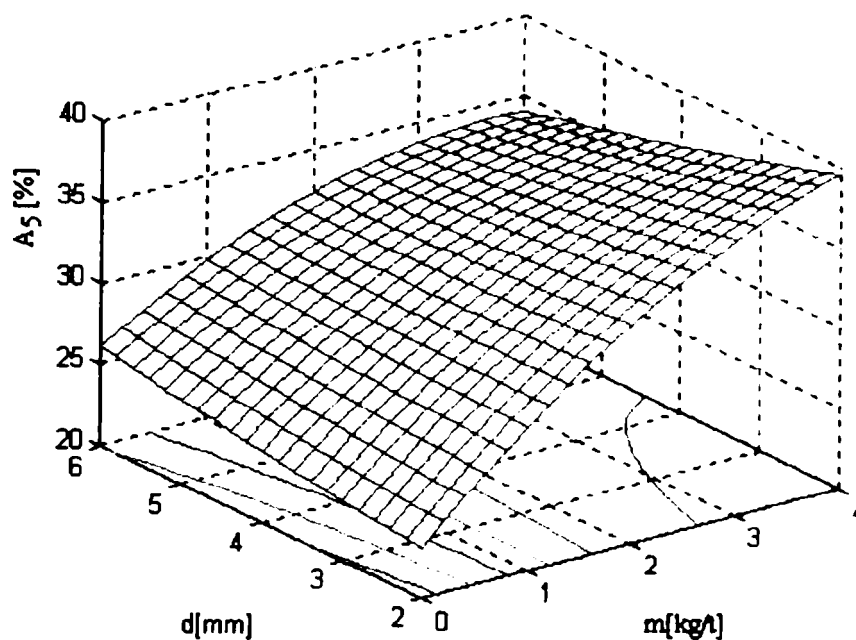
b.

Fig.4.13. Suprafața de regresie A_5 (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului specific de microrăcitori și a temperaturii de turnare.

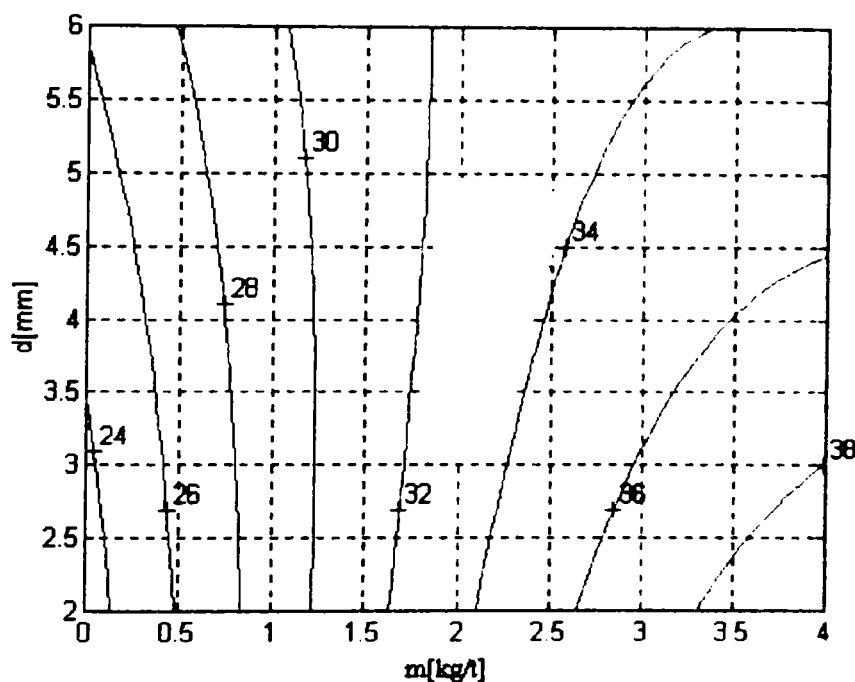
Analizând diagrama din fig.4.13. se observă că odată cu creșterea consumului specific de microrăcitori are loc o creștere a caracteristicii de plasticitate a oțelului, suprafața de regresie prezintă maxim pentru temperatură ridicată și consum specific de microrăcitori maxim. Pentru a obține valori pentru limita de curgere aparentă $A_5 = 32-34\%$, tehnologic temperatura de turnare variază în limitele $T = 1560-1580^\circ\text{C}$, rezultă domeniul optim pentru consumul specific de microrăcitori, și anume $m = 2-3\text{kg/t}$.

Ecuția de regresie (fig.4.14) când se menține constantă temperatura de turnare este:

$$A_5 = - 0,5567 \cdot m^2 + 0,06035 \cdot d^2 - 0,5331 \cdot m \cdot d + 7,408 \cdot m + 0,2721 \cdot d + 22,34 \quad (4.50)$$



a.



b.

Fig.4.14. Suprafața de regresie A_5 (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului specific de microrăcitori și a diametrului acestora.

Din fig.4.14. se observă că odată cu creșterea consumului specific de microrăcitori are loc o creștere a caracteristicii de plasticitate a oțelului, suprafața de regresie prezintă maxim pentru consum specific de microrăcitori maxim și diametru minim respectiv minim pentru consum specific de microrăcitori minim și diametru minim. Pentru a obține valori pentru limita de curgere aparentă $A_5 = 32-34\%$, tehnologic diametrul microrăcitorilor variază în limitele $d = 3-5\text{mm}$, rezultă domeniul optim pentru consumul specific de microrăcitori, și anume $m = 2-3\text{kg/t}$.

Ecuția hipersuprafeței de regresie pentru Z este:

$$Z = -0,548 \cdot m^2 - 0,03047 \cdot d^2 + 0,00002312 \cdot t^2 - 0,02422 \cdot m \cdot d - 0,00004905 \cdot d \cdot t + 0,00344 \cdot t \cdot m - 0,0001488 \cdot m - 0,0001898 \cdot d - 7,688 \cdot 10^{-8} \cdot t - 1,183 \cdot 10^{-6};$$

$$R^2 = 0,9974 \quad (4.51)$$

Ecuția suprafeței de regresie (fig.4.15) când este considerat constant consumul specific de microrăcitori este:

$$Z = 0,03047 \cdot d^2 + 0,00002312 \cdot t^2 - 0,00004095 \cdot d \cdot t - 0,0559 \cdot d + 0,007912 \cdot t - 2,899 \quad (4.52)$$

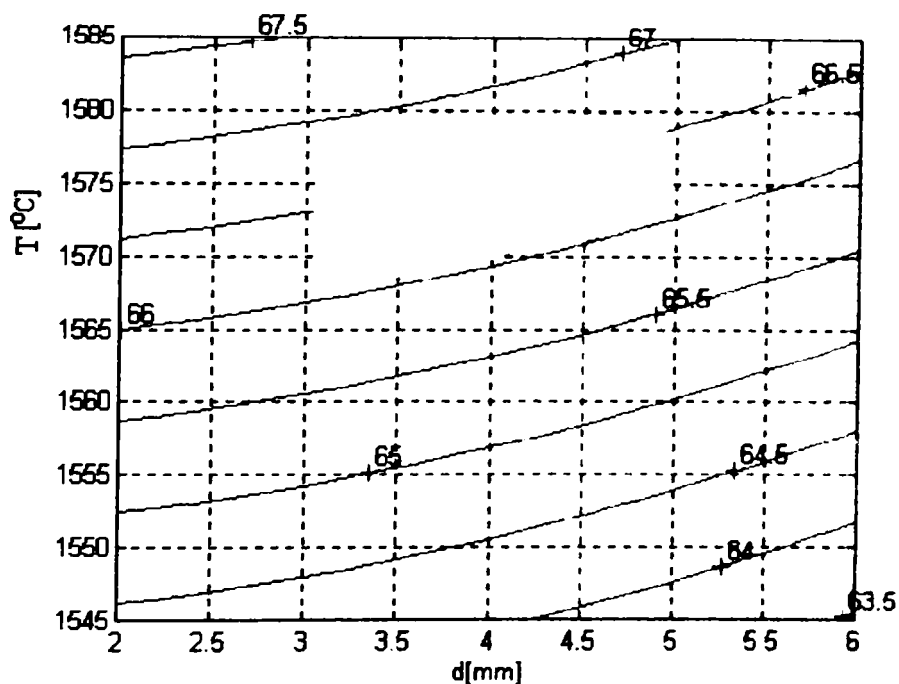
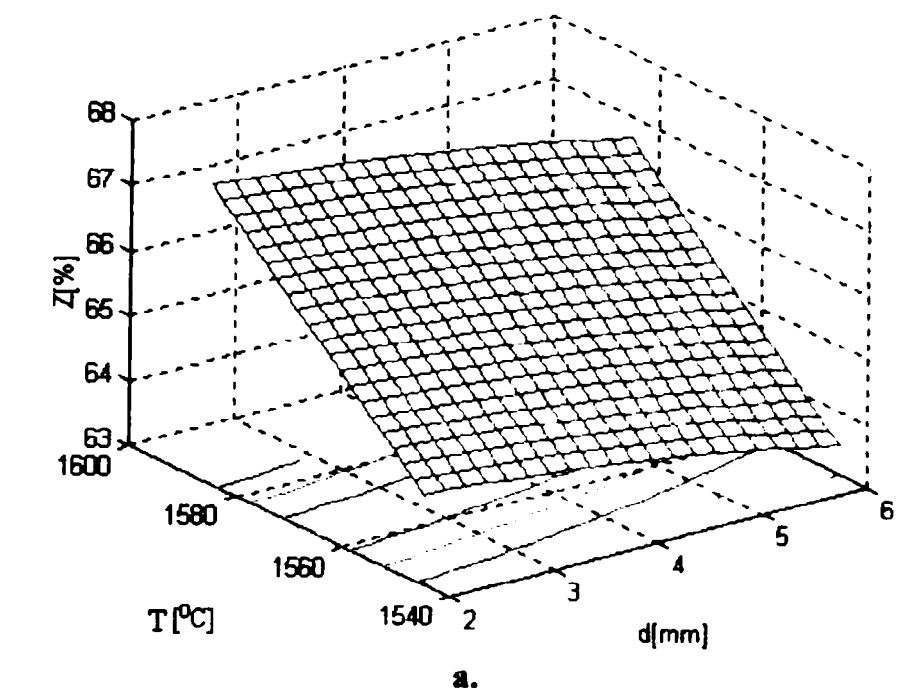
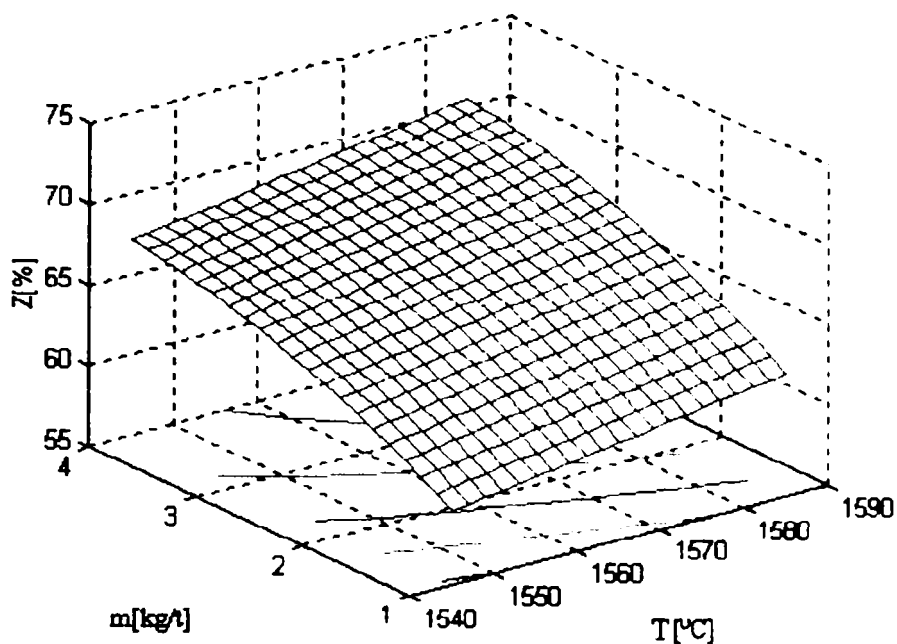


Fig.4.15. Suprafața de regresie (a) și liniile de nivel (b) pentru Z a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale temperaturii de turnare și a diametrului microrăcitorilor.

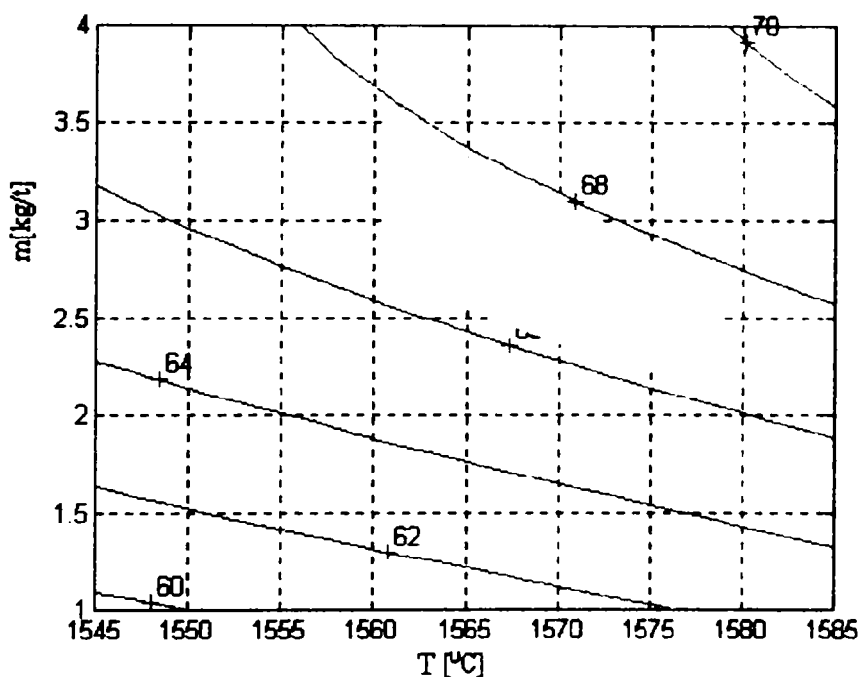
Analizând diagrama din fig.4.15 se observă că suprafața de regresie prezintă maxim. Pentru a obține valori pentru $Z = 66-68\%$, tehnologic temperatura de turnare variază în limitele $T = 1560-1580^{\circ}\text{C}$, rezultă domeniul optim pentru diametrul microrăcitorilor, și anume $d = 3-5\text{mm}$.

Ecuția suprafeței de regresie (fig.4.16) când este considerat constant diametrul microrăcitorilor este:

$$Z = -0,548 \cdot m^2 + 0,00002312 \cdot t^2 + 0,00344 \cdot t \cdot m - 0,09704 \cdot m + 0,0001637 \cdot t - 0,4883 \quad (4.53)$$



a.



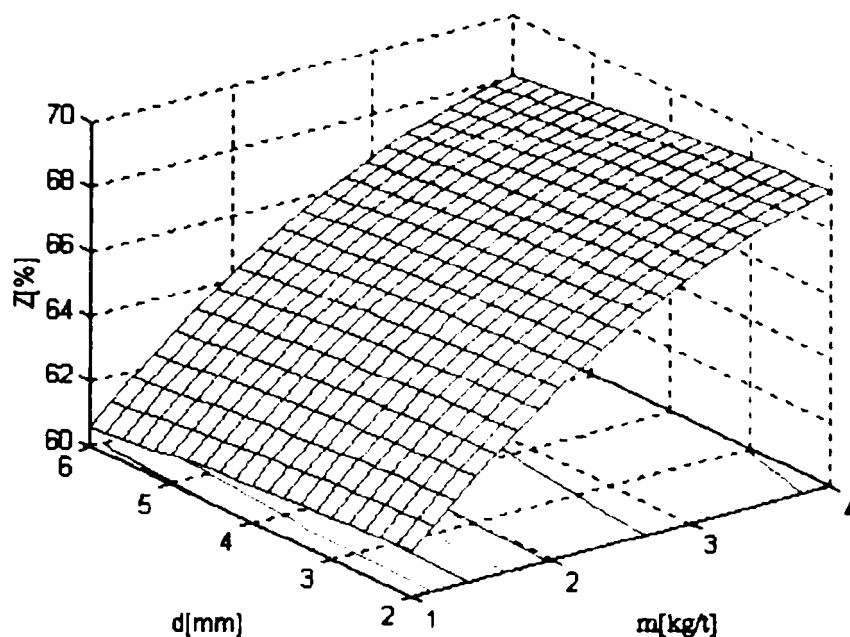
b.

Fig.4.16. Suprafața de regresie (a) și liniile de nivel (b) pentru Z a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului specific de microrăcitori și a temperaturii de turnare.

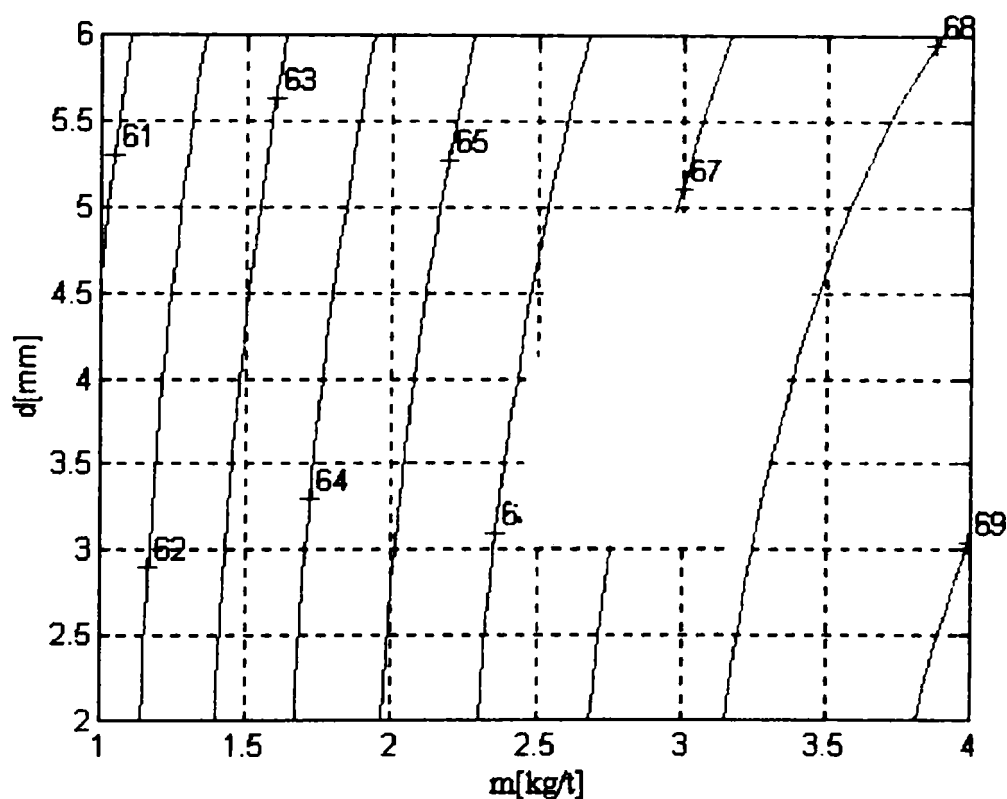
Analizând diagrama din fig.4.16. se observă că odată cu creșterea consumului specific de microrăcitori are loc o creștere a caracteristicii de plasticitate a oțelului, suprafața de regresie prezintă maxim pentru temperatură ridicată și consum specific de microrăcitori maxim respectiv minim pentru temperatură scăzută și consum specific de microrăcitori minim. Pentru a obține valori pentru $Z = 66-68\%$, tehnologic temperatura de turnare variază în limitele $T = 1560-1580^{\circ}\text{C}$, rezultă domeniul optim pentru consumul specific de microrăcitori, și anume $m = 2-3,5\text{kg/t}$.

Ecuția suprafeței de regresie (fig.4.17) când este considerată constantă temperatura de turnare este:

$$Z = - 0,548 \cdot m^2 - 0,03047 \cdot d^2 - 0,02422 \cdot m \cdot d + 5,383 \cdot m + 0,0639 \cdot d + 56,62 \quad (4.54)$$



a.



b.

Fig.4.17. Suprafața de regresie (a) și liniile de nivel (b) pentru Z a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului specific de microrăcitori și a diametrului acestora.

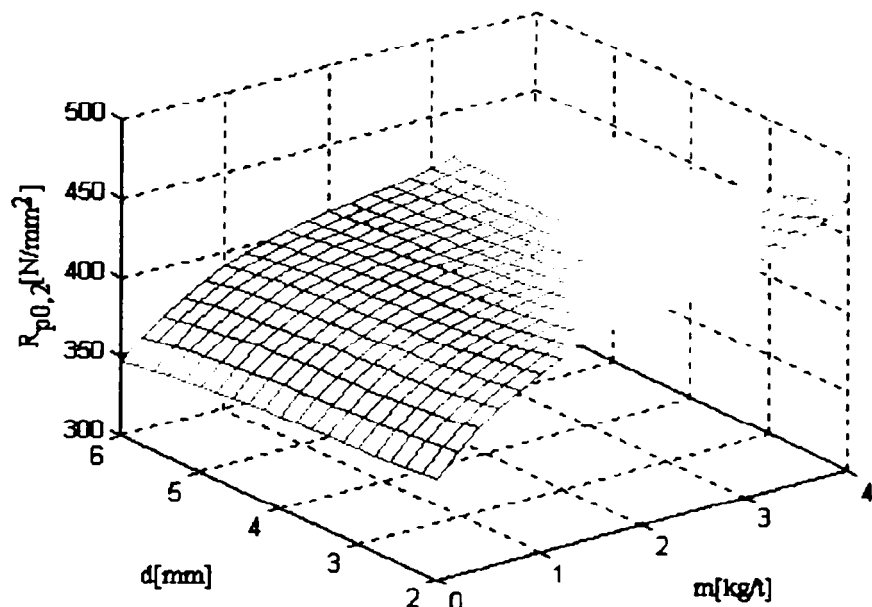
Din fig.4.17. se observă că suprafața de regresie prezintă maxim pentru consum specific de microrăcitori maxim și diametru minim. Pentru a obține valori pentru $Z = 66-68\%$, tehnic diametrul microrăcitorilor variază în limitele $d = 3-5\text{mm}$, rezultă domeniul optim pentru consumul specific de microrăcitori, și anume $m = 2,5-3,5\text{kg/t}$.

Tabelele cu privire la compararea datelor experimentale cu cele teoretice, matricea punctelor staționare, coordonatele punctului staționar al suprafețelor, respectiv matricea liniilor de contur (c_1, c_2, c_3) pentru suprafețe de regresie ale caracteristicilor mecanice sunt prezentate în anexa 4.3.

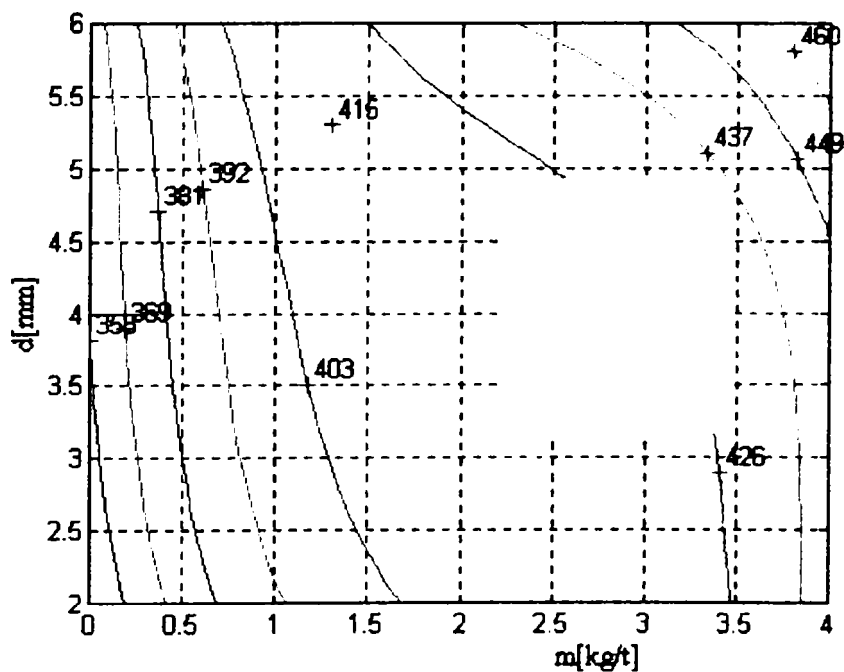
Delimitarea volumului de variație pentru caracteristicile mecanice ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 și Z) în funcție de temperatura de turnare, consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora sunt prezintă anexa 4.4.

Ecuția de corelație pentru suprafața de regresie de gradul trei pentru variația $R_{p0,2}$ în funcție consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora (fig.4.18), este:

$$R_{p0,2} = 3,578 \cdot m^3 + 0,231 \cdot d^3 + 0,908 \cdot m^2d - 0,541 \cdot md^2 - 25,903 \cdot m^2 - 8,868 \cdot d^2 + 5,806 \cdot md + 85,360 \cdot m - 22,75 \cdot d + 391,137 \quad (4.55)$$



a.

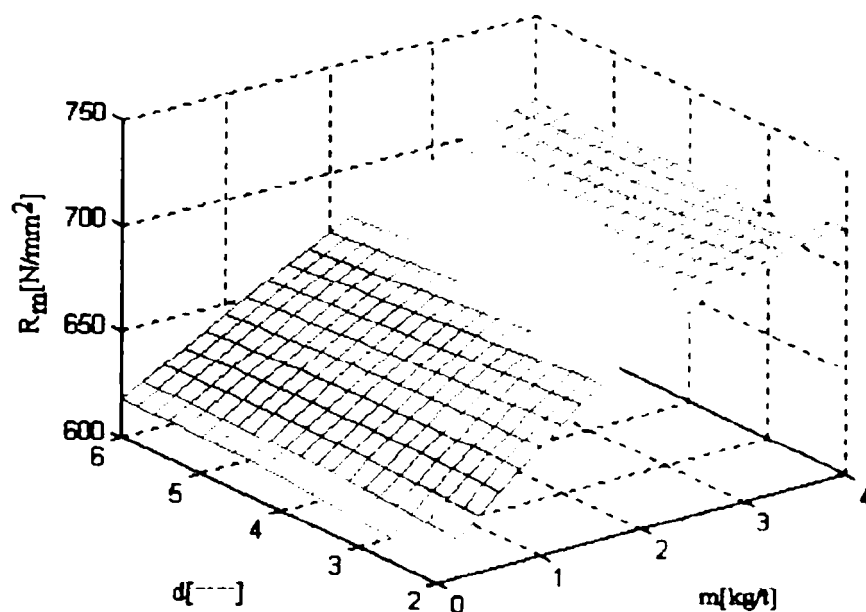


b.

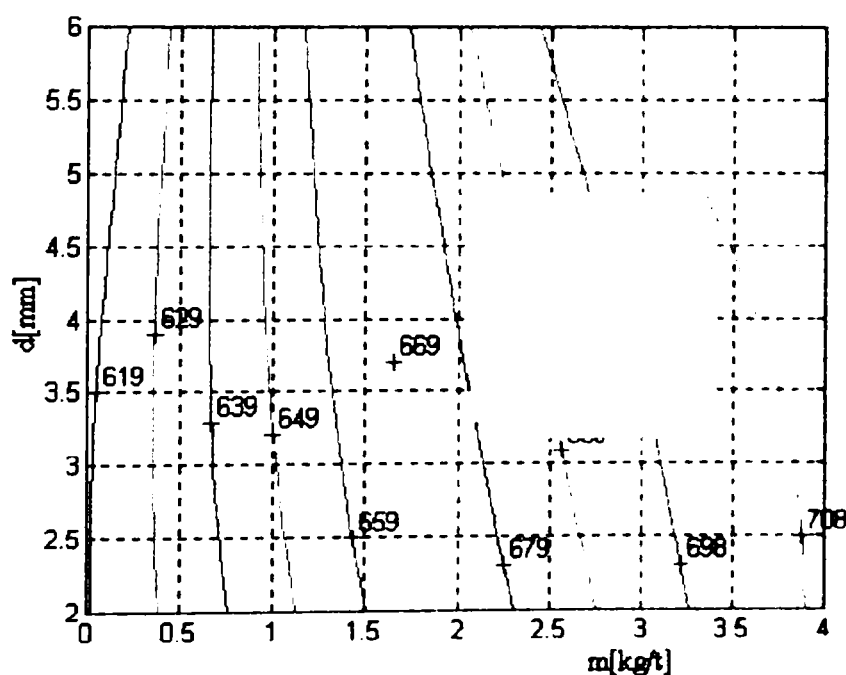
Fig. 4.18. Suprafața de regresie $R_{p0,2}$ (a) și liniile de nivel (b), a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului de microrăcitori și diametrul acestora.

Ecuția de corelație pentru suprafața de regresie de gradul trei pentru variația R_m în funcție consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora (fig.4.19), este:

$$R_m = -0,407 \cdot m^3 + 0,998 \cdot d^3 + 0,336 \cdot m^2 d - 0,055 \cdot m d^2 - 5,351 \cdot m^2 - 7,8 \cdot d^2 + 0,033 \cdot m d + 61,6 \cdot m + 4,97 \cdot d + 599,10 \quad (4.56)$$



a.



b.

Fig. 4.19. Suprafața de regresie R_m (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului de microrăcitori și diametrul acestora.

Ecuția de corelație pentru suprafața de regresie de gradul trei pentru variația A_5 în funcție consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora (fig.4.20), este:

$$A_5 = 0,230 \cdot m^3 + 0,220 \cdot d^3 - 0,032 \cdot m^2 d + 0,041 \cdot m d^2 - 2,789 \cdot m^2 - 1,22 \cdot d^2 - 0,379 \cdot m d + 12,650 \cdot m + 1,88 \cdot d + 19,828 \quad (4.57)$$

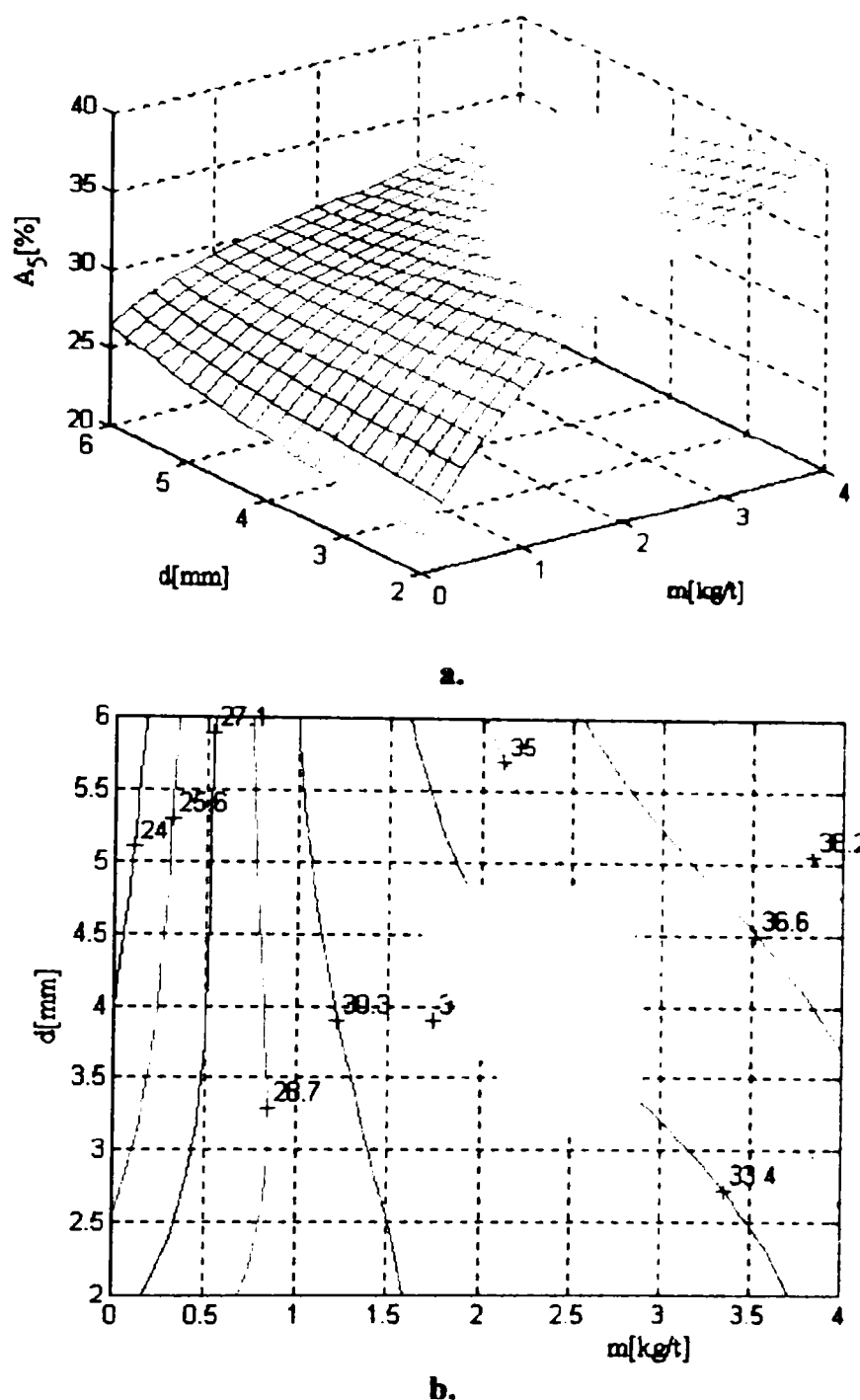


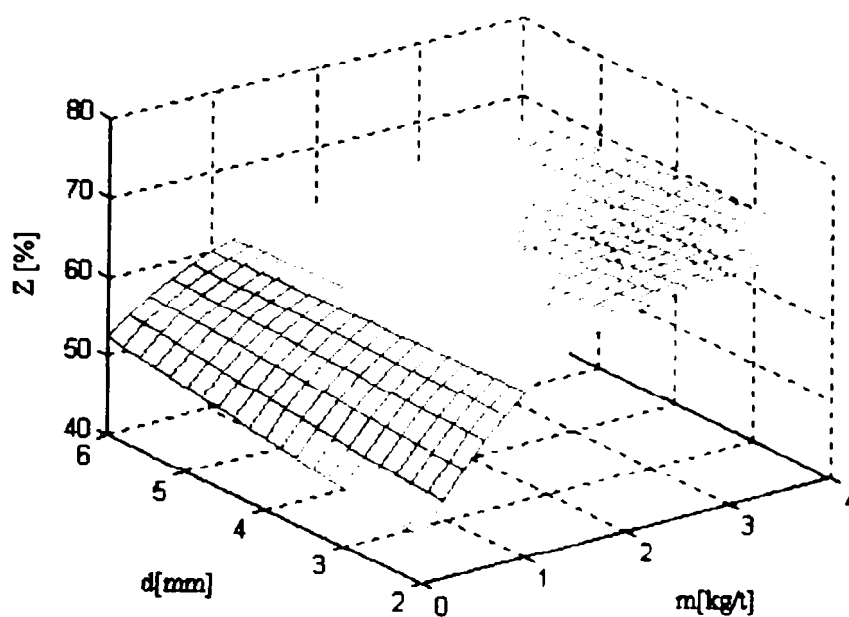
Fig. 4.21. Suprafața de regresie A_5 (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului de microrăcitori și diametrul acestora.

Ecuția de corelație pentru suprafața de regresie de gradul trei pentru Z în funcție consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora (fig.4.21), este:

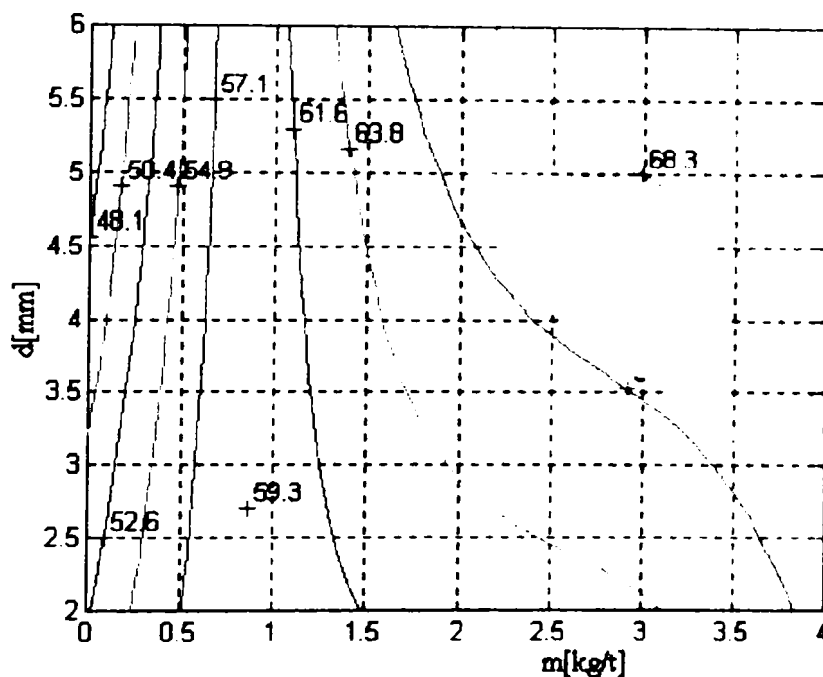
$$Z = 0,602 \cdot m^3 + 0,415 \cdot d^3 - 0,029 \cdot m^2 d - 0,013 \cdot m d^2 - 6,822 \cdot m^2 - 2,06 \cdot d^2 + 0,0198 \cdot m d + 24,720 \cdot m + 0,757 \cdot d + 43,709 \quad (4.58)$$

Cunoașterea valorilor pentru punctele staționare prezintă importanță deosebită, deoarece permite cunoașterea limitelor de variație (domeniilor optime) pentru parametri independenți astfel încât să se obțină valorile dorite pentru caracteristicile mecanice. În cazul acestor corelații sunt prezentate și curbele de contur rezultate la intersecția suprafețelor de corelație cu planele paralele cu planul orizontal (plane de

nivel), în dreptul fiecărei se prezintă și cota planului de secțiune (valorile caracteristicilor mecanice).



a.



b.

Fig.4.21. Suprafața de regresie Z (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului de microrăcitori și diametrul acestora.

Din analiza ecuațiilor de corelație exprimate sub formă analitică și mai ales sub formă grafică rezultă o serie de observații și concluzii, atât cu caracter general, cât și specific, și anume:

- variația parametrilor independenți în limitele tehnologice, determină și pentru parametrul dependent de asemenea tot o variație în limitele tehnologice, cu situarea acestuia pe o suprafață sau în vecinătatea acesteia având în vedere, dispersia, abaterea și eroarea standard;

- fiecare corelație prezentată stabilește legătura dintre trei parametri (temperatura de turnare, cantitatea specifică de microrăcitori respectiv diametrul acestora) și caracteristicile mecanice ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 și Z);

- corelațiile analizate sunt reprezentative având în vedere valorile pentru coeficienții de corelație, dispersie, abaterea și eroarea standard, iar prin menținerea la valori constante (de exemplu o valoare medie) a unuia din parametri s-au obținut și reprezentări grafice (suprafețe de corelație);

- reprezentările grafice sunt suprafețe care prezintă ca punct staționar, punct de minim sau maxim, coordonatele acestora se situează în limitele tehnologice de variație pentru parametri independenți, respectiv în limitele prevăzute de standarde pentru parametrul dependent;

- prin intersectarea suprafețelor de corelație cu plane de nivel (paralele cu planul orizontal) s-au obținut curbele de contur, acestea permițând stabilirea domeniilor optime pentru parametri independenți pentru a obține o valoare dorită pentru parametrul dependent, în reprezentările grafice aceste domenii sunt prezentate hașurat.

4.3. Concluzii

1. Modelarea proceselor constituie un instrument de bază util atât în faza de concepție cât și în cea de analiză a funcționării instalațiilor metalurgice, care combinată cu utilizarea calculatoarelor permite determinarea regimurilor optime ale proceselor metalurgice.

2. Rezultatele și concluziile obținute în urma modelării pot fi extrapolate cu un grad înalt de veridicitate la procesele industriale care au loc la dirijarea solidificării a lingourilor mari din oțel în scopul îmbunătățirii calității pieselor obținute din acestea prin deformare plastică;

3. Aplicarea ecuației de bilanț termic pentru turnarea oțelului în lingotieră cu microrăcitori a condus la obținerea unei relații pentru determinarea temperaturii oțelului după terminarea topirii microrăcitorilor în funcție de temperatura de turnare a oțelului și consumul specific de microrăcitori, (relația 4.18);

4. Pe baza datelor analizate și prelucrate matematic rezultă o relație utilă pentru determinarea cantității optime de microrăcitori, în funcție de temperatura de turnare și temperatura lichidus (relația 4.19);

5. Pe baza ecuației propuse și verificate a fost realizată o nomogramă (fig.4.1) care redă temperatura oțelului carbon după introducerea microrăcitorilor. Corelarea factorilor tehnologici, temperatura de turnare a oțelului, grosimea lingotierei, dimensiunea (granulația) microrăcitorilor și cantitatea specifică de microrăcitori dă garanția obținerii de lingouri și respectiv produse compacte și fără defecte;

6. Pe baza rezultatelor obținute a fost determinată o relație care permite calcularea raportul dintre masa microrăcitorilor utilizați și masa zonei de unde aceștia preiau căldura (relația 4.29), iar utilizând programul de calcul SIDHD4, se obțin corelații sub formă grafică și analitică între volumul de oțel afectat de răcire, la introducerea microrăcitorilor și temperatura de turnare respectiv masa lingourilor și consumul specific de microrăcitori adăugați. Din analiza diagramelor se observă că procentul de volum afectat de răcire crește proporțional cu scăderea temperaturii de

turnare astfel încât se impune un control riguros al cantității de microrăcitori adăugați.

7. În ce privește modelarea matematică a influenței microrăcitorilor asupra proprietăților mecanice ale oțelurilor carbon analizate a fost întocmit programul de calcul SIDHD5. Folosind acest program și rezultatele obținute în cadrul experimentărilor, s-au obținut o serie de ecuații de corelație multiplă între un parametru dependent (caracteristicile mecanice - $R_{p0.2}$, R_m , A_5 , Z) și trei parametri independenți (temperatura de turnare, consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora). Prin prezentarea grafică a corelațiilor duble s-au obținut suprafețe de regresie. Aceste suprafețe prezintă puncte staționare, fie puncte de maxim sau de minim. Prin intersectarea suprafețelor de corelație cu plane de nivel se obțin curbele de nivel, care proiectate pe planul orizontal permit stabilirea domeniului optim de variație a cantității specifice de microrăcitori, a dimensiunii acestora respectiv a temperaturii de turnare pentru a obține caracteristici de rezistență respectiv de plasticitate în limitele dorite. Programul poate fi implementat cu succes în condiții industriale pentru turnarea oțelului cu microrăcitori;

8. Analizând diagramele prezentate în ce privește stabilirea domeniilor optime de variație pentru parametrii independenți (consum specific de microrăcitori, diametrul microrăcitorilor și temperatura de turnare) se observă următoarele:

- tehnologic temperatura de turnare este cuprinsă între limitele 1560 – 1580°C;
- domeniile optime de variație pentru consumului specific de microrăcitori utilizați pentru dirijarea solidificării sunt cuprinse între 2 – 4kg/t, valorile maxime pentru caracteristicile mecanice obținându-se pentru un consum specific cuprins între 2,5 - 3,5kg/t;
- domeniile optime de variație pentru diametrului microrăcitorilor utilizați sunt cuprinse între 3 – 5mm, valorile maxime pentru caracteristicile mecanice obținându-se pentru 3,5 – 4,5mm;

9. Există cazuri în care pentru a obține valori maxime pentru caracteristicile mecanice de rezistență sau plasticitate, valorile pentru parametrii ce caracterizează adaosul de microrăcitori, diametrul acestora respectiv temperatura de turnare la care se face adaosul se situează în două domenii, astfel încât există posibilitatea alegerii domeniului celui mai convenabil din punct de vedere tehnologic. Verificarea industrială a acestor corelații a confirmat valabilitatea acestora;

10. În contextul celor prezentate, scopul principal al tezei (îmbunătățirea calității pieselor obținute din lingouri mari) a fost realizat prin cercetarea dirijării solidificării și stabilirea corelațiilor referitoare la variația parametrilor tehnologici (temperatura de turnare, consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora) în funcție de variabilele operaționale specifice proceselor de solidificare (valorile caracteristicilor mecanice), pentru a determina modalitățile de influențare a acestora în vederea obținerii unor piese de calitate superioară, în condiții de reproductibilitate și eficiență tehnico-economică maximă.

CAPITOLUL 5**CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE**

Prezenta teză de doctorat intitulată "Contribuții privind îmbunătățirea calității pentru piesele din oțel realizate prin forjare din lingouri mari", tratează sub forma cercetării fundamentale și aplicative posibilitățile de îmbunătățire a calității prin dirijarea structurii de solidificare a lingourilor din oțel.

Scopul tezei a fost creșterea calității produselor prin îmbunătățirea structurii de turnare a lingourilor mari din oțel și determinarea domeniilor optime a parametrilor tehnologici specifici turnării oțelurilor cu microrăcitori (temperatura de turnare, consumul specific de microrăcitori și diametrul microrăcitorilor) pentru a obține caracteristici mecanice superioare ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 , Z), considerate reprezentative pentru calitatea acestora.

Pentru fundamentarea tezei de doctorat au fost analizate studiile și cercetările experimentale prezentate în literatura de specialitate vizând procesele care au loc la solidificarea lingourilor mari din oțel respectiv în timpul încălzirii, prelucrării plastice și a tratamentului termic a acestora. În urma analizei au rezultat **concluzii teoretice și practice**:

1. Aprecierea calității produselor forjate, la terminarea ciclului de fabricație, presupune omogenizarea structurii și a compoziției chimice respectiv uniformitatea proprietăților mecanice și fizice în volumul produsului.

2. Calitatea oțelurilor se reflectă prin realizarea unor performanțe superioare vizând micșorarea conținutului de elemente considerate dăunătoare pentru marca de oțel (sulf, fosfor, elemente reziduale), micșorarea conținutului de gaze dizolvate în oțelul lichid (hidrogen și azot) scăderea conținutului de oxigen în oțel, îndepărtarea avansată a produșilor generatori de incluziuni nemetalice și asigurarea unei distribuții corespunzătoare a celor rămase în oțelul lichid, reducerea conținutului de carbon, corecția riguroasă a compoziției chimice și reglarea exactă a temperaturii de evacuare a oțelului în funcție de temperatura de turnare. Realizarea acestor cerințe conduce în final la obținerea unor oțeluri de înaltă puritate, cu proprietăți fizico-chimice superioare.

3. Solidificarea unui volum mare de oțel este asociată cu contracții importante, independente de gradul de puritate, lucru care conduce la deteriorarea sensibilă a structurii oțelului și la apariția de neomogenități chimice și structurale în lingourile mari din oțel, fapt care a condus la ideea îmbunătățirii calității prin dirijarea structurii de solidificare a acestora.

4. Formarea cristalelor în procesul de solidificare constă în apariția unor germeni sau nuclee de cristalizare și creșterea acestora. Structura omogenă echiaxială a lingourilor turnate cu microrăcitori se obține prin introducerea în oțelul ce pătrunde în lingotieră a microrăcitorilor care provoacă formarea eterogenă a germeilor de cristalizare și conduce la micșorarea dimensiunilor grăunților în lingoul turnat.

5. Deoarece procesul de solidificare este influențat nu numai de factori interni ci și de o serie de factori externi, precum și faptul că determinările nu se pot face direct, explică de ce nu există încă relații cantitative precise între structura lingourilor și factorii fizico-chimici de la elaborare-turnare-solidificare, relațiile stabilite fiind cu caracter calitativ, iar cele cantitative dau valori aproximative deoarece nu pot cuprinde toți factorii care acționează.

6. Din analiza ecuațiilor de corelație obținute între durata solidificării și gradul de segregare pentru hidrogen respectiv azot se observă că reducerea timpului de solidificare conduce la creșterea gradului de omogenitate structurală și la reducerea celui de segregare.

7. Calitatea lingourilor mari din oțel destinate forjării poate fi îmbunătățită printr-o dirijare a solidificării care determină o aplatizare a formei retasurii la lingourile turnate cu microrăcitori și reducerea pe această cale a volumului acesteia având ca efect o creștere a scoaterii de metal, o creștere a omogenității structurale și a proprietăților calitative reprezentate prin rezistență și plasticitate respectiv o finisare a structurii de turnare.

8. Dinamica regimurilor de încălzire este determinată de factori, ca: compoziția chimică a oțelului, dimensiunile caracteristice ale lingourilor, regimul termic al cuptorului, temperatura lingourilor în momentul introducerii în cuptor, viteza și durata de încălzire, diferența de temperatură admisă pe secțiune, valoarea maximă admisă pentru tensiunile termice respectiv gradul de oxidare a suprafeței lingourilor.

9. Valoarea diferenței de temperatură pe secțiunea lingourilor trebuie precizată cu suficientă exactitate pentru fiecare grupă de oțeluri și mărime de lingou deoarece aceasta este determinantă în apariția tensiunilor termice, care pot cauza distrugerea compactității oțelului, deoarece limitează zona de transformare din interiorul acestora.

10. Prin modelarea matematică bidimensională s-au obținut suprafețe de corelație a distribuției temperaturii pe secțiunea lingourilor și a curbilor de contur, ceea ce permite determinarea temperaturii în orice punct din secțiunea acestora, pe baza cărora se poate regla regimul de încălzire în funcție de diferența de temperatură admisă pe secțiune.

11. Analiza calității produselor prelucrate prin deformare plastică trebuie să aibă în vedere sursele de origine a defectelor: tehnologia de elaborare-turnare, regimul de răcire a lingourilor, regimul de încălzire, tehnologia de deformare plastică respectiv tehnologia de tratament termic.

12. În cadrul metodicii de cercetare adoptate pentru elaborarea prezentei lucrări de doctorat s-au efectuat experimentări în fază de laborator și în fază industrială cu privire la turnarea lingourilor mari din oțel cu microrăcitori obținând o creștere a

omogenității structurii de turnare cu scopul îmbunătățirii calității pieselor obținute din aceste lingouri prin forjare;

13. Studiul microstructurii a scos în evidență dependența dintre dimensiunea grăuntelui cristalin și caracteristicile de rezistență. Se poate afirma, cu datele obținute, că germinarea eterogenă, favorizată în zona centrală de microrăcitori, a condus în cazul probelor experimentale la scăderea porozității centrale și generale respectiv la obținerea unei structuri uniforme a grăuntelui cristalin.

14. Structura de turnare este mai fină în cazul lingourilor cu adaos de microrăcitori în comparație cu structura lingourilor turnate clasic. Astfel, structura lingourilor turnate clasic este specifică pieselor turnate în care găsim grăunți cristalini mari și alungiți în direcția pierderii de căldură, iar în cazul lingourilor turnate cu microrăcitori se observă o globulizare a grăunților cristalini concomitent cu micșorarea acestora, micșorarea grăunților cristalini în cazul lingourilor experimentale poate fi explicată prin cedarea unei cantități de căldură din oțelul lichid microrăcitorilor;

15. Ca urmare a reducerii volumului retasurii, la lingourile turnate cu microrăcitori, s-a obținut o creștere a scoaterii de metal (8-10%), aceasta fiind direct proporțională cu reducerea temperaturii de turnare și mărirea cantității de microrăcitori administrați;

16. În cazul lingourilor experimentale s-a obținut o reducere a gradientului de temperatură în intervalul de solidificare a oțelului de 1,5 - 2 ori și o mai bună uniformizare a acestuia pe secțiunea lingourilor respectiv o creștere a proprietăților de rezistență și de plasticitate cu 15-30% ;

17. Prin analiză de regresie cu ajutorul programului MS EXCEL 2000 au fost obținute ecuațiile de corelație și curbele de regresie care redau variația caracteristicilor mecanice ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 , Z) în funcție de parametrii tehnologici specifici turnării oțelurilor cu microrăcitori (consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora);

18. Cu ajutorul programului SIDHD3 au fost obținute corelații tridimensionale între caracteristicile mecanice, consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora, rezultând și curbele de contur pentru aceste suprafețe, prin intermediul cărora se poate determina consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora pentru valori ale caracteristicilor mecanice în anumite limite dorite;

19. Cunoașterea ecuațiilor și curbelor de corelație respectiv a suprafețelor permite determinarea mai precisă a influenței consumului specific de microrăcitori și a diametrului acestora asupra valorilor caracteristicilor mecanice obținute precum și optimizarea acestora în sensul îmbunătățirii calității produselor obținute prin prelucrare plastică;

20. Pe baza concluziilor formulate în urma analizării cercetărilor experimentale în cadrul tezei au fost extrapolate o parte din rezultatele modelării realizate și au fost stabilite posibilitățile de îmbunătățire a calității produselor obținute din lingouri mari din oțel, în condiții de eficiență tehnico-economică;

21. Modelarea proceselor constituie un instrument de bază util atât în faza de concepție cât și în cea de analiză a funcționării instalațiilor metalurgice, care

combinată cu utilizarea calculatoarelor permite determinarea regimurilor optime ale proceselor metalurgice.

22. Rezultatele și concluziile obținute în urma modelării pot fi extrapolate cu un grad înalt de veridicitate la procesele industriale care au loc la dirijarea solidificării a lingourilor mari din oțel în scopul îmbunătățirii calității produselor obținute din acestea prin deformare plastică;

23. Aplicarea ecuației de bilanț termic pentru turnarea oțelului în lingotieră cu microrăcitori a condus la obținerea unei relații (4.18), pentru determinarea temperaturii oțelului după terminarea topirii microrăcitorilor în funcție de temperatura de turnare a oțelului și consumul specific de microrăcitori;

24. Utilizând relația (4.18) se poate calcula cantitatea optimă de microrăcitori, în funcție de temperatura de turnare și temperatura lichidus (4.19);

25. Pe baza ecuației propuse și verificate a fost realizată o nomogramă (fig.4.1) care redă temperatura oțelului carbon după introducerea microrăcitorilor. Corelarea factorilor tehnologici, temperatura de turnare a oțelului, grosimea lingotierei, dimensiunea (granulația) microrăcitorilor și cantitatea specifică de microrăcitori dă garanția obținerii de lingouri și respectiv produse compacte și fără defecte;

26. Pe baza rezultatelor obținute a fost determinată o relație care permite calcularea raportul dintre masa microrăcitorilor utilizați și masa zonei de unde aceștia preiau căldura (4.29), iar utilizând programul de calcul SIDHD4, se obțin corelații sub formă grafică și analitică între volumul de oțel afectat de răcire, la introducerea microrăcitorilor și temperatura de turnare respectiv masa lingourilor și consumul specific de microrăcitori adăugați. Din analiza diagramelor se observă că procentul de volum afectat de răcire crește proporțional cu scăderea temperaturii de turnare astfel încât se impune un control riguros al cantității de microrăcitori adăugați.

27. Utilizând programul SIDHD5 și rezultatele obținute în cadrul experimentărilor, s-au obținut o serie de ecuații de corelație multiplă între un parametru dependent (caracteristicile mecanice - $R_{p0,2}$, R_m , A_5 , Z) și trei parametri independenți (temperatura de turnare, consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora). Prin prezentarea grafică a corelațiilor s-au obținut suprafețe de regresie, care prezintă puncte de maxim și respectiv minim. Prin intersectarea suprafețelor de corelație cu plane de nivel se obțin curbele de contur, care proiectate pe planul orizontal permit stabilirea domeniului optim de variație a cantității specifice de microrăcitori, a dimensiunii acestora respectiv a temperaturii de turnare pentru a obține caracteristici de rezistență respectiv de plasticitate în limitele dorite. Programul poate fi implementat cu succes în condiții industriale pentru turnarea oțelului cu microrăcitori;

28. Analizând diagramele prezentate în ce privește stabilirea domeniilor optime de variație pentru parametrii independenți (consum specific de microrăcitori, diametrul microrăcitorilor și temperatura de turnare) se observă următoarele:

- tehnologic, temperatura de turnare este cuprinsă între limitele 1560 – 1580°C;

- domeniile optime de variație pentru consumului specific de microrăcitori utilizați pentru dirijarea solidificării sunt cuprinse între 2 – 4kg/t, valorile maxime

pentru caracteristicile mecanice obținându-se pentru un consum specific cuprins între 2,5 - 3,5kg/t;

- domeniile optime de variație pentru diametrului microrăcitorilor utilizați sunt cuprinse între 3 – 5mm, valorile maxime pentru caracteristicile mecanice obținându-se pentru 3,5 – 4,5mm.

29. În urma utilizării metodei de dirijare a solidificării lingourilor mari din oțel, se obțin o serie de avantaje tehnico-economice în industria metalurgică, și anume:

- micșorarea volumului retasurii, conducând la o creștere a scoaterii de metal;
- micșorarea temperaturii de turnare;
- optimizarea procesului de solidificare;
- asigurarea unei omogenități a proprietăților mecanice și în același timp o creștere a acestora;
- reducerea semnificativă a cantității de oțel rebutat datorită contracției și a reducerii susceptibilității la fisurare.

Principalele **contribuții personale** sunt sintetizate astfel:

1. Analiza literaturii de specialitate referitoare la procesele care au loc la solidificarea lingourilor mari din oțel concomitent cu sistematizarea fenomenelor și proceselor specifice turnării lingourilor cu microrăcitori; în urma studiului monografic a rezultat material bibliografic util studiilor și cercetărilor ulterioare în domeniul amintit;

2. Realizarea unei sinteze a problematicii încălzirii lingourilor mari din oțel supuse deformării plastice pentru stabilirea modului de desfășurare în condiții de eficiență ridicată, a procesului de prelucrare plastică a lingourilor. În acest context cercetările experimentale au urmărit, ca regimul de încălzire și procesul de deformare plastică să decurgă conform tehnologiei existente, pentru a permite scoaterea în evidență a influenței structurii lingourilor asupra calității produselor obținute.

3. Realizarea programului SIDHD3 care permite obținerea de corelații tridimensionale între caracteristicile mecanice, consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora.

4. Aplicarea ecuației de bilanț termic pentru turnarea oțelului în lingotieră cu microrăcitori a condus la obținerea unei relații (4.18) pentru determinarea temperaturii oțelului după terminarea topirii microrăcitorilor în funcție de temperatura de turnare a oțelului și consumul specific de microrăcitori, cu ajutorul căreia se determină cantități optime de microrăcitori, în funcție de temperatura de turnare și temperatura lichidus (4.19);

5. Pe baza ecuațiilor propuse și verificate a fost întocmită o nomogramă (fig.4.1) care redă temperatura oțelului carbon după introducerea microrăcitorilor;

6. Obținerea relației (4.29) care permite calcularea raportului dintre masa microrăcitorilor utilizați și masa zonei de oțel de unde aceștia preiau căldura, la turnarea oțelului cu microrăcitori;

7. Întocmirea programului SIDHD4, cu ajutorul căruia se obțin corelații sub formă grafică și analitică între volumul de oțel afectat de răcire la introducerea

microrăcitorilor și temperatura de turnare respectiv masa lingourilor și consumul specific de microrăcitori adăugați.

8. Realizarea programului SIDHD5, cu ajutorul căruia se obțin ecuații de corelație multiplă între un parametru dependent (caracteristicile mecanice - $R_{p(0.2)}$, R_m , A_5 , Z) și trei parametri independenți (temperatura de turnare, consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora). Programul poate fi implementat cu succes în condiții industriale pentru turnarea oțelului cu microrăcitori;

9. Stabilirea domeniilor optime de variație pentru parametrii independenți, și anume: tehnologic, temperatura de turnare este cuprinsă între limitele 1560 – 1580°C, consumul specific de microrăcitori utilizați pentru dirijarea solidificării este cuprins între 2 – 4kg/t, iar diametrul microrăcitorilor utilizați variază între 3 – 5mm.

Acumulările de cunoștințe teoretice și practice rezultate în timpul perioadei de elaborare a tezei, au fost valorificate parțial în articole publicate în reviste de specialitate sau comunicate în cadrul conferințelor de profil și contracte de cercetare respectiv un contract tip GRANT – AT, beneficiar CNCSIS, ale căror titluri sunt cuprinse în bibliografie.

BIBLIOGRAFIE

1. Badea, S., Dumitriu, S. - "Unele considerații cu privire la procesarea prin forjare a pieselor de dimensiuni mari", *Metalurgia*, Nr. 7-8, 1997, pag. 70.
2. Badea, S., Dumitriu, S. - "Elemente privind procesarea prin forjare a rotoarelor și inelelor de dimensiuni mari", *Metalurgia*, Nr. 7-8, 1997, pag. 76.
3. Butnariu, I., Geantă, V. – Tehnologii speciale de elaborare și rafinare a oțelurilor, Litografia UPB, 1993.
4. Socalici, A. – Cercetări cu privire la influența hidrogenului asupra calității oțelurilor destinate turnării lingourilor mari de forjă, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul I, Fascicola 7, 1999, pag. 155.
5. Socalici, A., Hepuț, T., Maksay, St. – Influența vidului asupra calității oțelului, Conferința de Metalurgie, ICEM, București, 2000, pag. 53.
6. Vacu, S., ș.a. – Elaborarea oțelurilor aliate, vol. I și II, Ed. Tehnică, București, 1983.
7. Tripsa, I., s.a. - Optimizarea proceselor de turnare, solidificare și încălzire a lingourilor de oțel, Ed. Tehnică, București, 1975.
8. Socalici, A. – Cercetări privind influența factorilor tehnologici de elaborare asupra calității lingourilor mari din oțel slab aliat, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul IV, Fascicola 1, 2002, pag. 27.
9. Socalici, A. – Influența factorilor tehnologici de elaborare și turnare asupra calității lingourilor mari din oțel, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul III, Fascicola 1, 2001, pag. 120.
10. Socalici, A., Hepuț, T., Ardelean, E., Nica, Gh. - Tehnologii pentru îmbunătățirea calității oțelului, Ed. Mirton, Timișoara, 2003.
11. Geru, N. - Proprietățile metalelor și metode fizice de control, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1981.
12. Brian, G. T. - Casting Process Simulation and Visualization, A JOM-e Perspective, *JOM: HTML Enhanced Articles*, January 2002, pag. 33.
13. Brown, S., Spittle, J., James, J. - Solidification of a Complex Foundry Casting, A JOM-e Perspective, *JOM: HTML Enhanced Articles*, January 2002, pag. 55.
14. 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.
15. Davis, S.H. - Theory of solidification, Cambridge Univ. Press, 2001, ISBN 0-521-65080.
16. Efimov, V.A. – Turnarea și cristalizarea oțelurilor, Ed. Tehnică, București, 1976.

17. Ilca, I., Socalici, A –“Cercetări privind îmbunătățirea calității unor piese obținute prin forjare”, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Tomul I, Fascicola 7, 1999, pag. 150.
18. Socalici, A. - Grant AT, Director proiect - Cercetări și experimentări privind îmbunătățirea structurii lingourilor de oțel, COD CNCSIS 191, Nr. 335500 din 01.07.2003.
19. 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.
20. Byrne, P., ș.a. – Solidification control by numerical optimization, Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
21. Amialov, B.I. - "Vliianie temperaturî austenitizatii i reglementiruemoi deformatii covcoi na structura i svoistva productov perlitnovo prevrasceniia", Referativnii jurnal, nr.12 Moskva, 1990.
22. Bratu, C., Sofroni, L., Stavarache, S. – Cercetări privind mărirea compactității pieselor mari, turnate din oțel, prin dirijarea procesului de solidificare, Metalurgia, Nr. 3, 1985, pag.133.
23. Bratu, C., Sofroni, L., Cucea, V. – Cercetări privind îmbunătățirea calității fontelor prin tratare, în stare lichidă, cu microrăcitori, Metalurgia, Nr.7, 1982, pag.365.
24. Bratu, C., Sofroni, L. – Cercetări privind dirijarea procesului de cristalizare a oțelurilor prin utilizarea microrăcitorilor, Metalurgia, Nr.6, 1981, pag.281.
25. Bratu, C. – Cercetări privind dirijarea procesului de solidificare a lingourilor prin introducerea microrăcitorilor, Metalurgia, Nr.3, 1982, pag.115.
26. Cebeci, T., Bradshaw, P. - Physical and Computational Aspects of Convective Heat Transfer, Springer - Verlag, 1998.
27. Adrian, M., Badea, S. - Bazele proceselor de deformare plastică, Ed. Tehnică, București, 1982.
28. Heput T., Petre D., Socalici A. Karsai E - " Cercetari privind imbunatatirea caracteristicilor otelurilor speciale.", Buletinul stiintific U.P Timsoara, Tom 40(54), Fas.1-2, 1995; 155.
29. Anno, I.K. - "Analiz asobennostei scorostnovo struinovo nagreva zagotovok v cuznecinîh peciah", Referativnii jurnal, nr.3 Moskva, 1991.
30. Chitu, G. - "Preocupări în direcția re tehnologizării industriei siderurgice la nivel mondial", Metalurgia, Nr. 7-8, 1997, pag. 64.
31. Cațarschi, V., Ciochina, C., Cațarschi, S. - "Programarea asistată de calculator a ciclurilor de încălzire a oțelurilor în cuptoarele de forjă cu vatră mobilă", Lucrările simpozionului tehnico-stiințific "TEHNOMUS VII" Suceava, iunie 1993.
32. Cazimirovici, E. - Teoria deformării plastice, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1981.
33. Ilca, I., Socalici, A. - Cercetări cu privire la determinarea câmpului de temperatură în lingouri, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Tomul II, Fascicola 1, 2000, pag. 30.

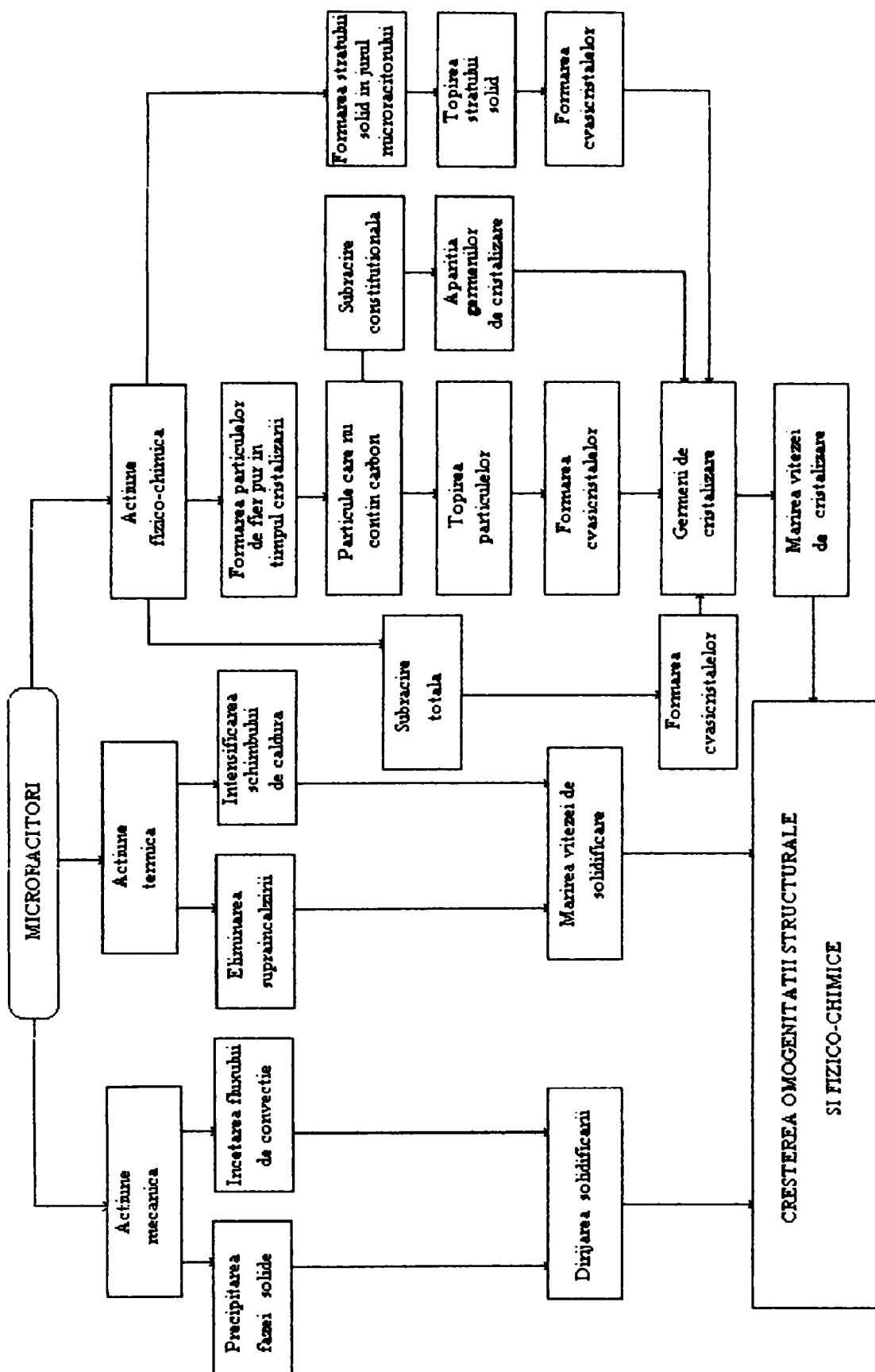
34. Cazimirovici, E. - Bazele teoretice ale deformării plastice, Ed. 46 BREN, București, 1999.
35. Dragan, I. - Tehnologia deformărilor plastice, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1981.
36. Ilca, I., Dragan, I., Badea, S., Cazimirovici, E. - Tehnologia deformărilor plastice, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1979.
37. Chelu, Gh. - Modelarea și optimizarea proceselor de prelucrare plastică la cald, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 2002.
38. Ilca, I., Maksay, Șt., Mânea, L. - Contribuții la studiul încălzirii lingourilor în cuptoare industriale, Metalurgia, Nr.10, 1982, pag 521.
39. Ilca, I., Samoilescu, S. - Tehnologia deformărilor plastice, Vol. I și II, curs litografiat, Institutul de Subingineri Hunedoara, 1975.
40. Yogesh, J., Torrance, K. - Computational Heat Transfer, Hemisphere Publishing Corporation, 1986.
41. Ilca, I. - Determinarea gradientului și a tensiunilor termice în perioada de preîncalzire la oțelurile aliate, Revista Metalurgia, nr.4, aprilie 1974, pag. 256.
42. Ilca, I. - "Cum să evităm apariția tensiunilor termice în timpul încălzirii oțelurilor aliate", Buletinul Științific al UPT, Tom 40(54), Fascicola 1, 2, 1995, pag. 170.
43. Vraciu, G., Popa, A. - Metode numerice cu aplicații în tehnica de calcul, Scrisul românesc, Craiova, 1982.
44. Minkowycz, W.J., s.a. - Advances in Numerical Heat Transfer, Volume I, Taylor & Francis, 1996.
45. Minkowycz, W.J., s.a. - Handbook of Numerical Heat Transfer, John Wiley & Sons, 1988.
46. Negru, L.D. - Transmiterea căldurii și dinamica gazelor, partea I, lito. IPTVT, 1990.
47. Socalici, A., Maksay, Șt. - Considerații termice în metalurgie, Ed. Sigma Plus, Deva, 2000.
48. Socalici, A., Ilca, I., Maksay, Șt. - Distribuția câmpului de temperaturi în lingourile de oțel, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, Tomul IV, Fascicola 3, 2002, pag.55.
49. Hepuț, T., Socalici, A., ș.a. - Studiul privind posibilitățile de turnare a lingourilor mari de forja de 14; 17,5 și 23,5 tone, Contract cercetare Nr. 3500/45, S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, 1996.
50. Hepuț, T., Socalici, A. - The Effect of Vacuum the Non Ferrous Including Removal, Buletinul Științific al UPT, Tom 43(57), Fascicola 1, 1998, pag. 339.
51. Ilca, I., Socalici, A., Heput, T., Klusch, A. - "Researches on the impruvment of large ingots in pig iron by forging, cast in steel with alloys of chrome, nickel and molibden", Buletinul Științific al UPT, Tom 42(56), Fascicola 1, 1997, pag.141.
52. Ilca, I., Socalici, A. - "Researches on leading ingot solidification of steel for forging", Buletinul Științific al UPT, Tom 42(56), Fascicola 2, 1997, pag. 226.
53. Ilca, I., Maksay, Șt., Socalici, A. - Cercetări privind îmbunătățirea unor piese obținute prin forjare, Buletinul Științific al UPT, Tom 45(59), Fascicola 1, 2000, pag 299.

54. Ilca, I., Socalici, A. - "Consideration on the reduction of hydrogen in steel meant for casting large forging ingots, Buletinul Științific al UPT, Tom 44(58), Fascicola 1, 1999, pag.355.
55. Bratu, C. - Stabilirea parametrilor tehnologici la turnarea oțelurilor cu microrăcitori, Metalurgia, Nr.12, 1979, pag.603.
56. Ilca, I., Heput, T., Prejban, I., Petre, D - "Dirijarea solidificării lingourilor", Conferința Tehnologii și utilaje de elaborare, turnare, sudare, Brașov, 1986, pag 150.
57. Ioan, R. - Cercetări teoretice și experimentale în domeniul solidificării oțelului, Ed. Destin Deva, 2000.
58. Ilca, I., Heput, T., Prejban, I., Petre, D - "Modern technologies for the improvement of the structure and the qualitative characteristics of the steel", Conferința de construcții metalice, Timișoara, 1985, pag.78.
59. Ștefănescu, Fl., Sofroni, L., Bratu, C. - Dirijarea solidificării aliajelor la obținerea pieselor turnate de performanță, Metalurgia, Nr.2, 1988, pag.93.
60. Vertan, H.P., Bartiș, D., Iacobescu, A. - Aspecte ale transferului de căldură la solidificarea dirijată folosind MEF, Metalurgia, Nr. 11-12, 1998, pag.61.
61. Bratu, C., Bogdan, O., Balescu, C. - Estimarea prin metode numerice a defectelor interne ce apar la turnarea pieselor și lingourilor, Metalurgia, Nr.7, 1995, pag.5.
62. Bratu, C., Sofroni, L., Ștefănescu, Fl.- Influența factorilor tehnologici asupra tendinței de formare a crăpăturilor la cald la piesele turnate din oțel, Metalurgia, Nr.4, 1988, pag.209.
63. Socalici, A., ș.a. - Research and experiments regarding the conducting of the large steel ingots solidification process, Scientific Conference Research and Development of Machine Elements and Systems, Sarajevo - Iahorina IREMES, 2002, pag. 397.
64. Sofroni, L., Bratu, C., Ștefănescu, Fl. - Folosirea microrăcitorilor la obținerea lingourilor mari din oțel, Metalurgia, Nr.7, 1984, pag. 371.
65. Ilca, I., Socalici, A - Cercetări cu privire la îmbunătățirea structurii lingourilor mari de forjă, Conferința de Metalurgie, ICEM, București, 2000, pag. 53.
66. Simionescu, I., s.a. - Metode numerice în tehnica, Editura Tehnică, București, 1995.
67. Soporan, V., Pavăl, C., Vamos, C. - Modelarea numerică a turnării oțelurilor în lingotieră în vederea optimizării parametrilor tehnologici, Metalurgia, Nr.11, 1996, pag.42.
68. Ștefănescu, D.M. - Computer Simulation of Microstructural Evolution, Proceedings of a Simposium The Metallurgical Society in Toronto, Canada, october 13-17, 1985, pag.171.
69. Bratu, C., Sofroni, L. - Model matematic care caracterizează influența microrăcitorilor asupra proprietăților mecanice a oțelurilor carbon, Metalurgia, Nr.2, 1982, pag.58.
70. Socalici, A. - Research and experiments regarding the structure improvement of steel ingots, VIIth International Symposium Interdisciplinary Regional Research, 25-26 septembrie, Hunedoara, 2003, suport electronic.

71. Socalici, A., Ardelean, E., Hepuț, T. - Research concerning the structure improvement of steel ingots, *Metalurgia Internațional*, nr.5, 2003, pag. 23.
72. Badea, S., Dumitriu, S. - "Elemente privind procesarea prin forjare a rotoarelor și inelelor de dimensiuni mari", *Metalurgia*, Nr. 7-8, 1997.
73. Badea, S., Ghiban, N. - Aspecte privind dezvoltarea și valorificarea noilor tehnologii, mașini și instalații în secțiile de forjă, *Metalurgia*, Nr.11-12, 1995, pag.5.
74. Cosma, D., s.a. - Optimisation of Solidification, Cooling and Reheating of Steel Ingots, *Steel Times*, October, 1972, pag. 35.
75. Hepuț, T., Socalici, A., Nica, Gh., Ardelean, E. - Defectele lingourilor și semifabricatelor din oțel, Ed. Politehnica, Timișoara, 2001.
76. Ilca, I., Socalici, A. - "Utilizarea microrăcitorilor la dirijarea solidificării lingourilor mari din oțel", *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul I, Fascicola 7, 1999, pag. 256.
77. Ilca, I., Socalici, A. - Folosirea microrăcitorilor pentru îmbunătățirea calității lingourilor mari de forjă, *Buletinul Științific al UPT*, Tom 46(60), Fascicola 2, 2001, pag 147.
78. Ilca, I., Socalici, A., Maksay, St. - Contribuții privind îmbunătățirea calității lingourilor mari de forjă, *Conferința Națională de Metalurgie și Știința Materialelor*, 20-21 sept. București, 2001, pag. 172.
79. Ilca, I., Socalici, A. - Model matematic cu privire la influența microrăcitorilor asupra proprietăților mecanice ale oțelurilor, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul III, Fascicola 1, 2001, pag 116.
80. Marinescu, M., s.a. - *Termodinamica tehnică*, vol. 3, Editura Matrix Rom, Bucuresti, 1998.
81. Popescu I.V. - *Forjarea și extruziunea materialelor metalice*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1976.
82. Popescu, I.V. - *Analiza și îmbunătățirea calității pieselor forjate*, Ed. Tehnică, București, 1965.
83. Popescu, V., Dragan, I., Alexandru, T. - *Tehnologia forjării*, Ed. Tehnică, București, 1978.
84. Saban, R., s.a. - *Studiul și ingineria materialelor*, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1995.
85. Socalici, A., Ilca, I., Hepuț, T. - Contribuții privind stabilirea parametrilor tehnologici în cazul turnării lingourilor din oțel cu microrăcitori, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul IV, Fascicola 1, 2002, pag 23.
86. Socalici, A., Ilca, I., Maksay, St. - Contribuții cu privire la influența microrăcitorilor asupra proprietăților mecanice ale oțelurilor carbon, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul IV, Fascicola 1, 2002, pag 19.
87. Socalici, A., Hepuț, T. - Acțiunea vidului asupra procesului de îndepărtare a hidrogenului din oțel, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul II, Fascicola 1, 2000, pag. 166.
88. Socalici, A. - "Cercetări cu privire la influența regimului de răcire a pieselor forjate grele asupra tensiunilor care apar în acestea", *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul I, Fascicola 1, 1999, pag.143.

89. Socalici, A. – “Considerații asupra distribuției câmpului de temperaturi în lingouri, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul I, Fascicola 7, 1999, pag. 150.
90. Socalici, A. - Cercetari privind influenta compozitiei chimice asupra caracteristicilor mecanice a pieselor obtinute prin forjare, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul I, Fascicola 7, 1999, pag. 156.
91. Socalici, A. - Consideratii cu privire la influența elementelor de aliere asupra caracteristicilor mecanice a pieselor obținute prin forjare, *Analele Facultății de Inginerie Hunedoara*, Tomul I, Fascicola 7, 1999, pag. 160.
92. 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.
93. Porter, D. - Modelling of structural materials, *International Materials Reviews*, vol. 47, iss. 5, 2002, pag.225.
94. Beckermann, C - Modelling of macrosegregation: applications and future needs, *International Materials Reviews*, vol. 47, iss. 5, 2002, pag.243.
95. Bocalini, H., Goldstein, H. – Solidification of high speed steel, *International Materials Reviews*, vol. 46, iss. 2, 2001, pag.92.

ANEXE



Interactiunea complexă a microcrăcitorilor cu oțelul lichid

Distribuția unidimensională a temperaturii prin metoda diferențelor finite

```

% PROGRAMUL UNITEM.m STABILESTE DISTRIBUTIA TEMPERATURII
% INTR-O RETEA UNIDIMENSIONALA, PRIN METODA DIFERENTELOR FINITE
clc,clear,
n=30;
for i=1:n,
x(i)=i;
t(i)=20;
end,
N=35;M=80;
h=figure,
for i=1:h,
close(i),
end,
h=0
if M<=2*N+2,
return,
end,
for nr=1:3000 % numar cicluri
tf(1)=(1-(2*N+2)/M)*t(1)+2/M*(t(2)+N*1000);
tf(n)=(1-(2*N+2)/M)*t(n)+2/M*(t(n-1)+N*1000);
for i=2:n-1
tf(i)=(1-2/M)*t(i)+1/M*(t(i-1)+t(i+1));
end
t=tf;
if fix(nr/300)==nr/300,
t
h=figure;
xi=1:1:n,yi=spline(x,tf,xi);plot(x,tf,xi,yi)
grid on,
end
end

t =
Columns 1 through 7
991.9920 712.2255 469.1468 284.4708 161.1876 88.4188 50.1766
Columns 8 through 14
32.1563 24.4902 21.5270 20.4800 20.1400 20.0381 20.0098
Columns 15 through 21
20.0028 20.0028 20.0098 20.0381 20.1400 20.4800 21.5270
Columns 22 through 28
24.4902 32.1563 50.1766 88.4188 161.1876 284.4708 469.1468
Columns 29 through 30
712.2255 991.9920

t =
Columns 1 through 7
994.2841 794.4134 607.9540 445.3248 312.6305 211.2576 138.6663
Columns 8 through 14
89.8794 59.0616 40.7363 30.4629 25.0266 22.3151 21.0603

```

Columns 15 through 21

20.5789 20.5789 21.0603 22.3151 25.0266 30.4629 40.7363

Columns 22 through 28

59.0616 89.8794 138.6663 211.2576 312.6305 445.3248 607.9540

Columns 29 through 30

794.4134 994.2841

t =

Columns 1 through 7

995.3186 831.5727 675.2058 532.4232 407.7316 303.5619 220.2840

Columns 8 through 14

156.5501 109.8369 77.0373 54.9788 40.7981 32.1571 27.3263

Columns 15 through 21

25.1843 25.1843 27.3263 32.1571 40.7981 54.9788 77.0373

Columns 22 through 28

109.8369 156.5501 220.2840 303.5619 407.7316 532.4232 675.2058

Columns 29 through 30

831.5727 995.3186

t =

Columns 1 through 7

995.9396 853.8935 716.6662 588.4663 472.6425 371.4357 285.8967

Columns 8 through 14

215.9638 160.6649 118.3962 87.2211 65.1482 50.3578 41.3670

Columns 15 through 21

37.1378 37.1378 41.3670 50.3578 65.1482 87.2211 118.3962

Columns 22 through 28

160.6649 215.9638 285.8967 371.4357 472.6425 588.4663 716.6662

Columns 29 through 30

853.8935 995.9396

t =

Columns 1 through 7

996.3651 869.1922 745.4807 628.3228 520.3087 423.3632 338.6649

Columns 8 through 14

266.6521 207.1050 159.2876 122.1222 94.3750 74.8310 62.4437

Columns 15 through 21

56.4503 56.4503 62.4437 74.8310 94.3750 122.1222 159.2876

Columns 22 through 28

207.1050 266.6521 338.6649 423.3632 520.3087 628.3228 745.4807

Columns 29 through 30

869.1922 996.3651

t =

Columns 1 through 7

996.6804 880.5315 767.0289 658.5736 557.2474 464.7019 382.0934

Columns 8 through 14

310.0699 248.8070 198.0847 157.3935 126.0565 103.3527 88.6305

Columns 15 through 21

81.4003 81.4003 88.6305 103.3527 126.0565 157.3935 198.0847

Columns 22 through 28

248.8070 310.0699 382.0934 464.7019 557.2474 658.5736 767.0289

Columns 29 through 30

880.5315 996.6804

t =

Columns 1 through 7

996.9270 889.4020 783.9954 682.6524 587.1038 498.7886 418.8040
 Columns 8 through 14
 347.8891 286.4397 234.5522 192.0894 158.7600 134.2025 118.0646
 Columns 15 through 21
 110.0709 110.0709 118.0646 134.2025 158.7600 192.0894 234.5522
 Columns 22 through 28
 286.4397 347.8891 418.8040 498.7886 587.1038 682.6524 783.9954
 Columns 29 through 30
 889.4020 996.9270

t =

Columns 1 through 7
 997.1281 896.6348 797.9012 702.5588 612.0898 527.7712 450.6374
 Columns 8 through 14
 381.4638 320.7721 268.8547 225.8163 191.6243 166.1651 149.2973
 Columns 15 through 21
 140.8984 140.8984 149.2973 166.1651 191.6243 225.8163 268.8547
 Columns 22 through 28
 320.7721 381.4638 450.6374 527.7712 612.0898 702.5588 797.9012
 Columns 29 through 30
 896.6348 997.1281

t =

Columns 1 through 7
 997.2976 902.7355 809.6807 719.5418 633.6205 553.0699 478.8661
 Columns 8 through 14
 411.7931 352.4427 301.2280 258.4080 224.1201 198.4159 181.2969
 Columns 15 through 21
 172.7448 172.7448 181.2969 198.4159 224.1201 258.4080 301.2280
 Columns 22 through 28
 352.4427 411.7931 478.8661 553.0699 633.6205 719.5418 809.6807
 Columns 29 through 30
 902.7355 997.2976

t =

Columns 1 through 7
 997.4447 908.0286 819.9368 734.4154 652.6312 575.6409 504.3680
 Columns 8 through 14
 439.5899 381.9343 331.8856 289.7991 255.9208 230.4097 213.3612
 Columns 15 through 21
 204.8261 204.8261 213.3612 230.4097 255.9208 289.7991 331.8856
 Columns 22 through 28
 381.9343 439.5899 504.3680 575.6409 652.6312 734.4154 819.9368
 Columns 29 through 30
 908.286 997.4447

FORMULELE UTILIZATE SUNT URMATOARELE:

```
tf(1)=(1-(2*N+2)/M)*t(1)+2/M*(t(2)+N*1000);
tf(n)=(1-(2*N+2)/M)*t(n)+2/M*(t(n-1)+N*1000);
for i=2:n-1
tf(i)=(1-2/M)*t(i)+1/M*(t(i-1)+t(i+1));
end
```

PROGRAMUL UTILIZAT

```
clc,clear,
tint=20;text=500;
h=figure;for i=1:h,close(i),end,h=0;
```

```

a=.05;
for i=1:20,
tau(i)=20+i*30;
end;
b=3;
nri=5;
for i=1:(nri+1),
xi(i)=(i-1)*b/nri;
end,
xi;
i=1:5;
de=(2*i-1)*pi/2;
for k=1:length(tau),ta=tau(k);
for j=1:length(xi),xv=xi(j);
term=(1./de).*(sin(de)).*(cos((de).*xv/b)).*exp((-a*(de).^2)*ta/b^2);
te=text+2*(tint-text)*sum(term);
t(k,length(xi)-j+1)=te;
t(k,length(xi)+j-1)=te;
end,
end,
t
[xp,yp]=meshdom(tau(1):2:tau(length(tau)),-b:2:b);
zi=interp5(tau,xi,t,xp,yp);
zi=interp5(t,4);
h=figure;C=contour(zi,6);clabel(C,'manual'),grid on
h=figure;mesh(t),grid on
h=figure;meshc(t),grid on;
h=figure;meshz(t),grid on;
h=figure;surf(t),grid on;
h=figure;surfc(t),grid on;

```

TABEL COORDONATELE LINIARE SI TEMPORALE ALE PUNCTELOR DE ACEEASI VALOARE A TEMPERATURII

C =

Columns 1 through 7

236.4022	4.3303	5.0000	6.0000	7.0000	7.6697	280.3352
5.0000	1.0000	1.2948	1.4248	1.2948	1.0000	7.0000

Columns 8 through 14

3.5636	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000	8.0000	8.4364
1.0000	1.3519	1.7408	1.8496	1.7408	1.3519	1.0000

Columns 15 through 21

324.2682	2.9338	3.0000	4.0000	4.3653	5.0000	6.0000
11.0000	1.0000	1.0926	1.8741	2.0000	2.2811	2.4124

Columns 22 through 28

7.0000	7.6347	8.0000	9.0000	9.0662	368.2011	2.4224
2.2811	2.0000	1.8741	1.0926	1.0000	13.0000	1.0000

Columns 29 through 35

3.0000	3.2615	4.0000	5.0000	5.4713	6.0000	6.5287
1.8078	2.0000	2.5988	2.9523	3.0000	3.0767	3.0000

Columns 36 through 42

7.0000	8.0000	8.7385	9.0000	9.5776	412.1341	1.9200
2.9523	2.5988	2.0000	1.8078	1.0000	17.0000	1.0000

Columns 43 through 49

2.0000	2.4355	3.0000	3.2786	4.0000	5.0000	5.5864
1.2357	2.0000	2.7939	3.0000	3.5851	3.9407	4.0000

Columns 50 through 56

6.0000	6.4136	7.0000	8.0000	8.7214	9.0000	9.5645
4.0600	4.0000	3.9407	3.5851	3.0000	2.7939	2.0000

Columns 57 through 63

10.0000	10.0800	456.0670	1.4600	1.6964	2.0000	2.0563
1.2357	1.0000	19.0000	1.0000	2.0000	2.9002	3.0000

Columns 64 through 70

2.6488	3.0000	3.6838	4.0000	5.0000	6.0000	7.0000
4.0000	4.4940	5.0000	5.2564	5.6611	5.7739	5.6611

Columns 71 through 77

8.0000	8.3162	9.0000	9.3512	9.9437	10.0000	10.3036
5.2564	5.0000	4.4940	4.0000	3.0000	2.9002	2.0000

Column 78

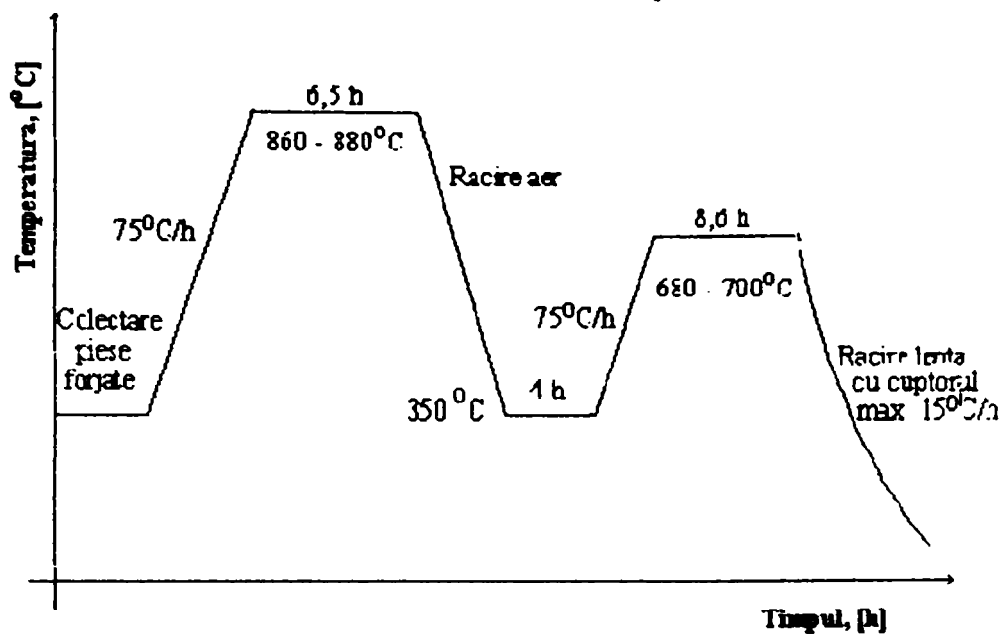
10.5400
1.0000

Distribuția bidimensională a temperaturii prin metoda diferențelor finite

```

% PROGRAM PARDRF.m stabileste distributia temperaturii
% intr-un paralelipiped finit
clc, clear, format compact;
h=figure; for i=1:h, close(i),end,
%lam=29.2,cp=465,ro=7800,a=lam/cp/ro=8.050730631375792e-006
%a= 8.050730631375792e-006
tc=1200;
to=20;
L=1.2/2,
b=1.2/2,
H=2.1/2,
%x=[0 .2*L .4*L .6*L .8*L L] ;
for i=1:10,x(i)=i*L/10;end
%y=[0 .25*b .5*b .75*b b];
for i=1:10,y(i)=i*b/10;end
z=H-.7;
ta=[1 5 10 20]; % timpul la care se afiseaza temperatura
% disp('    0    .25*b    .5*b    .75*b    b ')
% disp('    .2*L ')
% disp('    .4*L ')
% disp('    .6*L'),
% disp('    .8*L'),
% disp('    L'),
nrc=10; % nrc=numar cicluri de insumare
for k=1:length(ta)
tau=ta(k);
vec(1)=z;vec(2)=tau;
disp(' ')
disp('    z    t'),disp (vec)
disp(' ')
g=zeros(length(y),length(x));
for m=1:length (x)
for n=1:length (y)
s=0 ;
for i=1:nrc
for j=1:nrc
for k=1:nrc
di=(2*i-1)*pi/2,dj=(2*j-1)*pi/2;dk=(2*k-1)*pi/2;
bet=(di/L)^2+(dj/b)^2+(dk/H)^2;
ter=1/(di*dj*dk)*cos(di*x(m)/L)*cos(dj*y(n)/b)*cos(dk*z/H);
ter=ter*exp(-bet*a*tau)*sin(di)*sin(dj)*sin(dk);
ter=ter*8;
s=s+ter;
g(n,m)=tc+(to-tc)*s;
disp (g)
h=figure;
meshc(x,y,g)
end

```

Diagrama de normalizare - recoacere
Mediul de răcire: aer+cuptor

Programul SIDHD3

```

Rp0.2
clear
clc
x1 = [1,1,1,1,1,1.5,1.5,1.5,1.5,1.5,2,2,2,2,2,3,3,3,3,3,4,4,4,4,4]
x2 = [2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6]
y =
[446,415,409,404,397,390,426,411,412,404,401,435,422,416,410,409,446,429,426,421,417,449,44
6,447,440]
echo off
x12 = x1.^2;
x22 = x2.^2;
x13 = x1.^3;
x23 = x2.^3;
echo on
echo off
clc
a11 = length(x1);
a12 = sum(x1);
a13 = sum(x2);
a14 = sum(x1.*x2);
a15 = sum(x1.^2);
a16 = sum(x2.^2);
a21 = sum(x1);
a22 = sum(x1.^2);
a23 = sum(x1.*x2);
a24 = sum(x12.*x2);
a25 = sum(x1.^3);
a26 = sum(x1.*x22);
a31 = sum(x2);
a32 = sum(x1.*x2);
a33 = sum(x2.^2);
a34 = sum(x1.*x22);
a35 = sum(x12.*x2);
a36 = sum(x2.^3);
a41 = sum(x1.*x2);
a42 = sum(x12.*x2);
a43 = sum(x1.*x22);
a44 = sum(x12.*x22);
a45 = sum(x13.*x2);
a46 = sum(x1.*x23);
a51 = sum(x1.^2);
a52 = sum(x1.^3);
a53 = sum(x12.*x2);
a54 = sum(x13.*x2);
a55 = sum(x1.^4);
a56 = sum(x12.*x22);
a61 = sum(x2.^2);
a62 = sum(x1.*x22);
a63 = sum(x2.^3);
a64 = sum(x1.*x23);

```

```

a65 = sum(x12.*x22);
a66 = sum(x2.^4);
z =
[a11,a12,a13,a14,a15,a16;a21,a22,a23,a24,a25,a26;a31,a32,a33,a34,a35,a36;a41,a42,a43,a44,a45,a
46;a51,a52,a53,a54,a55,a56;a61,a62,a63,a64,a65,a66]
x = inv(z)
echo on
echo off
clc
c1 = sum(y);
c2 = sum(y.*x1);
c3 = sum(y.*x2);
c4 = sum(y.*x1.*x2);
c5 = sum(y.*x1.^2);
c6 = sum(y.*x2.^2);
c = [c1;c2;c3;c4;c5;c6]
echo on
echo off
clc
b = x * c
echo on
echo off
clc
ryx1 = cor(y,x1)
ryx2 = cor(y,x2)
rx1x2 = cor(x1,x2)
ryx1x2 = sqrt((ryx1^2+ryx2^2-2*ryx1*ryx2*rx1x2)/(1-rx1x2^2))
echo on
% Urmeaza trasarea suprafetei spatial si proectia ei in plan.
echo off
clc
mx =min(x1);
nx =max(x1);
sx =2;
my =min(x2);
ny =max(x2);
sy =0.1;
[u,v] = meshgrid(mx:sx:nx,my:sy:ny);
echo on
z = b(1) + b(2).*u + b(3).*v + b(4).*u.*v + b(5).*u.^2 + b(6).*v.^2;
echo off
clg
surfc(u,v,z);
xlabel('m [kg/t]')
ylabel('d[mm]')
zlabel('Rp0,2 [N/mm2]')
grid
reset(gcf)
view(150,20)
R_m
clear
clc

```

```

x1 = [1,1,1,1,1,1.5,1.5,1.5,1.5,1.5,2,2,2,2,2,3,3,3,3,3,4,4,4,4,4]
x2 = [2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6]
y =
[654,700,646,643,690,672,668,665,700,659,690,650,682,700,677,705,700,698,699,692,720,715,65
0,710,709]
echo off
x12 = x1.^2;
x22 = x2.^2;
x13 = x1.^3;
x23 = x2.^3;
echo on
echo off
clc
a11 = length(x1);
a12 = sum(x1);
a13 = sum(x2);
a14 = sum(x1.*x2);
a15 = sum(x1.^2);
a16 = sum(x2.^2);
a21 = sum(x1);
a22 = sum(x1.^2);
a23 = sum(x1.*x2);
a24 = sum(x12.*x2);
a25 = sum(x1.^3);
a26 = sum(x1.*x22);
a31 = sum(x2);
a32 = sum(x1.*x2);
a33 = sum(x2.^2);
a34 = sum(x1.*x22);
a35 = sum(x12.*x2);
a36 = sum(x2.^3);
a41 = sum(x1.*x2);
a42 = sum(x12.*x2);
a43 = sum(x1.*x22);
a44 = sum(x12.*x22);
a45 = sum(x13.*x2);
a46 = sum(x1.*x23);
a51 = sum(x1.^2);
a52 = sum(x1.^3);
a53 = sum(x12.*x2);
a54 = sum(x13.*x2);
a55 = sum(x1.^4);
a56 = sum(x12.*x22);
a61 = sum(x2.^2);
a62 = sum(x1.*x22);
a63 = sum(x2.^3);
a64 = sum(x1.*x23);
a65 = sum(x12.*x22);
a66 = sum(x2.^4);
z =
[a11,a12,a13,a14,a15,a16;a21,a22,a23,a24,a25,a26;a31,a32,a33,a34,a35,a36;a41,a42,a43,a44,a45,a
46;a51,a52,a53,a54,a55,a56;a61,a62,a63,a64,a65,a66]

```

```

x = inv(z)
echo on
echo off
clc
c1 = sum(y);
c2 = sum(y.*x1);
c3 = sum(y.*x2);
c4 = sum(y.*x1.*x2);
c5 = sum(y.*x1.^2);
c6 = sum(y.*x2.^2);
c = [c1;c2;c3;c4;c5;c6]
echo on
echo off
clc
b = x * c
echo on
echo off
clc
ryx1 = cor(y,x1)
ryx2 = cor(y,x2)
rx1x2 = cor(x1,x2)
ryx1x2 = sqrt((ryx1^2+ryx2^2-2*ryx1*ryx2*rx1x2)/(1-rx1x2^2))
echo on
% Urmeaza trasarea suprafetei spatial si proectia ei in plan.
echo off
clc
mx =min(x1);
nx =max(x1);
sx =2;
my =min(x2);
ny =max(x2);
sy =0.1;
[u,v] = meshgrid(mx:sx:nx,my:sy:ny);
echo on
z = b(1) + b(2).*u + b(3).*v + b(4).*u.*v + b(5).*u.^2 + b(6).*v.^2;
echo off
clg
surfc(u,v,z);
xlabel('m [kg/t]')
ylabel('d[mm]')
zlabel('Rm [N/mm2]')
grid
reset(gcf)
view(150,20)
A5
clear
clc
x1 = [1,1,1,1,1,1.5,1.5,1.5,1.5,1.5,2,2,2,2,2,3,3,3,3,3,4,4,4,4,4]
x2 = [2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6]
y = [31,30,30,29,29,33,32,31,32,31,35,34,32,34,30,37,35,36,34,32,40,37,39,36,34]
echo off
x12 = x1.^2;

```

```
x22 = x2.^2;
x13 = x1.^3;
x23 = x2.^3;
echo on
echo off
clc
a11 = length(x1);
a12 = sum(x1);
a13 = sum(x2);
a14 = sum(x1.*x2);
a15 = sum(x1.^2);
a16 = sum(x2.^2);
a21 = sum(x1);
a22 = sum(x1.^2);
a23 = sum(x1.*x2);
a24 = sum(x12.*x2);
a25 = sum(x1.^3);
a26 = sum(x1.*x22);
a31 = sum(x2);
a32 = sum(x1.*x2);
a33 = sum(x2.^2);
a34 = sum(x1.*x22);
a35 = sum(x12.*x2);
a36 = sum(x2.^3);
a41 = sum(x1.*x2);
a42 = sum(x12.*x2);
a43 = sum(x1.*x22);
a44 = sum(x12.*x22);
a45 = sum(x13.*x2);
a46 = sum(x1.*x23);
a51 = sum(x1.^2);
a52 = sum(x1.^3);
a53 = sum(x12.*x2);
a54 = sum(x13.*x2);
a55 = sum(x1.^4);
a56 = sum(x12.*x22);
a61 = sum(x2.^2);
a62 = sum(x1.*x22);
a63 = sum(x2.^3);
a64 = sum(x1.*x23);
a65 = sum(x12.*x22);
a66 = sum(x2.^4);
z =
[a11,a12,a13,a14,a15,a16;a21,a22,a23,a24,a25,a26;a31,a32,a33,a34,a35,a36;a41,a42,a43,a44,a45,a
46;a51,a52,a53,a54,a55,a56;a61,a62,a63,a64,a65,a66]
x = inv(z)
echo on
echo off
clc
c1 = sum(y);
c2 = sum(y.*x1);
c3 = sum(y.*x2);
```



```

c4 = sum(y.*x1.*x2);
c5 = sum(y.*x1.^2);
c6 = sum(y.*x2.^2);
c = [c1;c2;c3;c4;c5;c6]
echo on
echo off
clc
b = x * c
echo on
echo off
clc
ryx1 = cor(y,x1)
ryx2 = cor(y,x2)
rx1x2 = cor(x1,x2)
ryx1x2 = sqrt((ryx1^2+ryx2^2-2*ryx1*ryx2*rx1x2)/(1-rx1x2^2))
echo on
% Urmeaza trasarea suprafetei spatial si proectia ei in plan
echo off
clc
mx =min(x1);
nx =max(x1);
sx =2;
my =min(x2);
ny =max(x2);
sy =0.1;
[u,v] = meshgrid(mx:sx:nx,my:sy:ny);
echo on
z = b(1) + b(2).*u + b(3).*v + b(4).*u.*v + b(5).*u.^2 + b(6).*v.^2,
echo off
clg
surfc(u,v,z);
xlabel('m [kg/t]')
ylabel('d[mm]')
zlabel('A5 [%]')
grid
reset(gcf)
view(150,20)
Z
clear
clc
x1 = [1,1,1,1,1,1.5,1.5,1.5,1.5,1.5,2,2,2,2,2,3,3,3,3,3,4,4,4,4,4]
x2 = [2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6,2,3,4,5,6]
y = [63,62,60,61,59,65,62,63,62,61,67,65,66,63,64,69,66,68,65,67,71,68,70,69,66]
echo off
x12 = x1.^2;
x22 = x2.^2;
x13 = x1.^3;
x23 = x2.^3;
echo on
echo off
clc
a11 = length(x1);

```

```
a12 = sum(x1);
a13 = sum(x2);
a14 = sum(x1.*x2);
a15 = sum(x1.^2);
a16 = sum(x2.^2);
a21 = sum(x1);
a22 = sum(x1.^2);
a23 = sum(x1.*x2);
a24 = sum(x12.*x2);
a25 = sum(x1.^3);
a26 = sum(x1.*x22);
a31 = sum(x2);
a32 = sum(x1.*x2);
a33 = sum(x2.^2);
a34 = sum(x1.*x22);
a35 = sum(x12.*x2);
a36 = sum(x2.^3);
a41 = sum(x1.*x2);
a42 = sum(x12.*x2);
a43 = sum(x1.*x22);
a44 = sum(x12.*x22);
a45 = sum(x13.*x2);
a46 = sum(x1.*x23);
a51 = sum(x1.^2);
a52 = sum(x1.^3);
a53 = sum(x12.*x2);
a54 = sum(x13.*x2);
a55 = sum(x1.^4);
a56 = sum(x12.*x22);
a61 = sum(x2.^2);
a62 = sum(x1.*x22);
a63 = sum(x2.^3);
a64 = sum(x1.*x23);
a65 = sum(x12.*x22);
a66 = sum(x2.^4);
z =
[a11,a12,a13,a14,a15,a16;a21,a22,a23,a24,a25,a26;a31,a32,a33,a34,a35,a36;a41,a42,a43,a44,a45,a
46;a51,a52,a53,a54,a55,a56;a61,a62,a63,a64,a65,a66]
x = inv(z)
echo on
echo off
clc
c1 = sum(y);
c2 = sum(y.*x1);
c3 = sum(y.*x2);
c4 = sum(y.*x1.*x2);
c5 = sum(y.*x1.^2);
c6 = sum(y.*x2.^2);
c = [c1;c2;c3;c4;c5;c6]
echo on
echo off
clc
```

```
b = x * c
echo on
echo off
clc
ryx1 = cor(y,x1)
ryx2 = cor(y,x2)
rx1x2 = cor(x1,x2)
ryx1x2 = sqrt((ryx1^2+ryx2^2-2*ryx1*ryx2*rx1x2)/(1-rx1x2^2))
echo on
% Urmeaza trasarea suprafetei spatial si proectia ei in plan.
echo off
clc
mx =min(x1);
nx =max(x1);
sx =2;
my =min(x2);
ny =max(x2);
sy =0.1;
[u,v] = meshgrid(mx:sx:nx,my:sy:ny);
echo on
z = b(1) + b(2).*u + b(3).*v + b(4).*u.*v + b(5).*u.^2 + b(6).*v.^2;
echo off
clg
surfc(u,v,z);
xlabel('m [kg/t]')
ylabel('d[mm]')
zlabel('Z [%]')
grid
reset(gcf)
view(150,20)
```

Valorile medii ale parametrilor urmăriți, dispersia, abaterea standard, valorile pentru punctul staționar respectiv valoarea coeficientului de corelație

Rp0,2

»

x1 =

Columns 1 through 7

1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.5000 1.5000

Columns 8 through 14

1.5000 1.5000 1.5000 2.0000 2.0000 2.0000 2.0000

Columns 15 through 21

2.0000 3.0000 3.0000 3.0000 3.0000 3.0000 4.0000

Columns 22 through 25

4.0000 4.0000 4.0000 4.0000

x2 =

Columns 1 through 12

2 3 4 5 6 2 3 4 5 6 2 3

Columns 13 through 24

4 5 6 2 3 4 5 6 2 3 4 5

Column 25

6

y =

Columns 1 through 12

446 415 409 404 397 390 426 411 412 404 401 435

Columns 13 through 24

422 416 410 409 446 429 426 421 417 449 446 447

Column 25

440

echo off

z =

1.0e+004 *

0.0025 0.0058 0.0100 0.0230 0.0161 0.0450

0.0058 0.0161 0.0230 0.0645 0.0517 0.1035

0.0100 0.0230 0.0450 0.1035 0.0645 0.2200

0.0230 0.0645 0.1035 0.2902 0.2068 0.5060

0.0161 0.0517 0.0645 0.2068 0.1795 0.2902

0.0450 0.1035 0.2200 0.5060 0.2902 1.1370

x =

6.1032 -1.9912 -2.0448 0.1586 0.2537 0.2000

-1.9912 1.5641 0.1586 -0.0690 -0.2490 0.0000

-2.0448 0.1586 1.0255 -0.0397 0.0000 -0.1143

0.1586 -0.0690 -0.0397 0.0172 0.0000 0.0000

0.2537 -0.2490 0.0000 0.0000 0.0495 0.0000

0.2000 0.0000 -0.1143 0.0000 0.0000 0.0143

echo off

c =

1.0e+005 *

0.1053

0.2449

0.4206

0.9807

0.6937

1.8888

echo off

b =

403.4533

-19.9893

18.2044

3.5931

3.0205

-3.4286

echo off

ryx1 =

0.6091

ryx2 =

-0.0801

ryx1x2 =

0.6143

Rm

»

x1 =

Columns 1 through 7

1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.5000 1.5000

Columns 8 through 14

1.5000 1.5000 1.5000 2.0000 2.0000 2.0000 2.0000

Columns 15 through 21

2.0000 3.0000 3.0000 3.0000 3.0000 3.0000 4.0000

Columns 22 through 25

4.0000 4.0000 4.0000 4.0000

x2 =

Columns 1 through 12

2 3 4 5 6 2 3 4 5 6 2 3

Columns 13 through 24

4 5 6 2 3 4 5 6 2 3 4 5

Column 25

6

y =

Columns 1 through 12

654 700 646 643 690 672 668 665 700 659 690 650

Columns 13 through 24

682 700 677 705 700 698 699 692 720 715 650 710

Column 25

709

echo off

z =

1.0e+004 *

0.0025 0.0058 0.0100 0.0230 0.0161 0.0450

0.0058 0.0161 0.0230 0.0645 0.0517 0.1035

0.0100 0.0230 0.0450 0.1035 0.0645 0.2200

0.0230 0.0645 0.1035 0.2902 0.2068 0.5060

0.0161 0.0517 0.0645 0.2068 0.1795 0.2902

```

0.0450  0.1035  0.2200  0.5060  0.2902  1.1370
x =
 6.1032 -1.9912 -2.0448  0.1586  0.2537  0.2000
-1.9912  1.5641  0.1586 -0.0690 -0.2490  0.0000
-2.0448  0.1586  1.0255 -0.0397  0.0000 -0.1143
 0.1586 -0.0690 -0.0397  0.0172  0.0000  0.0000
 0.2537 -0.2490  0.0000  0.0000  0.0495  0.0000
 0.2000  0.0000 -0.1143  0.0000  0.0000  0.0143
echo off
c =
 17094
 39675
 68367
158583
112008
307789
echo off
b =
660.6762
 32.6294
-15.6755
 -1.6603
 -2.7045
  2.4143
echo off
ryx1 =
 0.5766
ryx2 =
 -0.0110
ryx1x2 =
 0.5767

A5
x1 =
Columns 1 through 7
 1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  1.0000  1.5000  1.5000
Columns 8 through 14
 1.5000  1.5000  1.5000  2.0000  2.0000  2.0000  2.0000
Columns 15 through 21
 2.0000  3.0000  3.0000  3.0000  3.0000  3.0000  4.0000
Columns 22 through 25
 4.0000  4.0000  4.0000  4.0000
x2 =
Columns 1 through 12
 2  3  4  5  6  2  3  4  5  6  2  3
Columns 13 through 24
 4  5  6  2  3  4  5  6  2  3  4  5
Column 25
 6
y =
Columns 1 through 12
 31 30 30 29 29 33 32 31 32 31 35 34

```

Columns 13 through 24

32 34 30 37 35 36 34 32 40 37 39 36

Column 25

34

echo off

z =

1.0e+004 *

0.0025	0.0058	0.0100	0.0230	0.0161	0.0450
0.0058	0.0161	0.0230	0.0645	0.0517	0.1035
0.0100	0.0230	0.0450	0.1035	0.0645	0.2200
0.0230	0.0645	0.1035	0.2902	0.2068	0.5060
0.0161	0.0517	0.0645	0.2068	0.1795	0.2902
0.0450	0.1035	0.2200	0.5060	0.2902	1.1370

x =

6.1032	-1.9912	-2.0448	0.1586	0.2537	0.2000
-1.9912	1.5641	0.1586	-0.0690	-0.2490	0.0000
-2.0448	0.1586	1.0255	-0.0397	0.0000	-0.1143
0.1586	-0.0690	-0.0397	0.0172	0.0000	0.0000
0.2537	-0.2490	0.0000	0.0000	0.0495	0.0000
0.2000	0.0000	-0.1143	0.0000	0.0000	0.0143

echo off

c =

1.0e+004 *

0.0833
0.1984
0.3289
0.7818
0.5709
1.4645

echo off

b =

26.5619
4.6139
0.3895
-0.2948
-0.2192
-0.0714

echo off

ryx1 =

0.8474

ryx2 =

-0.4105

ryx1x2 =

0.9416

Z

x1 =

Columns 1 through 7

1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.0000 1.5000 1.5000

Columns 8 through 14

1.5000 1.5000 1.5000 2.0000 2.0000 2.0000 2.0000

Columns 15 through 21

```

2.0000 3.0000 3.0000 3.0000 3.0000 3.0000 4.0000
Columns 22 through 25
4.0000 4.0000 4.0000 4.0000
x2 =
Columns 1 through 12
 2  3  4  5  6  2  3  4  5  6  2  3
Columns 13 through 24
 4  5  6  2  3  4  5  6  2  3  4  5
Column 25
 6
y =
Columns 1 through 12
 63 62 60 61 59 65 62 63 62 61 67 65
Columns 13 through 24
 66 63 64 69 66 68 65 67 71 68 70 69
Column 25
 66
echo off
z =
1.0e+004 *
 0.0025  0.0058  0.0100  0.0230  0.0161  0.0450
 0.0058  0.0161  0.0230  0.0645  0.0517  0.1035
 0.0100  0.0230  0.0450  0.1035  0.0645  0.2200
 0.0230  0.0645  0.1035  0.2902  0.2068  0.5060
 0.0161  0.0517  0.0645  0.2068  0.1795  0.2902
 0.0450  0.1035  0.2200  0.5060  0.2902  1.1370
x =
 6.1032 -1.9912 -2.0448  0.1586  0.2537  0.2000
-1.9912  1.5641  0.1586 -0.0690 -0.2490  0.0000
-2.0448  0.1586  1.0255 -0.0397  0.0000 -0.1143
 0.1586 -0.0690 -0.0397  0.0172  0.0000  0.0000
 0.2537 -0.2490  0.0000  0.0000  0.0495  0.0000
 0.2000  0.0000 -0.1143  0.0000  0.0000  0.0143
echo off
c =
1.0e+004 *
 0.1622
 0.3806
 0.6449
 1.5134
 1.0828
 2.8891
echo off
b =
 61.0061
  5.1384
 -1.6474
  0.0293
 -0.5309
  0.1000
echo off

```


Programul SIDHD4

```
clear
clc
x1 = [2,3,4,2,3,4,2,3,4,2,3,4,2,3,4]
x2 = [1550,1552,1554,1556,1558,1560,1562,1564,1566,1568,1570,1572,1574,1576,1578]
y = [69,65,61,57,54,51,49,46,44,42,40,39,37,36,34]
echo off
x12 = x1.^2;
x22 = x2.^2;
x13 = x1.^3;
x23 = x2.^3;
echo on
echo off
clc
a11 = length(x1);
a12 = sum(x1);
a13 = sum(x2);
a14 = sum(x1.*x2);
a15 = sum(x1.^2);
a16 = sum(x2.^2);
a21 = sum(x1);
a22 = sum(x1.^2);
a23 = sum(x1.*x2);
a24 = sum(x12.*x2);
a25 = sum(x1.^3);
a26 = sum(x1.*x22);
a31 = sum(x2);
a32 = sum(x1.*x2);
a33 = sum(x2.^2);
a34 = sum(x1.*x22);
a35 = sum(x12.*x2);
a36 = sum(x2.^3);
a41 = sum(x1.*x2);
a42 = sum(x12.*x2);
a43 = sum(x1.*x22);
a44 = sum(x12.*x22);
a45 = sum(x13.*x2);
a46 = sum(x1.*x23);
a51 = sum(x1.^2);
a52 = sum(x1.^3);
a53 = sum(x12.*x2);
a54 = sum(x13.*x2);
a55 = sum(x1.^4);
a56 = sum(x12.*x22);
a61 = sum(x2.^2);
a62 = sum(x1.*x22);
a63 = sum(x2.^3);
a64 = sum(x1.*x23);
a65 = sum(x12.*x22);
a66 = sum(x2.^4);
```

```

z =
[a11,a12,a13,a14,a15,a16;a21,a22,a23,a24,a25,a26;a31,a32,a33,a34,a35,a36;a41,a42,a43,a44,a45,a
46;a51,a52,a53,a54,a55,a56;a61,a62,a63,a64,a65,a66]
x = inv(z)
echo on
echo off
clc
c1 = sum(y);
c2 = sum(y.*x1);
c3 = sum(y.*x2);
c4 = sum(y.*x1.*x2);
c5 = sum(y.*x1.^2);
c6 = sum(y.*x2.^2);
c = [c1;c2;c3;c4;c5;c6]
echo on
echo off
clc
b = x * c
echo on
echo off
clc
ryx1 = cor(y,x1)
ryx2 = cor(y,x2)
rx1x2 = cor(x1,x2)
ryx1x2 = sqrt((ryx1^2+ryx2^2-2*ryx1*ryx2*rx1x2)/(1-rx1x2^2))
echo on
% Urmeaza trasarea suprafetei spatial si proectia ei in plan.
echo off
clc
mx =min(x1);
nx =max(x1);
sx =2;
my =min(x2);
ny =max(x2);
sy =0.1;
[u,v] = meshgrid(mx:sx:nx,my:sy:ny);
echo on
z = b(1) + b(2).*u + b(3).*v + b(4).*u.*v + b(5).*u.^2 + b(6).*v.^2;
echo off
clg
surfc(u,v,z);
xlabel('m [kg/t]')
ylabel('t [oC]')
zlabel('V [%]')
grid
reset(gcf)
view(150,20)
x1 =
Columns 1 through 12
    2    3    4    2    3    4    2    3    4    2    3    4
Columns 13 through 15
    2    3    4

```

x2 =

Columns 1 through 6

1550 1552 1554 1556 1558 1560

Columns 7 through 12

1562 1564 1566 1568 1570 1572

Columns 13 through 15

1574 1576 1578

y =

Columns 1 through 12

69 65 61 57 54 51 49 46 44 42 40 39

Columns 13 through 15

37 36 34

echo off

z =

1.0e+013 *

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0057

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0172

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000 0.0057 0.0172 0.0000 8.9767

x =

1.0e+008 *

1.0827 0.0027 -0.0014 0.0000 0.0000 0.0000

0.0027 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

-0.0014 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000

echo off

c =

1.0e+009 *

0.0000

0.0000

0.0011

0.0034

0.0000

1.7668

echo off

b =

1.0e+004 *

7.1471

0.0008

-0.0090

0.0000

0.0000

0.0000

echo off

rx1x2 = 0.1890

ry1x2 = 0.9836

% Urmeaza trasarea suprafetei spatial si proectia ei in plan.

echo off

Programul SIDHD5

```

clc,
clear,
format compact,
format long e ,
h=figure,
for i=1:h,close (i),end,
load DATE.mat
disp('verificati x,y,u'),
[rot90(x,-1),rot90(y,-1),rot90(u,-1)],
disp('coef.corelatie'),r,
disp('abateri'),s,
disp('min u          max u'),[min(u),max(u)],
p1=(max(x)-min(x))/20;p2=(max(y)-min(y))/20;[q,w]= meshdom
(min(x):p1:max(x),min(y):p2:max(y));
for k=1:12,co=c(:,k); h= figure;
z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).(w.^2)+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);contou
r(z); C=contour(min(x):p1:max(x),min(y):p2:max(y),z,10);
clabel(C), grid on,end
disp('alegeti corelatia'),
disp('puneti "%"in fata liniei return din program')
disp('introd. k=1 pana la 12 in program')
return
k=2;
co=c(:,k);
co
xi=min(x);xf=max(x);yi=min(y);yf=max(y);
h=figure;
comet(x)
title('VARIABILA X')
h=figure;
comet(y)
title('VARIABILA Y')
h=figure;
comet(u)
title('VARIABILA U')
h=figure;
plot3(x,y,u)
title('DISTRIBUTIA TRIPLETELOR (X,Y,U) IN SPATIU')
h= figure;
p1=.7*((xf-xi)/20+1000); p2=.7*((yf-yi)/20+1000);
[q,w]= meshdom (xi-10000:p1:xf+10000,yi-10000:p2:yf+10000);

z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).(w.^2)+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
h=figure;
mesh(q,w,z)

```

```

grid on
h=figure;
contour(z)
C=contour(xi-10000:p1:xf+10000,yi-10000:p2:yf+10000,z,10);
clabel(C)
grid on
h= figure;
p1=.7*((xf-xi)/20+100); p2=.7*((yf-yi)/20+100);
[q,w]= meshdom (xi-1000:p1:xf+1000,yi-1000:p2:yf+1000);

z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).*(w.^2)+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on
h=figure;
contour(z)
C=contour(xi-1000:p1:xf+1000,yi-1000:p2:yf+1000,z,10);
clabel(C)
grid on

h= figure;
p1=.7*((xf-xi)/20+10); p2=.7*((yf-yi)/20+10);
[q,w]= meshdom (xi-100:p1:xf+100,yi-100:p2:yf+100);

z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).*(w.^2)+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on
h=figure;
C=contour(xi-100:p1:xf+100,yi-100:p2:yf+100,z,10);
clabel(C)
grid on
h= figure;
p1=.7*((xf-xi)/20+1); p2=.7*((yf-yi)/20+1);
[q,w]= meshdom (xi-10:p1:xf+10,yi-10:p2:yf+10);
z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).*(w.^2)+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on
h=figure;
contour(z)
C=contour(xi-10:p1:xf+10,yi-10:p2:yf+10,z,10);
clabel(C)
grid on

```

```

h= figure;
p1=.7*((xf-xi)/20); p2=.7*((yf-yi)/20);
[q,w]= meshdom (xi:p1:xf,yi:p2:yf);

z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).*w.^2+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
title('DOMENIUL TEHNOLOGIC')
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on
title('DOMENIUL TEHNOLOGIC')
h=figure;
surfnorm(q,w,z)
title('NORMALA INTERIOARA')
h=figure;
surfnorm(q',w',z')
title ('NORMALA EXTERIOARA')
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on
h=figure;
C1=contour(z);
C=contour(xi:p1:xf,yi:p2:yf,z,10);
clabel(C)
grid on
title('DOMENIU TEHNOLOGIC')
h=figure;
contour3(q,w,z,35)
h=figure;
contour3(q,w,z,35)
grid on
h=figure;
meshc(q,w,z);
h=figure;
meshc(q,w,z)
grid on
h=figure ;
h meshz(q,w,z);
h=figure;
subplot(221);mesh(q,w,z);
subplot(222);meshc(q,w,z);
h subplot(223);meshz(q,w,z);

```

```

grid on
h=figure;
[px,py]=gradient(z,.2,.2);
quiver(q,w,px,py,1.5,'r');
h=figure;
dx=(xf-xi)/2;dy=(yf-yi)/2;
xf=min(x)+dx;yf=min(y)+dy;
p1=.7*((xf-xi)/20); p2=.7*((yf-yi)/20);
[q,w]= meshdom (xi:p1:xf,yi:p2:yf);

z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).*w.^2+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on
h=figure;
C2=contour(z);
C=contour(xi:p1:xf,yi:p2:yf,z,10);
clabel(C)
grid on
h=figure;
xi=min(x)+dx;yi=min(y)+dy;xf=max(x);yf=max(y);
p1=.7*((xf-xi)/20); p2=.7*((yf-yi)/20);
[q,w]= meshdom (xi:p1:xf,yi:p2:yf);

z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).*w.^2+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on
h=figure;
C3=contour(z);
C=contour(xi:p1:xf,yi:p2:yf,z,10);
clabel(C)
grid on

h=figure;
dx=(xf-xi)/2;dy=(yf-yi)/2;
xi=min(x)+dx;yi=min(y);xf=max(x);yf=max(y)-dy;
p1=.7*((xf-xi)/20); p2=.7*((yf-yi)/20);
[q,w]= meshdom (xi:p1:xf,yi:p2:yf);

z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).*w.^2+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on

```

```

h=figure;
C4=contour(z);
C=contour(xi:p1:xf,yi:p2:yf,z,10);
clabel(C)
grid on
h=figure;
dx=(xf-xi)/2;dy=(yf-yi)/2;
xi=min(x);yi=min(y)+dy;xf=max(x)-dx;yf=max(y);
p1=.7*((xf-xi)/20); p2=.7*((yf-yi)/20);
[q,w]= meshdom (xi:p1:xf,yi:p2:yf);

z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).(w.^2)+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on
h=figure;
C5=contour(z);
C=contour(xi:p1:xf,yi:p2:yf,z,10);
clabel(C)
grid on
h=figure;
xi=min(x)+dx/2;yi=min(y)+dy/2;xf=max(x)-dx/2;yf=max(y)-dy/2;
p1=.7*((xf-xi)/20); p2=.7*((yf-yi)/20);
[q,w]= meshdom (xi:p1:xf,yi:p2:yf);

z=co(1)*q.^4+co(2)*(q.^3).*w+co(3)*(q.^2).(w.^2)+co(4)*q.*(w.^3)+
co(5)*w.^4+co(6)*q.^3+co(7)*(q.^2).*w+co(8)*q.*(w.^2)+co(9)*w.^3+c
o(10)*q.^2+co(11)*q.*w+co(12)*w.^2+co(13)*q+co(14)*w+co(15);
mesh(q,w,z)
h=figure;
mesh(q,w,z)
grid on
h=figure;
C6=contour(z);
C=contour(xi:p1:xf,yi:p2:yf,z,10);
clabel(C)
grid on
disp('daca doriti valori numerice tastati C1 . . .C6(LITERE MARI)')
disp('PENTRU ALTA RULARE STERGETI "%" in fata return')

```


Tabelele cu compararea datelor experimentale cu cele teoretice, matricea punctelor staționare, coordonatele punctului staționar al suprafețelor, respectiv matricea liniilor de contur (c_1, c_2, c_3) pentru suprafețe de regresie $R_{p0,2}$

LIMITE DE VARIATIE ALE VARIABILELOR

m[kg/t]	0	4
d[mm]	2	6
t[°C]	1545	1585
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	348	474

VALORILE MEDII SI ABATERILE VARIABILELOR

m[kg/t]	
1.9167	1.3044
d[mm]	
4	1.4142
t[°C]	
1565	14.142
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	
411.33	30.264

ECUATIA HIPERSUPRAFETEI DE REGRESIE

$$R_{p0,2}[\text{N/mm}^2] = -3.997 * m[\text{kg/t}]^2 + 0.9814 * d[\text{mm}]^2 + 0.0001533 * t[^\circ\text{C}]^2 + 0.4112 * m[\text{kg/t}] * d[\text{mm}] - 0.005089 * d[\text{mm}] * t[^\circ\text{C}] + 0.02484 * t[^\circ\text{C}] * m[\text{kg/t}] - 0.002547 * m[\text{kg/t}] + 0.006111 * d[\text{mm}] - 0.00003174 * t[^\circ\text{C}] + 0.00003806$$

COEFICIENTUL DE CORELATIE

$$r_f = 0.9726$$

ABATEREA DE LA SUPRAFATA DE REGRESIE

$$s_f = 7.0321$$

COMPARAREA DATELOR EXPERIMENTALE CU CELE TEORETICE

1	1	2	1585	415	407.52	7.4825
2	1	3	1575	409	399.01	9.9874
3	1	4	1565	404	392.6	11.397
4	1	5	1555	397	388.29	8.7115
5	1	6	1545	390	386.07	3.9307
6	1.5	2	1585	426	421.79	4.2077
7	1.5	3	1575	411	412.96	-1.9576
8	1.5	4	1565	412	406.22	5.7818
9	1.5	5	1555	404	401.57	2.426
10	1.5	6	1545	401	399.02	1.975
11	2	2	1585	435	434.07	0.93111
12	2	3	1575	422	424.9	-2.9044
13	2	4	1565	416	417.84	-1.8352
14	2	5	1555	410	412.86	-2.8611
15	2	6	1545	409	409.98	-0.98236
16	3	2	1585	446	452.63	-6.6272
17	3	3	1575	429	442.8	-13.803
18	3	4	1565	426	435.07	-9.0743
19	3	5	1555	421	429.44	-8.4407
20	3	6	1545	417	425.9	-8.9023
21	4	2	1585	474	463.19	10.808
22	4	3	1575	449	452.71	-3.7088

23	4	4	1565	446	444.32	1.6797
24	4	5	1555	447	438.03	8.9729
25	4	6	1545	440	433.83	6.1708
26	0	2	1585	360	372.97	-12.973
27	0	3	1575	370	365.13	4.8723
28	0	4	1565	351	359.38	-8.3777
29	0	5	1555	355	355.72	-0.72283
30	0	6	1545	348	354.16	-6.1632

MATRICEA PUNCTELOR STATIONARE

coeficientii necunoscutelor

matm =

-7.9931 -0.4112 0.0248
-0.4112 1.9628 -0.0051
0.0248 -0.0051 0.0003

termenii liberi

t_{lm} =

0.0025
-0.0061
0.0000

COORDONATELE PUNCTULUI STATIONAR AL SUPREFETEI

m[kg/t] 2.141e-006

d[mm] -0.002973

t[°C] 0.054

R_{p0,2}[N/mm²] 0.00002811
$$R_{p0,2}[\text{N/mm}^2] \text{ m}[\text{kg/t}]_{\text{med}} = 0.9814 * d[\text{mm}]^2 + 0.0001533 * t[^\circ\text{C}]^2 + -0.005089 * d[\text{mm}] * t[^\circ\text{C}] +$$

$$0.7821 * d[\text{mm}] + 0.04757 * t[^\circ\text{C}] + -14.69$$

h = 3

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:R_{p0,2}[N/mm²] = R_{p0,2}[N/mm²] m[kg/t]_{med}, d[mm], t[°C])

C1 =

1.0e+003 *

Columns 1 through 7

0.4100 0.0023 0.0024 0.0026 0.0026 0.0028 0.0029
0.0270 1.5450 1.5455 1.5470 1.5470 1.5483 1.5490

Columns 8 through 14

0.0030 0.0032 0.0033 0.0034 0.0036 0.0038 0.0040
1.5495 1.5505 1.5510 1.5514 1.5521 1.5526 1.5530

Columns 15 through 21

0.0040 0.0042 0.0044 0.0046 0.0048 0.0049 0.0050
1.5531 1.5533 1.5534 1.5533 1.5531 1.5530 1.5528

Columns 22 through 28

0.0052 0.0054 0.0055 0.0056 0.0058 0.0059 0.0060
1.5522 1.5515 1.5510 1.5507 1.5497 1.5490 1.5485

Columns 29 through 35

0.4150 0.0020 0.0021 0.0022 0.0024 0.0024 0.0026
0.0300 1.5519 1.5530 1.5537 1.5550 1.5553 1.5568

Columns 36 through 42

0.0026 0.0028 0.0029 0.0030 0.0032 0.0034 0.0034
1.5570 1.5581 1.5590 1.5593 1.5603 1.5610 1.5612

Columns 43 through 49

0.0036 0.0038 0.0040 0.0040 0.0042 0.0044 0.0046
1.5619 1.5625 1.5630 1.5630 1.5632 1.5633 1.5633

Columns 50 through 56

0.0048	0.0049	0.0050	0.0052	0.0054	0.0055	0.0056
1.5631	1.5630	1.5628	1.5622	1.5616	1.5610	1.5607

Columns 57 through 63

0.0058	0.0059	0.0060	0.4200	0.0020	0.0022	0.0022
1.5598	1.5590	1.5586	0.0300	1.5616	1.5630	1.5634

Columns 64 through 70

0.0024	0.0024	0.0026	0.0027	0.0028	0.0030	0.0030
1.5650	1.5650	1.5665	1.5670	1.5679	1.5690	1.5691

Columns 71 through 77

0.0032	0.0034	0.0034	0.0036	0.0038	0.0040	0.0041
1.5701	1.5710	1.5710	1.5718	1.5724	1.5728	1.5730

Columns 78 through 84

0.0042	0.0044	0.0046	0.0048	0.0048	0.0050	0.0052
1.5731	1.5732	1.5732	1.5730	1.5730	1.5727	1.5722

Columns 85 through 91

0.0054	0.0055	0.0056	0.0058	0.0059	0.0060	0.4250
1.5716	1.5710	1.5708	1.5698	1.5690	1.5687	0.0300

Columns 92 through 98

0.0020	0.0022	0.0022	0.0024	0.0024	0.0026	0.0027
1.5713	1.5730	1.5731	1.5747	1.5750	1.5762	1.5770

Columns 99 through 105

0.0028	0.0030	0.0030	0.0032	0.0034	0.0035	0.0036
1.5776	1.5788	1.5790	1.5798	1.5807	1.5810	1.5815

Columns 106 through 112

0.0038	0.0040	0.0042	0.0043	0.0044	0.0046	0.0047
1.5821	1.5826	1.5829	1.5830	1.5830	1.5830	1.5830

Columns 113 through 119

0.0048	0.0050	0.0052	0.0054	0.0055	0.0056	0.0058
1.5829	1.5826	1.5821	1.5815	1.5810	1.5807	1.5798

Columns 120 through 126

0.0059	0.0060	0.4300	0.0025	0.0024	0.0022	0.0022
1.5790	1.5787	0.0060	1.5850	1.5843	1.5830	1.5827

Columns 127 through 128

0.0020	0.0020
--------	--------

1.5810	1.5809
--------	--------

$$R_{p0,2}[\text{N/mm}^2] d[\text{mm}]_{\text{med}} = 0.0001533 * t[^\circ\text{C}]^2 + -3.997 * m[\text{kg/t}]^2 + 0.02484 * t[^\circ\text{C}] * m[\text{kg/t}] + -0.02039 * t[^\circ\text{C}] + -1.647 * m[\text{kg/t}] + 15.73$$

h =

6

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:

$$R_{p0,2}[\text{N/mm}^2] = R_{p0,2}[\text{N/mm}^2](m[\text{kg/t}], d[\text{mm}]_{\text{med}}, t[^\circ\text{C}])$$

C2 =

1.0e+003 *

Columns 1 through 7

0.3600	1.5664	1.5650	1.5630	1.5610	1.5590	1.5570
0.0130	0	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001

Columns 8 through 14

1.5550	1.5530	1.5510	1.5506	1.5490	1.5470	1.5450
0.0001	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003

Columns 15 through 21

0.3800	1.5450	1.5470	1.5490	1.5510	1.5512	1.5530
0.0240	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008

Columns 22 through 28

1.5550	1.5570	1.5590	1.5610	1.5630	1.5644	1.5650
0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006

Columns 29 through 35

1.5670	1.5690	1.5710	1.5730	1.5750	1.5770	1.5785
0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004

Columns 36 through 42

1.5790	1.5810	1.5830	1.5850	0.4000	1.5450	1.5470
0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0250	0.0017	0.0016

Columns 43 through 49

1.5475	1.5490	1.5510	1.5530	1.5550	1.5570	1.5576
0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014

Columns 50 through 56

1.5590	1.5610	1.5630	1.5650	1.5670	1.5685	1.5690
0.0014	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0012

Columns 57 through 63

1.5710	1.5730	1.5750	1.5770	1.5790	1.5802	1.5810
0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010	0.0010

Columns 64 through 70

1.5830	1.5850	0.4200	1.5450	1.5470	1.5475	1.5490
0.0010	0.0009	0.0260	0.0027	0.0026	0.0026	0.0026

Columns 71 through 77

1.5510	1.5530	1.5540	1.5550	1.5570	1.5590	1.5610
0.0025	0.0024	0.0024	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022

Columns 78 through 84

1.5613	1.5630	1.5650	1.5670	1.5690	1.5692	1.5710
0.0022	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0020	0.0020

Columns 85 through 91

1.5730	1.5750	1.5770	1.5780	1.5790	1.5810	1.5830
0.0019	0.0019	0.0018	0.0018	0.0018	0.0017	0.0017

Columns 92 through 98

1.5850	0.4400	1.5573	1.5590	1.5594	1.5610	1.5621
0.0017	0.0210	0.0040	0.0038	0.0038	0.0037	0.0036

Columns 99 through 105

1.5630	1.5650	1.5655	1.5670	1.5690	1.5695	1.5710
0.0035	0.0034	0.0034	0.0033	0.0032	0.0032	0.0031

Columns 106 through 112

1.5730	1.5742	1.5750	1.5770	1.5790	1.5796	1.5810
0.0031	0.0030	0.0030	0.0029	0.0028	0.0028	0.0028

Columns 113 through 114

1.5830	1.5850
0.0027	0.0026

$$R_{p0,2}[\text{N/mm}^2] t[^\circ\text{C}]_{\text{med}} = -3.997 \cdot m[\text{kg/t}]^2 + 0.9814 \cdot d[\text{mm}]^2 + 0.4112 \cdot m[\text{kg/t}] \cdot d[\text{mm}] + 38.87 \cdot m[\text{kg/t}] - 7.958 \cdot d[\text{mm}] + 375.5$$

h =

9

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:

$$R_{p0,2}[\text{N/mm}^2] = R_{p0,2}[\text{N/mm}^2] m[\text{kg/t}], d[\text{mm}], t[^\circ\text{C}]_{\text{med}}$$

C3 =

Columns 1 through 7

360.0000	0	0.0022	0.0092	0.0140	0.0166	0.0171
10.0000	4.8480	4.8000	4.6000	4.4000	4.2000	4.0000

Columns 8 through 14

0.0154	0.0115	0.0056	0	380.0000	0.4923	0.5133
3.8000	3.6000	3.4000	3.2616	21.0000	6.0000	5.8000
Columns 15 through 21						
0.5319	0.5479	0.5615	0.5726	0.5812	0.5875	0.5913
5.6000	5.4000	5.2000	5.0000	4.8000	4.6000	4.4000
Columns 22 through 28						
0.5927	0.5918	0.5885	0.5829	0.5750	0.5647	0.5522
4.2000	4.0000	3.8000	3.6000	3.4000	3.2000	3.0000
Columns 29 through 35						
0.5374	0.5204	0.5011	0.4796	0.4559	400.0000	1.1633
2.8000	2.6000	2.4000	2.2000	2.0000	23.0000	6.0000
Columns 36 through 42						
1.1860	1.2000	1.2061	1.2239	1.2387	1.2503	1.2590
5.8000	5.6582	5.6000	5.4000	5.2000	5.0000	4.8000
Columns 43 through 49						
1.2646	1.2673	1.2670	1.2638	1.2577	1.2487	1.2368
4.6000	4.4000	4.2000	4.0000	3.8000	3.6000	3.4000
Columns 50 through 56						
1.2222	1.2048	1.2000	1.1854	1.1637	1.1394	1.1126
3.2000	3.0000	2.9531	2.8000	2.6000	2.4000	2.2000
Columns 57 through 63						
1.0833	420.0000	1.8417	1.8820	1.9192	1.9531	1.9839
2.0000	22.0000	2.0000	2.2000	2.4000	2.6000	2.8000
Columns 64 through 70						
2.0000	2.0122	2.0382	2.0606	2.0794	2.0945	2.1059
2.9177	3.0000	3.2000	3.4000	3.6000	3.8000	4.0000
Columns 71 through 77						
2.1136	2.1174	2.1173	2.1134	2.1055	2.0936	2.0777
4.2000	4.4000	4.6000	4.8000	5.0000	5.2000	5.4000
Columns 78 through 84						
2.0576	2.0334	2.0050	440.0000	2.8869	2.9549	3.0000
5.6000	5.8000	6.0000	25.0000	2.0000	2.2000	2.3426
Columns 85 through 91						
3.0205	3.0864	3.1472	3.2000	3.2029	3.2600	3.3109
2.4000	2.6000	2.8000	2.9908	3.0000	3.2000	3.4000
Columns 92 through 98						
3.3554	3.3934	3.4000	3.4290	3.4578	3.4785	3.4909
3.6000	3.8000	3.8424	4.0000	4.2000	4.4000	4.6000
Columns 99 through 105						
3.4947	3.4896	3.4755	3.4521	3.4191	3.4000	3.3800
4.8000	5.0000	5.2000	5.4000	5.6000	5.6894	5.8000
Column 106						
3.3354						
6.0000						

Tabelele cu compararea datelor experimentale cu cele teoretice, matricea punctelor staționare, coordonatele punctului staționar al suprafețelor, respectiv matricea liniilor de contur (c_1, c_2, c_3) pentru suprafețe de regresie R_m

LIMITE DE VARIATIE ALE VARIABILELOR

m[kg/t]	0	4
d[mm]	2	6
t[°C]	1545	1585

R_m [N/mm²] 607 720

VALORILE MEDII SI ABATERILE VARIABILELOR

m [kg/t]

1.9167 1.3044

d [mm]

4 1.4142

t [°C]

1565 14.142

R_m [N/mm²]

670.27 33.01

ECUATIA HIPERSUPRAFETEI DE REGRESIE

R_m [N/mm²]= $-3.745*m$ [kg/t]²+ $0.03494*d$ [mm]²+ $0.0002385*t$ [°C]²+
 $0.7767*m$ [kg/t]* d [mm]+ $0.004689*d$ [mm]* t [°C]+ $0.02739*t$ [°C]* m [kg/t]+
 $0.004822*m$ [kg/t]+ $0.0002206*d$ [mm]+ $0.00002924*t$ [°C]
 $+1.393e-006$

COEFICIENTUL DE CORELATIE

r_f =

0.9920

ABATEREA DE LA SUPRAFATA DE REGRESIE

s_f =

4.1744

COMPARAREA DATELOR EXPERIMENTALE CU CELE TEORETICE

1	1	2	1585	654	652.41	1.5888
2	1	3	1575	650	651.29	-1.2885
3	1	4	1565	646	650.19	-4.1897
4	1	5	1555	643	649.11	-6.1147
5	1	6	1545	640	648.06	-8.0634
6	1.5	2	1585	672	668.66	3.3439
7	1.5	3	1575	668	667.01	0.99187
8	1.5	4	1565	665	665.38	-0.38398
9	1.5	5	1555	662	663.78	-1.7836
10	1.5	6	1545	659	662.21	-3.2071
11	2	2	1585	690	683.03	6.9717
12	2	3	1575	685	680.85	4.145
13	2	4	1565	682	678.71	3.2945
14	2	5	1555	680	676.58	3.4201
15	2	6	1545	677	674.48	2.5219
16	3	2	1585	705	706.15	-1.1544
17	3	3	1575	700	702.93	-2.9305
18	3	4	1565	698	699.73	-1.7305
19	3	5	1555	696	696.55	-0.55422
20	3	6	1545	692	693.4	-1.4018
21	4	2	1585	720	721.79	-1.7897
22	4	3	1575	715	717.52	-2.5152
23	4	4	1565	713	713.26	-0.2645
24	4	5	1555	710	709.04	0.96237
25	4	6	1545	709	704.83	4.1654
26	0	2	1585	607	614.3	-7.3032
27	0	3	1575	610	614.23	-4.2312
28	0	4	1565	625	614.18	10.817
29	0	5	1555	614	614.16	-0.15852
30	0	6	1545	621	614.16	6.8421

MATRICEA PUNCTELOR STATIONARE

coeficientii necunoscutelor

matm =

-7.4909	-0.7767	0.0274
-0.7767	0.0699	0.0047
0.0274	0.0047	0.0005

termenii liberi

t1m =

0.0048
-0.0002
0.0000

COORDONATELE PUNCTULUI STATIONAR AL SUPREFETEI

m[kg] -0.0001714

d[mm] -0.00473

t[°C] -0.004957

 $R_m[N/mm^2]$ 1.212e-006
$$R_m[N/mm^2]m[kg/t]med=0.03494*d[mm]^2+0.0002385*t[°C]^2+0.004689*d[mm]*t[°C]+1.488*d[mm]+0.05252*t[°C]-13.77$$

h =

3

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:

 $R_m[N/mm^2]=R_m[N/mm^2](m[kg/t]med,d[mm],t[°C])$

C1 =

1.0e+003 *

Columns 1 through 7

0.6500	0.0023	0.0022	0.0020	0.6600	0.0039	0.0038
0.0030	1.5450	1.5455	1.5470	0.0180	1.5450	1.5461

Columns 8 through 14

0.0037	0.0036	0.0034	0.0034	0.0032	0.0031	0.0030
1.5470	1.5475	1.5490	1.5490	1.5505	1.5510	1.5520

Columns 15 through 21

0.0029	0.0028	0.0026	0.0026	0.0024	0.0023	0.0022
1.5530	1.5535	1.5550	1.5550	1.5565	1.5570	1.5579

Columns 22 through 28

0.0021	0.0020	0.6700	0.0056	0.0054	0.0053	0.0052
1.5590	1.5594	0.0320	1.5450	1.5464	1.5470	1.5479

Columns 29 through 35

0.0051	0.0050	0.0048	0.0048	0.0046	0.0045	0.0044
1.5490	1.5494	1.5509	1.5510	1.5524	1.5530	1.5539

Columns 36 through 42

0.0043	0.0042	0.0040	0.0040	0.0038	0.0037	0.0036
1.5550	1.5554	1.5569	1.5570	1.5584	1.5590	1.5599

Columns 43 through 49

0.0035	0.0034	0.0032	0.0032	0.0030	0.0029	0.0028
1.5610	1.5614	1.5629	1.5630	1.5644	1.5650	1.5658

Columns 50 through 56

0.0026	0.0026	0.0024	0.0024	0.0022	0.0021	0.0020
1.5670	1.5673	1.5688	1.5690	1.5703	1.5710	1.5718

Columns 57 through 63

0.6800	0.0020	0.0021	0.0022	0.0024	0.0024	0.0026
0.0360	1.5841	1.5830	1.5826	1.5811	1.5810	1.5796

Columns 64 through 70

0.0027	0.0028	0.0029	0.0030	0.0032	0.0032	0.0034
1.5790	1.5781	1.5770	1.5766	1.5751	1.5750	1.5736

Columns 71 through 77

0.0035	0.0036	0.0038	0.0038	0.0040	0.0040	0.0042
1.5730	1.5721	1.5710	1.5706	1.5691	1.5690	1.5676

Columns 78 through 84

0.0043	0.0044	0.0046	0.0046	0.0048	0.0048	0.0050
1.5670	1.5661	1.5650	1.5646	1.5631	1.5630	1.5616

Columns 85 through 91

0.0051	0.0052	0.0053	0.0054	0.0056	0.0056	0.0058
1.5610	1.5601	1.5590	1.5586	1.5571	1.5570	1.5556

Columns 92 through 98

0.0059	0.0060	0.6900	0.0035	0.0036	0.0038	0.0038
1.5550	1.5541	0.0230	1.5850	1.5843	1.5830	1.5828

Columns 99 through 105

0.0040	0.0040	0.0042	0.0043	0.0044	0.0046	0.0046
1.5813	1.5810	1.5798	1.5790	1.5783	1.5770	1.5768

Columns 106 through 112

0.0048	0.0048	0.0050	0.0051	0.0052	0.0054	0.0054
1.5753	1.5750	1.5738	1.5730	1.5722	1.5710	1.5707

Columns 113 through 119

0.0056	0.0056	0.0058	0.0059	0.0060	0.7000	0.0051
1.5692	1.5690	1.5677	1.5670	1.5662	0.0090	1.5850

Columns 120 through 126

0.0052	0.0054	0.0054	0.0056	0.0056	0.0058	0.0059
1.5843	1.5830	1.5828	1.5813	1.5810	1.5797	1.5790

Columns 85 through 91

0.0051	0.0052	0.0053	0.0054	0.0056	0.0056	0.0058
1.5610	1.5601	1.5590	1.5586	1.5571	1.5570	1.5556

Columns 92 through 98

0.0059	0.0060	0.6900	0.0035	0.0036	0.0038	0.0038
1.5550	1.5541	0.0230	1.5850	1.5843	1.5830	1.5828

Columns 99 through 105

0.0040	0.0040	0.0042	0.0043	0.0044	0.0046	0.0046
1.5813	1.5810	1.5798	1.5790	1.5783	1.5770	1.5768

Columns 106 through 112

0.0048	0.0048	0.0050	0.0051	0.0052	0.0054	0.0054
1.5753	1.5750	1.5738	1.5730	1.5722	1.5710	1.5707

Columns 113 through 119

0.0056	0.0056	0.0058	0.0059	0.0060	0.7000	0.0051
1.5692	1.5690	1.5677	1.5670	1.5662	0.0090	1.5850

Columns 120 through 126

0.0052	0.0054	0.0054	0.0056	0.0056	0.0058	0.0059
1.5843	1.5830	1.5828	1.5813	1.5810	1.5797	1.5790

Column 127

0.0060

1.5782

$$R_m[\text{N/mm}^2]d[\text{mm}]_{\text{med}}=0.0002385*t[^\circ\text{C}]^2+-$$

$$3.745*m[\text{kg/t}]^2+0.02739*t[^\circ\text{C}]*m[\text{kg/t}]+0.01878*t[^\circ\text{C}]+-3.112*m[\text{kg/t}]+0.5599$$

h =

6

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:

$$R_m[\text{N/mm}^2]=R_m[\text{N/mm}^2]m[\text{kg/t}],d[\text{mm}]_{\text{med}},t[^\circ\text{C}]$$

C2 =

1.0e+003 *

Columns 1 through 7

0.6000	1.5464	1.5450	0.6200	1.5726	1.5710	1.5690
0.0020	0	0.0000	0.0170	0	0.0000	0.0001

Columns 8 through 14

1.5670	1.5650	1.5630	1.5624	1.5610	1.5590	1.5570
0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003

Columns 15 through 21

1.5550	1.5530	1.5527	1.5510	1.5490	1.5470	1.5450
0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0006

Columns 22 through 28

0.6400	1.5450	1.5470	1.5490	1.5510	1.5521	1.5530
0.0250	0.0012	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010	0.0010

Columns 29 through 35

1.5550	1.5570	1.5590	1.5604	1.5610	1.5630	1.5650
0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007

Columns 36 through 42

1.5670	1.5690	1.5692	1.5710	1.5730	1.5750	1.5770
0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0004

Columns 43 through 49

1.5785	1.5790	1.5810	1.5830	1.5850	0.6600	1.5450
0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0260	0.0019

Columns 50 through 56

1.5470	1.5482	1.5490	1.5510	1.5530	1.5548	1.5550
0.0018	0.0018	0.0018	0.0017	0.0017	0.0016	0.0016

Columns 57 through 63

1.5570	1.5590	1.5610	1.5619	1.5630	1.5650	1.5670
0.0015	0.0015	0.0014	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013

Columns 64 through 70

1.5690	1.5694	1.5710	1.5730	1.5750	1.5770	1.5773
0.0012	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010

Columns 71 through 77

1.5790	1.5810	1.5830	1.5850	0.6800	1.5450	1.5457
0.0010	0.0009	0.0009	0.0008	0.0280	0.0028	0.0028

Columns 78 through 84

1.5470	1.5490	1.5503	1.5510	1.5530	1.5550	1.5553
0.0027	0.0027	0.0026	0.0026	0.0025	0.0024	0.0024

Columns 85 through 91

1.5570	1.5590	1.5607	1.5610	1.5630	1.5650	1.5666
0.0023	0.0023	0.0022	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020

Columns 92 through 98

1.5670	1.5690	1.5710	1.5728	1.5730	1.5750	1.5770
0.0020	0.0019	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0017

Columns 99 through 105

1.5790	1.5795	1.5810	1.5830	1.5850	0.7000	1.5498
0.0016	0.0016	0.0016	0.0015	0.0014	0.0280	0.0040

Columns 106 through 112

1.5510	1.5521	1.5530	1.5548	1.5550	1.5570	1.5579
0.0039	0.0038	0.0037	0.0036	0.0036	0.0035	0.0034

Columns 113 through 119

1.5590	1.5610	1.5614	1.5630	1.5650	1.5653	1.5670
0.0033	0.0032	0.0032	0.0031	0.0030	0.0030	0.0029

Columns 120 through 126

1.5690	1.5696	1.5710	1.5730	1.5743	1.5750	1.5770
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

0.0028	0.0028	0.0027	0.0027	0.0026	0.0026	0.0025
Columns 127 through 133						
1.5790	1.5794	1.5810	1.5830	1.5849	1.5850	0.7200
0.0024	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0022	0.0120
Columns 134 through 140						
1.5727	1.5730	1.5750	1.5751	1.5770	1.5780	1.5790
0.0040	0.0040	0.0038	0.0038	0.0037	0.0036	0.0035
Columns 141 through 145						
1.5810	1.5812	1.5830	1.5848	1.5850	0.0034	0.0034
0.0027	0.0027	0.0026	0.0026	0.0025	0.0024	0.0024
Columns 85 through 91						
1.5570	1.5590	1.5607	1.5610	1.5630	1.5650	1.5666
0.0023	0.0023	0.0022	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020
Columns 92 through 98						
1.5670	1.5690	1.5710	1.5728	1.5730	1.5750	1.5770
0.0020	0.0019	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0017
Columns 99 through 105						
1.5790	1.5795	1.5810	1.5830	1.5850	0.7000	1.5498
0.0016	0.0016	0.0016	0.0015	0.0014	0.0280	0.0040
Columns 106 through 112						
1.5510	1.5521	1.5530	1.5548	1.5550	1.5570	1.5579
0.0039	0.0038	0.0037	0.0036	0.0036	0.0035	0.0034
Columns 113 through 119						
1.5590	1.5610	1.5614	1.5630	1.5650	1.5653	1.5670
0.0033	0.0032	0.0032	0.0031	0.0030	0.0030	0.0029
Columns 120 through 126						
1.5690	1.5696	1.5710	1.5730	1.5743	1.5750	1.5770
0.0028	0.0028	0.0027	0.0027	0.0026	0.0026	0.0025
Columns 127 through 133						
1.5790	1.5794	1.5810	1.5830	1.5849	1.5850	0.7200
0.0024	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0022	0.0120
Columns 134 through 140						
1.5727	1.5730	1.5750	1.5751	1.5770	1.5780	1.5790
0.0040	0.0040	0.0038	0.0038	0.0037	0.0036	0.0035
Columns 141 through 145						
1.5810	1.5812	1.5830	1.5848	1.5850		
0.0034	0.0034	0.0033	0.0032	0.0032		

$$R_m[\text{N/mm}^2]t[^\circ\text{C}]\text{med} = -3.745 \cdot m[\text{kg/t}]^2 + 0.03494 \cdot d[\text{mm}]^2 + 0.7767 \cdot m[\text{kg/t}] \cdot d[\text{mm}] + 42.86 \cdot m[\text{kg/t}] + 7.338 \cdot d[\text{mm}] + 584.3$$

h =

9

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:

$$R_m[\text{N/mm}^2] = R_m[\text{N/mm}^2](m[\text{kg}], d[\text{mm}], t[\text{C}]\text{med})$$

C3 =

Columns 1 through 7

600.0000	0.0225	0	620.0000	0.5328	0.4950	0.4568
2.0000	2.0000	2.1219	17.0000	2.0000	2.2000	2.4000

Columns 8 through 14

0.4182	0.4000	0.3801	0.3422	0.3040	0.2653	0.2263
2.6000	2.6938	2.8000	3.0000	3.2000	3.4000	3.6000

Columns 15 through 21

0.2000	0.1874	0.1491	0.1105	0.0714	0.0320	0
3.7338	3.8000	4.0000	4.2000	4.4000	4.6000	4.7609

Columns 22 through 28

640.0000	0.2821	0.3238	0.3651	0.4000	0.4062	0.4484
25.0000	6.0000	5.8000	5.6000	5.4293	5.4000	5.2000

Columns 29 through 35

0.4901	0.5313	0.5722	0.6000	0.6131	0.6548	0.6960
5.0000	4.8000	4.6000	4.4623	4.4000	4.2000	4.0000

Columns 36 through 42

0.7368	0.7772	0.8000	0.8179	0.8591	0.8999	0.9402
3.8000	3.6000	3.4858	3.4000	3.2000	3.0000	2.8000

Columns 43 through 49

0.9800	1.0000	1.0203	1.0611	1.1014	660.0000	0.8725
2.6000	2.4989	2.4000	2.2000	2.0000	25.0000	6.0000

Columns 50 through 56

0.9172	0.9615	1.0000	1.0054	1.0507	1.0955	1.1397
5.8000	5.6000	5.4237	5.4000	5.2000	5.0000	4.8000

Columns 57 through 63

1.1834	1.2000	1.2279	1.2727	1.3169	1.3605	1.4000
4.6000	4.5232	4.4000	4.2000	4.0000	3.8000	3.6171

Columns 64 through 70

1.4039	1.4487	1.4929	1.5366	1.5797	1.6000	1.6234
3.6000	3.4000	3.2000	3.0000	2.8000	2.7048	2.6000

Columns 71 through 77

1.6677	1.7113	1.7544	680.0000	1.5597	1.6000	1.6083
2.4000	2.2000	2.0000	26.0000	6.0000	5.8329	5.8000

Columns 78 through 84

1.6587	1.7083	1.7572	1.8000	1.8058	1.8562	1.9059
5.6000	5.4000	5.2000	5.0228	5.0000	4.8000	4.6000

Columns 85 through 91

1.9549	2.0000	2.0034	2.0539	2.1036	2.1527	2.2000
4.4000	4.2132	4.2000	4.0000	3.8000	3.6000	3.4039

Columns 92 through 98

2.2010	2.2516	2.3015	2.3505	2.3988	2.4000	2.4495
3.4000	3.2000	3.0000	2.8000	2.6000	2.5950	2.4000

Columns 99 through 105

2.4994	2.5485	700.0000	2.4174	2.4772	2.5360	2.5937
2.2000	2.0000	27.0000	6.0000	5.8000	5.6000	5.4000

Columns 106 through 112

2.6000	2.6544	2.7145	2.7735	2.8000	2.8340	2.8955
5.3780	5.2000	5.0000	4.8000	4.7087	4.6000	4.4000

Columns 113 through 119

2.9558	3.0000	3.0163	3.0794	3.1413	3.2000	3.2019
4.2000	4.0509	4.0000	3.8000	3.6000	3.4059	3.4000

Columns 120 through 126

3.2669	3.3303	3.3924	3.4000	3.4585	3.5239	3.5877
3.2000	3.0000	2.8000	2.7752	2.6000	2.4000	2.2000

Columns 127 through 133

3.6000	3.6554	720.0000	3.7400	3.8000	3.8362	3.9385
2.1607	2.0000	5.0000	6.0000	5.8689	5.8000	5.6000

Column 134

4.0000
5.4762

Tabelele cu compararea datelor experimentale cu cele teoretice, matricea punctelor staționare, coordonatele punctului staționar al suprafețelor, respectiv matricea liniilor de contur (c_1, c_2, c_3) pentru suprafețe de regresie A_5

LIMITE DE VARIATIE ALE VARIABILELOR

m[kg/t]	0	4
d[mm]	2	6
t[°C]	1545	1585
A_5 [%]	22	40

VALORILE MEDII SI ABATERILE VARIABILELOR

m[kg/t]	1.9167	1.3044
d[mm]	4	1.4142
t[°C]	1565	14.142
A_5 [%]	31.633	4.3549

ECUATIA HIPERSUPRAFETEI DE REGRESIE

$$A_5[\%] = -0.5567 \cdot m[\text{kg/t}]^2 + 0.06035 \cdot d[\text{mm}]^2 + 9.121 \cdot 10^{-6} \cdot t[^\circ\text{C}]^2 + 0.5331 \cdot m[\text{kg/t}] \cdot d[\text{mm}] + 0.0001736 \cdot d[\text{mm}] \cdot t[^\circ\text{C}] + 0.004736 \cdot t[^\circ\text{C}] \cdot m[\text{kg/t}] + 0.003318 \cdot m[\text{kg/t}] + 0.0003761 \cdot d[\text{mm}] + 1.069 \cdot 10^{-6} \cdot t[^\circ\text{C}] + 2.344 \cdot 10^{-6}$$

COEFICIENTUL DE CORELATIE

$$r_f = 0.9812$$

ABATEREA DE LA SUPRAFATA DE REGRESIE

$$s_f = 0.8413$$

COMPARAREA DATELOR EXPERIMENTALE CU CELE TEORETICE

1	1	2	1585	31	29.588	1.412
2	1	3	1575	30	29.291	0.70858
3	1	4	1565	30	29.114	0.88606
4	1	5	1555	29	29.056	0.055504
5	1	6	1545	29	29.116	-0.11612
6	1.5	2	1585	33	32.11	0.88973
7	1.5	3	1575	32	31.524	0.47647
8	1.5	4	1565	31	31.056	-0.055844
9	1.5	5	1555	30	30.707	-0.7072
10	1.5	6	1545	31	30.478	0.52239
11	2	2	1585	35	34.354	0.64578
12	2	3	1575	34	33.477	0.52271
13	2	4	1565	32	32.719	-0.71939
14	2	5	1555	32	32.081	-0.08055
15	2	6	1545	30	31.561	-1.5608
16	3	2	1585	37	38.007	-1.0071
17	3	3	1575	36	36.55	-0.54973
18	3	4	1565	35	35.211	-0.21143
19	3	5	1555	34	33.992	0.0078231
20	3	6	1545	32	32.892	-0.89197
21	4	2	1585	40	40.547	-0.54651
22	4	3	1575	39	38.509	0.49125
23	4	4	1565	36	36.59	-0.59004
24	4	5	1555	36	34.79	1.2096

25	4	6	1545	34	33.11	0.89023
26	0	2	1585	22	23.708	-1.7083
27	0	3	1575	23	23.992	-0.99214
28	0	4	1565	25	24.395	0.60494
29	0	5	1555	24	24.917	-0.91704
30	0	6	1545	27	25.558	1.4419

MATRICEA PUNCTELOR STATIONARE

coeficientii necunoscutelor

matm =

-1.1134	-0.5331	0.0047
-0.5331	0.1207	0.0002
0.0047	0.0002	0.0000

termenii liberi

t1m =

0.0033
-0.0004
0.0000

COORDONATELE PUNCTULUI STATIONAR AL SUPREFETEI

m[kg/t]-0.0003531

d[mm]-0.004789

t[°C] 0.07863

A_s[%]2.071e-006
$$A_s[\%]m[\text{kg/t}]_{\text{med}}=0.06035*d[\text{mm}]^2+9.121e-006*t[^\circ\text{C}]^2+0.0001736*d[\text{mm}]*t[^\circ\text{C}]+1.021*d[\text{mm}]+0.009078*t[^\circ\text{C}]+2.051$$

h =

3

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:

A_s[%]= A_s[(m[kg/t],d[mm],t[°C])]

C1 =

1.0e+003 *

Columns 1 through 7

0.0315	0.0049	0.0050	0.0052	0.0054	0.0056	0.0056
0.0080	1.5450	1.5453	1.5460	1.5466	1.5470	1.5471

Columns 8 through 14

0.0058	0.0060	0.0320	0.0031	0.0032	0.0033	0.0034
1.5474	1.5476	0.0230	1.5450	1.5462	1.5470	1.5481

Columns 15 through 21

0.0035	0.0036	0.0037	0.0038	0.0040	0.0040	0.0042
1.5490	1.5498	1.5510	1.5514	1.5529	1.5530	1.5543

Columns 22 through 28

0.0043	0.0044	0.0046	0.0047	0.0048	0.0050	0.0052
1.5550	1.5555	1.5566	1.5570	1.5575	1.5584	1.5590

Columns 29 through 35

0.0052	0.0054	0.0056	0.0058	0.0060	0.0325	0.0020
1.5591	1.5596	1.5601	1.5604	1.5606	0.0350	1.5455

Columns 36 through 42

0.0021	0.0022	0.0023	0.0024	0.0024	0.0026	0.0026
1.5470	1.5482	1.5490	1.5507	1.5510	1.5530	1.5531

Columns 43 through 49

0.0028	0.0028	0.0030	0.0030	0.0032	0.0032	0.0034
1.5550	1.5553	1.5570	1.5574	1.5590	1.5594	1.5610

Columns 50 through 56

0.0034	0.0036	0.0036	0.0038	0.0039	0.0040	0.0041
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

1.5612	1.5630	1.5630	1.5645	1.5650	1.5660	1.5670
Columns 57 through 63						
0.0042	0.0044	0.0045	0.0046	0.0048	0.0049	0.0050
1.5673	1.5685	1.5690	1.5696	1.5705	1.5710	1.5714
Columns 64 through 70						
0.0052	0.0054	0.0056	0.0056	0.0058	0.0060	0.0330
1.5720	1.5726	1.5730	1.5730	1.5734	1.5735	0.0310
Columns 71 through 77						
0.0052	0.0052	0.0050	0.0048	0.0047	0.0046	0.0044
1.5850	1.5849	1.5843	1.5835	1.5830	1.5825	1.5815
Columns 78 through 84						
0.0043	0.0042	0.0040	0.0040	0.0038	0.0	
$A_5[\%]d[\text{mm}]_{\text{med}}=9.121e-006*t[^{\circ}\text{C}]^2+-$						
$0.5567*m[\text{kg/t}]^2+0.004736*t[^{\circ}\text{C}]*m[\text{kg/t}]+0.0006956*t[^{\circ}\text{C}]+-2.136*m[\text{kg/t}]+0.9671$						
h =						
6						
MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:						
$A_5[\%]= A_5[\%](m[\text{kg/t}],d[\text{mm}]_{\text{med}},t[^{\circ}\text{C}])$						
C2 =						
1.0e+003 *						
Columns 1 through 7						
0.0240	1.5514	1.5510	1.5490	1.5470	1.5450	0.0260
0.0050	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0230
Columns 8 through 14						
1.5450	1.5470	1.5490	1.5510	1.5516	1.5530	1.5550
0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
Columns 15 through 21						
1.5570	1.5590	1.5610	1.5630	1.5650	1.5670	1.5690
0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
Columns 22 through 28						
1.5710	1.5730	1.5750	1.5770	1.5790	1.5810	1.5830
0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Columns 29 through 35						
1.5838	1.5850	0.0280	1.5450	1.5470	1.5490	1.5510
0.0002	0.0002	0.0230	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008
Columns 36 through 42						
1.5530	1.5550	1.5570	1.5571	1.5590	1.5610	1.5630
0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
Columns 43 through 49						
1.5650	1.5670	1.5690	1.5710	1.5730	1.5750	1.5770
0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007
Columns 50 through 56						
1.5790	1.5810	1.5830	1.5848	1.5850	0.0300	1.5450
0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0230	0.0014
Columns 57 through 63						
1.5457	1.5470	1.5490	1.5510	1.5530	1.5550	1.5570
0.0014	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013
Columns 64 through 70						
1.5590	1.5610	1.5630	1.5650	1.5670	1.5672	1.5690
0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
Columns 71 through 77						
1.5710	1.5730	1.5750	1.5770	1.5790	1.5810	1.5830
0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011

Columns 78 through 84						
1.5850	0.0320	1.5450	1.5463	1.5470	1.5490	1.5510
0.0010	0.0240	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0019
Columns 85 through 91						
1.5530	1.5550	1.5570	1.5590	1.5610	1.5627	1.5630
0.0019	0.0019	0.0019	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018
Columns 92 through 98						
1.5650	1.5670	1.5690	1.5710	1.5730	1.5750	1.5770
0.0018	0.0018	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0016
Columns 99 through 105						
1.5790	1.5809	1.5810	1.5830	1.5850	0.0340	1.5450
0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0250	0.0028
Columns 106 through 112						
1.5461	1.5470	1.5490	1.5510	1.5530	1.5550	1.5566
0.0028	0.0028	0.0027	0.0027	0.0027	0.0026	0.0026
Columns 113 through 119						
1.5570	1.5590	1.5610	1.5630	1.5650	1.5670	1.5687
0.0026	0.0026	0.0025	0.0025	0.0025	0.0024	0.0024
Columns 120 through 126						
1.5690	1.5710	1.5730	1.5750	1.5770	1.5790	1.5810
0.0024	0.0024	0.0023	0.0023	0.0023	0.0022	0.0022
Columns 127 through 133						
1.5824	1.5830	1.5850	0.0360	1.5527	1.5530	1.5550
0.0022	0.0022	0.0022	0.0230	0.0040	0.0040	0.0039
Columns 134 through 140						
1.5564	1.5570	1.5590	1.5610	1.5613	1.5630	1.5650
0.0038	0.0038	0.0037	0.0036	0.0036	0.0035	0.0035
Columns 141 through 147						
1.5670	1.5673	1.5690	1.5710	1.5730	1.5745	1.5750
0.0034	0.0034	0.0034	0.0033	0.0032	0.0032	0.0032
Columns 148 through 153						
1.5770	1.5790	1.5810	1.5830	1.5831	1.5850	1.5510
0.0010	0.0240	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0019
Columns 85 through 91						
1.5530	1.5550	1.5570	1.5590	1.5610	1.5627	1.5630
0.0019	0.0019	0.0019	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018
Columns 92 through 98						
1.5650	1.5670	1.5690	1.5710	1.5730	1.5750	1.5770
0.0018	0.0018	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0016
Columns 99 through 105						
1.5790	1.5809	1.5810	1.5830	1.5850	0.0340	1.5450
0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016	0.0250	0.0028
Columns 106 through 112						
1.5461	1.5470	1.5490	1.5510	1.5530	1.5550	1.5566
0.0028	0.0028	0.0027	0.0027	0.0027	0.0026	0.0026
Columns 113 through 119						
1.5570	1.5590	1.5610	1.5630	1.5650	1.5670	1.5687
0.0026	0.0026	0.0025	0.0025	0.0025	0.0024	0.0024
Columns 120 through 126						
1.5690	1.5710	1.5730	1.5750	1.5770	1.5790	1.5810
0.0024	0.0024	0.0023	0.0023	0.0023	0.0022	0.0022
Columns 127 through 133						
1.5824	1.5830	1.5850	0.0360	1.5527	1.5530	1.5550

0.0022	0.0022	0.0022	0.0230	0.0040	0.0040	0.0039
Columns 134 through 140						
1.5564	1.5570	1.5590	1.5610	1.5613	1.5630	1.5650
0.0038	0.0038	0.0037	0.0036	0.0036	0.0035	0.0035
Columns 141 through 147						
1.5670	1.5673	1.5690	1.5710	1.5730	1.5745	1.5750
0.0034	0.0034	0.0034	0.0033	0.0032	0.0032	0.0032
Columns 148 through 153						
1.5770	1.5790	1.5810	1.5830	1.5831	1.5850	
0.0031	0.0031	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	
$A_5[\%]t[^\circ\text{C}]_{\text{med}} = -0.5567 * m[\text{kg/t}]^2 + 0.06035 * d[\text{mm}]^2 +$						
$0.5331 * m[\text{kg/t}] * d[\text{mm}] + 7.408 * m[\text{kg/t}] + 0.2721 * d[\text{mm}] + 22.34$						
h =						
9						
MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:						
$A_5[\%] = A_5[\%](m[\text{kg/t}], d[\text{mm}], t[^\circ\text{C}]_{\text{med}})$						
C3 =						
Columns 1 through 7						
24.0000	0.1402	0.1254	0.1094	0.0920	0.0730	0.0526
9.0000	2.0000	2.2000	2.4000	2.6000	2.8000	3.0000
Columns 8 through 14						
0.0304	0.0066	0	26.0000	0.4736	0.4640	0.4531
3.2000	3.4000	3.4520	23.0000	2.0000	2.2000	2.4000
Columns 15 through 21						
0.4410	0.4274	0.4124	0.4000	0.3960	0.3785	0.3594
2.6000	2.8000	3.0000	3.1503	3.2000	3.4000	3.6000
Columns 22 through 28						
0.3385	0.3158	0.2910	0.2641	0.2349	0.2033	0.2000
3.8000	4.0000	4.2000	4.4000	4.6000	4.8000	4.8196
Columns 29 through 35						
0.1705	0.1353	0.0973	0.0563	0.0120	0	28.0000
5.0000	5.2000	5.4000	5.6000	5.8000	5.8514	23.0000
Columns 36 through 42						
0.4709	0.5099	0.5455	0.5780	0.6000	0.6080	0.6365
6.0000	5.8000	5.6000	5.4000	5.2524	5.2000	5.0000
Columns 43 through 49						
0.6622	0.6855	0.7065	0.7254	0.7423	0.7574	0.7708
4.8000	4.6000	4.4000	4.2000	4.0000	3.8000	3.6000
Columns 50 through 56						
0.7826	0.7929	0.8000	0.8018	0.8098	0.8164	0.8218
3.4000	3.2000	3.0403	3.0000	2.8000	2.6000	2.4000
Columns 57 through 63						
0.8261	0.8293	30.0000	1.0673	1.0942	1.1178	1.1384
2.2000	2.0000	22.0000	6.0000	5.8000	5.6000	5.4000
Columns 64 through 70						
1.1562	1.1717	1.1848	1.1960	1.2000	1.2056	1.2136
5.2000	5.0000	4.8000	4.6000	4.5148	4.4000	4.2000
Columns 71 through 77						
1.2198	1.2245	1.2278	1.2297	1.2304	1.2300	1.2285
4.0000	3.8000	3.6000	3.4000	3.2000	3.0000	2.8000
Columns 78 through 84						
1.2260	1.2226	1.2183	1.2133	32.0000	1.6341	1.6500
2.6000	2.4000	2.2000	2.0000	22.0000	2.0000	2.2000

Columns 85 through 91

1.6656	1.6808	1.6956	1.7100	1.7240	1.7374	1.7503
2.4000	2.6000	2.8000	3.0000	3.2000	3.4000	3.6000

Columns 92 through 98

1.7625	1.7742	1.7851	1.7952	1.8000	1.8048	1.8138
3.8000	4.0000	4.2000	4.4000	4.5053	4.6000	4.8000

Columns 99 through 105

1.8217	1.8283	1.8335	1.8371	1.8388	1.8384	34.0000
5.0000	5.2000	5.4000	5.6000	5.8000	6.0000	27.0000

Columns 106 through 112

2.1041	2.1347	2.1657	2.1973	2.2000	2.2313	2.2662
2.0000	2.2000	2.4000	2.6000	2.6176	2.8000	3.0000

Columns 113 through 119

2.3020	2.3386	2.3763	2.4000	2.4165	2.4603	2.5059
3.2000	3.4000	3.6000	3.7235	3.8000	4.0000	4.2000

Columns 120 through 126

2.5537	2.6000	2.6045	2.6640	2.7281	2.7977	2.8000
4.4000	4.5848	4.6000	4.8000	5.0000	5.2000	5.2066

Columns 127 through 133

2.8864	2.9874	3.0000	3.1304	3.2000	3.3572	36.0000
5.4000	5.6000	5.6236	5.8000	5.8834	6.0000	20.0000

Columns 134 through 140

2.6445	2.6992	2.7562	2.8000	2.8168	2.8841	2.9550
2.0000	2.2000	2.4000	2.5489	2.6000	2.8000	3.0000

Columns 141 through 147

3.0000	3.0331	3.1214	3.2000	3.2186	3.3354	3.4000
3.1218	3.2000	3.4000	3.5666	3.6000	3.8000	3.9032

Columns 148 through 154

3.4751	3.6000	3.6555	3.8000	3.9323	4.0000	38.0000
4.0000	4.1495	4.2000	4.3229	4.4000	4.4370	10.0000

Columns 155 through 161

3.3052	3.4000	3.4019	3.5152	3.6000	3.6419	3.7916
2.0000	2.1965	2.2000	2.4000	2.5407	2.6000	2.8000

Columns 162 through 164

3.8000	3.9811	4.0000
2.8108	3.0000	3.0186

Tabelele cu compararea datelor experimentale cu cele teoretice, matricea punctelor staționare, coordonatele punctului staționar al suprafețelor, respectiv matricea liniilor de contur (c_1 , c_2 , c_3) pentru suprafețe de regresie Z

LIMITE DE VARIATIE ALE VARIABILELOR

m[kg/t]	1	4
d[mm]	2	6
t[°C]	1545	1585
Z[%]	59	71

VALORILE MEDII SI ABATERILE VARIABILELOR

m[kg/t]	2.3	1.077
d[mm]	4	1.4142
t[°C]	1565	14.142
Z[%]	64.96	3.143

ECUATIA HIPERSUPRAFETEI DE REGRESIE

$$Z[\%]=-0.548*m[\text{kg/t}]^2+-0.03047*d[\text{mm}]^2+0.00002312*t[^\circ\text{C}]^2+-0.02422*m[\text{kg/t}]*d[\text{mm}]+0.00004095*d[\text{mm}]*t[^\circ\text{C}]+0.00344*t[^\circ\text{C}]*m[\text{kg/t}]+0.0001488*m[\text{kg/t}]+-0.0001898*d[\text{mm}]+-7.688e-008*t[^\circ\text{C}]+-1.183e-006$$

COEFICIENTUL DE CORELATIE

rf =

0.9974

ABATEREA DE LA SUPRAFATA DE REGRESIE

sf =

0.2264

COMPARAREA DATELOR EXPERIMENTALE CU CELE TEORETICE

1	1	2	1585	63	62.945	0.055356
2	1	3	1575	62	62.067	-0.066565
3	1	4	1565	61	61.131	-0.13134
4	1	5	1555	60	60.139	-0.13898
5	1	6	1545	59	59.089	-0.089471
6	1.5	2	1585	65	64.961	0.038527
7	1.5	3	1575	64	64.054	-0.054084
8	1.5	4	1565	63	63.09	-0.089552
9	1.5	5	1555	62	62.068	-0.067877
10	1.5	6	1545	61	60.989	0.01094
11	2	2	1585	67	66.704	0.29568
12	2	3	1575	66	65.768	0.23238
13	2	4	1565	65	64.774	0.22623
14	2	5	1555	64	63.723	0.27721
15	2	6	1545	63	62.615	0.38534
16	3	2	1585	69	69.368	-0.36804
17	3	3	1575	68	68.373	-0.37272
18	3	4	1565	67	67.32	-0.32026
19	3	5	1555	66	66.211	-0.21065
20	3	6	1545	65	65.044	-0.043901
21	4	2	1585	71	70.936	0.064186
22	4	3	1575	70	69.882	0.11813
23	4	4	1565	69	68.771	0.22921
24	4	5	1555	68	67.603	0.39744
25	4	6	1545	66	66.377	-0.37719

MATRICEA PUNCTELOR STATIONARE

coeficientii necunoscutelor

matm =

-1.0959	-0.0242	0.0034
-0.0242	-0.0609	0.0000
0.0034	0.0000	0.0000

termenii liberi

t1m =

1.0e-003 *
0.1488
0.1898
0.0001

COORDONATELE PUNCTULUI STATIONAR AL SUPREFETEI

m[kg/t]-0.00004344

d[mm]-0.003092

t[°C] 0.007633

Z[%] -8.863e-007

$$Z[\%]m[\text{kg/t}]_{\text{med}} = -0.03047 \cdot d[\text{mm}]^2 + 0.00002312 \cdot t[^\circ\text{C}]^2 + 0.00004095 \cdot d[\text{mm}] \cdot t[^\circ\text{C}] + 0.0559 \cdot d[\text{mm}] + 0.007912 \cdot t[^\circ\text{C}] - 2.899$$

h =

3

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:

$$Z[\%] = Z[\%](m[\text{kg/t}]_{\text{med}}, d[\text{mm}], t[^\circ\text{C}])$$

C1 =

1.0e+003 *

Columns 1 through 7

0.0635	0.0059	0.0060	0.0640	0.0042	0.0044	0.0046
0.0020	1.5450	1.5455	0.0130	1.5450	1.5456	1.5463

Columns 8 through 14

0.0048	0.0048	0.0050	0.0052	0.0053	0.0054	0.0056
1.5470	1.5470	1.5477	1.5484	1.5490	1.5492	1.5501

Columns 15 through 21

0.0058	0.0058	0.0060	0.0645	0.0020	0.0022	0.0024
1.5509	1.5510	1.5518	0.0270	1.5462	1.5465	1.5468

Columns 22 through 28

0.0025	0.0026	0.0028	0.0030	0.0032	0.0034	0.0034
1.5470	1.5472	1.5476	1.5480	1.5485	1.5490	1.5490

Columns 29 through 35

0.0036	0.0038	0.0040	0.0041	0.0042	0.0044	0.0046
1.5495	1.5500	1.5506	1.5510	1.5512	1.5519	1.5525

Columns 36 through 42

0.0047	0.0048	0.0050	0.0052	0.0053	0.0054	0.0056
1.5530	1.5532	1.5539	1.5547	1.5550	1.5555	1.5563

Columns 43 through 49

0.0058	0.0058	0.0060	0.0650	0.0020	0.0022	0.0023
1.5570	1.5572	1.5580	0.0270	1.5525	1.5528	1.5530

Columns 50 through 56

0.0024	0.0026	0.0028	0.0030	0.0032	0.0033	0.0034
1.5531	1.5535	1.5539	1.5543	1.5547	1.5550	1.5552

Columns 57 through 63

0.0036	0.0038	0.0040	0.0040	0.0042	0.0044	0.0046
1.5557	1.5563	1.5569	1.5570	1.5575	1.5581	1.5588

Columns 64 through 70

0.0047	0.0048	0.0050	0.0052	0.0052	0.0054	0.0056
1.5590	1.5595	1.5602	1.5609	1.5610	1.5617	1.5625

Columns 71 through 77

0.0057	0.0058	0.0060	0.0655	0.0020	0.0022	0.0022
1.5630	1.5634	1.5643	0.0270	1.5587	1.5590	1.5590

Columns 78 through 84

0.0024	0.0026	0.0028	0.0030	0.0032	0.0032	0.0034
1.5594	1.5597	1.5601	1.5605	1.5610	1.5610	1.5615

Columns 85 through 91

0.0036	0.0038	0.0040	0.0040	0.0042	0.0044	0.0046
1.5620	1.5625	1.5630	1.5631	1.5637	1.5643	1.5650

Columns 92 through 98

0.0046	0.0048	0.0050	0.0052	0.0052	0.0054	0.0056
1.5650	1.5657	1.5664	1.5670	1.5672	1.5679	1.5687

Columns 99 through 105

0.0057	0.0058	0.0060	0.0660	0.0020	0.0020	0.0022
1.5690	1.5696	1.5705	0.0270	1.5650	1.5650	1.5653

Columns 106 through 112

0.0024	0.0026	0.0028	0.0030	0.0031	0.0032	0.0034
1.5656	1.5660	1.5663	1.5668	1.5670	1.5672	1.5677

Columns 113 through 119

0.0036	0.0038	0.0039	0.0040	0.0042	0.0044	0.0045
1.5682	1.5687	1.5690	1.5693	1.5699	1.5705	1.5710

Columns 120 through 126

0.0046	0.0048	0.0050	0.0051	0.0052	0.0054	0.0056
1.5712	1.5719	1.5726	1.5730	1.5734	1.5741	1.5749

Columns 127 through 133

0.0056	0.0058	0.0060	0.0665	0.0020	0.0022	0.0024
1.5750	1.5758	1.5766	0.0260	1.5712	1.5715	1.5718

Columns 134 through 140

0.0026	0.0028	0.0030	0.0030	0.0032	0.0034	0.0036
1.5722	1.5726	1.5730	1.5730	1.5734	1.5739	1.5744

Columns 141 through 147

0.0038	0.0038	0.0040	0.0042	0.0044	0.0045	0.0046
1.5749	1.5750	1.5755	1.5761	1.5767	1.5770	1.5774

Columns 148 through 154

0.0048	0.0050	0.0051	0.0052	0.0054	0.0056	0.0056
1.5781	1.5788	1.5790	1.5795	1.5803	1.5810	1.5811

Columns 155 through 161

0.0058	0.0060	0.0670	0.0050	0.0050	0.0048	0.0046
1.5819	1.5828	0.0200	1.5850	1.5849	1.5842	1.5835

Columns 162 through 168

0.0044	0.0044	0.0042	0.0040	0.0038	0.0038	0.0036
1.5830	1.5829	1.5823	1.5817	1.5811	1.5810	1.5806

Columns 169 through 175

0.0034	0.0032	0.0030	0.0029	0.0028	0.0026	0.0024
1.5801	1.5796	1.5791	1.5790	1.5787	1.5783	1.5780

Columns 176 through 182

0.0022	0.0020	0.0675	0.0029	0.0028	0.0026	0.0024
1.5777	1.5774	0.0060	1.5850	1.5849	1.5845	1.5842

Columns 183 through 184

0.0022	0.0020
1.5838	1.5835

$$Z[\%]d[\text{mm}]_{\text{med}}=0.00002312*t[^\circ\text{C}]^2+-$$

$$0.548*m[\text{kg/t}]^2+0.00344*t[^\circ\text{C}]*m[\text{kg/t}]+0.0001637*t[^\circ\text{C}]+-0.09704*m[\text{kg/t}]+-0.4883$$

h =

6

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:

$$Z[\%]=Z[\%](m[\text{kg/t}],d[\text{mm}]_{\text{med}},t[^\circ\text{C}])$$

C2 =

1.0e+003 *

Columns 1 through 7

0.0600	1.5500	1.5490	1.5470	1.5450	0.0620	1.5764
0.0040	0.0010	0.0010	0.0011	0.0011	0.0210	0.0010

Columns 8 through 14

1.5750	1.5730	1.5710	1.5690	1.5683	1.5670	1.5650
0.0010	0.0011	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012

Columns 15 through 21

1.5630	1.5610	1.5606	1.5590	1.5570	1.5550	1.5533
0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0014	0.0014	0.0014

Columns 22 through 28

1.5530	1.5510	1.5490	1.5470	1.5463	1.5450	0.0640
0.0015	0.0015	0.0015	0.0016	0.0016	0.0016	0.0270

Columns 29 through 35

1.5450	1.5470	1.5478	1.5490	1.5510	1.5530	1.5533
0.0023	0.0022	0.0022	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020

Columns 36 through 42

1.5550	1.5570	1.5590	1.5592	1.5610	1.5630	1.5650
0.0020	0.0020	0.0019	0.0019	0.0019	0.0018	0.0018

Columns 43 through 49

1.5654	1.5670	1.5690	1.5710	1.5721	1.5730	1.5750
0.0018	0.0017	0.0017	0.0016	0.0016	0.0016	0.0015

Columns 50 through 56

1.5770	1.5790	1.5791	1.5810	1.5830	1.5850	0.0660
0.0015	0.0015	0.0014	0.0014	0.0014	0.0013	0.0300

Columns 57 through 63

1.5450	1.5467	1.5470	1.5490	1.5502	1.5510	1.5530
0.0032	0.0031	0.0031	0.0030	0.0030	0.0029	0.0028

Columns 64 through 70

1.5540	1.5550	1.5570	1.5582	1.5590	1.5610	1.5627
0.0028	0.0028	0.0027	0.0027	0.0026	0.0026	0.0025

Columns 71 through 77

1.5630	1.5650	1.5670	1.5676	1.5690	1.5710	1.5728
0.0025	0.0024	0.0024	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022

Columns 78 through 84

1.5730	1.5750	1.5770	1.5784	1.5790	1.5810	1.5830
0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0020	0.0020	0.0019

Columns 85 through 91

1.5844	1.5850	0.0680	1.5560	1.5570	1.5577	1.5590
0.0019	0.0019	0.0250	0.0040	0.0039	0.0039	0.0038

Columns 92 through 98

1.5597	1.5610	1.5620	1.5630	1.5646	1.5650	1.5670
0.0037	0.0036	0.0036	0.0035	0.0034	0.0034	0.0033

Columns 99 through 105

1.5676	1.5690	1.5708	1.5710	1.5730	1.5744	1.5750
0.0033	0.0032	0.0031	0.0031	0.0030	0.0030	0.0029

Columns 106 through 112

1.5770	1.5784	1.5790	1.5810	1.5826	1.5830	1.5850
0.0029	0.0028	0.0028	0.0027	0.0027	0.0026	0.0026

Columns 113 through 119

0.0700	1.5792	1.5810	1.5810	1.5830	1.5831	1.5850
0.0060	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0037	0.0036

$$Z[\%]t[^\circ\text{C}]_{\text{med}} = -0.548 \cdot m[\text{kg/t}]^2 + -0.03047 \cdot d[\text{mm}]^2 + -0.02422 \cdot m[\text{kg/t}] \cdot d[\text{mm}] + 5.383 \cdot m[\text{kg/t}] + 0.0639 \cdot d[\text{mm}] + 56.62$$

h =

9

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR:

$$Z[\%] = Z[\%](m[\text{kg/t}], d[\text{mm}], t[^\circ\text{C}]_{\text{med}})$$

C3 =

Columns 1 through 7

61.0000	1.0982	1.0824	1.0671	1.0526	1.0386	1.0253
9.0000	6.0000	5.8000	5.6000	5.4000	5.2000	5.0000

Columns 8 through 14

1.0126	1.0005	1.0000	62.0000	1.1401	1.1445	1.1495
4.8000	4.6000	4.5911	23.0000	2.0000	2.2000	2.4000
Columns 15 through 21						
1.1500	1.1554	1.1618	1.1689	1.1767	1.1851	1.1941
2.4168	2.6000	2.8000	3.0000	3.2000	3.4000	3.6000
Columns 22 through 28						
1.2037	1.2140	1.2249	1.2365	1.2488	1.2616	1.2752
3.8000	4.0000	4.2000	4.4000	4.6000	4.8000	5.0000
Columns 29 through 35						
1.2894	1.3000	1.3044	1.3206	1.3375	1.3551	63.0000
5.2000	5.3432	5.4000	5.6000	5.8000	6.0000	23.0000
Columns 36 through 42						
1.3940	1.3992	1.4049	1.4114	1.4184	1.4262	1.4346
2.0000	2.2000	2.4000	2.6000	2.8000	3.0000	3.2000
Columns 43 through 49						
1.4436	1.4500	1.4535	1.4644	1.4760	1.4883	1.5013
3.4000	3.5306	3.6000	3.8000	4.0000	4.2000	4.4000
Columns 50 through 56						
1.5150	1.5294	1.5445	1.5604	1.5770	1.5943	1.6000
4.6000	4.8000	5.0000	5.2000	5.4000	5.6000	5.6635
Columns 57 through 63						
1.6129	1.6326	64.0000	1.6675	1.6735	1.6802	1.6876
5.8000	6.0000	23.0000	2.0000	2.2000	2.4000	2.6000
Columns 64 through 70						
1.6958	1.7046	1.7142	1.7245	1.7356	1.7474	1.7500
2.8000	3.0000	3.2000	3.4000	3.6000	3.8000	3.8423
Columns 71 through 77						
1.7604	1.7743	1.7890	1.8045	1.8208	1.8379	1.8558
4.0000	4.2000	4.4000	4.6000	4.8000	5.0000	5.2000
Columns 78 through 84						
1.8745	1.8940	1.9000	1.9151	1.9374	65.0000	1.9666
5.4000	5.6000	5.6588	5.8000	6.0000	23.0000	2.0000
Columns 85 through 91						
1.9737	1.9815	1.9902	1.9996	2.0099	2.0209	2.0328
2.2000	2.4000	2.6000	2.8000	3.0000	3.2000	3.4000
Columns 92 through 98						
2.0455	2.0500	2.0595	2.0746	2.0906	2.1075	2.1253
3.6000	3.6666	3.8000	4.0000	4.2000	4.4000	4.6000
Columns 99 through 105						
2.1439	2.1635	2.1839	2.2000	2.2056	2.2292	2.2537
4.8000	5.0000	5.2000	5.3506	5.4000	5.6000	5.8000
Columns 106 through 112						
2.2792	66.0000	2.3002	2.3087	2.3180	2.3282	2.3394
6.0000	24.0000	2.0000	2.2000	2.4000	2.6000	2.8000
Columns 113 through 119						
2.3500	2.3515	2.3652	2.3800	2.3957	2.4123	2.4300
2.9767	3.0000	3.2000	3.4000	3.6000	3.8000	4.0000
Columns 120 through 126						
2.4487	2.4683	2.4890	2.5000	2.5114	2.5356	2.5609
4.2000	4.4000	4.6000	4.7016	4.8000	5.0000	5.2000
Columns 127 through 133						
2.5874	2.6149	2.6436	2.6500	2.6751	67.0000	2.6841
5.4000	5.6000	5.8000	5.8433	6.0000	24.0000	2.0000

Columns 134 through 140

2.6951	2.7072	2.7204	2.7347	2.7501	2.7667	2.7843
2.2000	2.4000	2.6000	2.8000	3.0000	3.2000	3.4000

Columns 141 through 147

2.8000	2.8033	2.8248	2.8475	2.8714	2.8966	2.9230
3.5671	3.6000	3.8000	4.0000	4.2000	4.4000	4.6000

Columns 148 through 154

2.9500	2.9508	2.9823	3.0152	3.0494	3.0852	3.1000
4.7945	4.8000	5.0000	5.2000	5.4000	5.6000	5.6799

Columns 155 through 161

3.1244	3.1667	68.0000	3.1525	3.1676	3.1842	3.2022
5.8000	6.0000	26.0000	2.0000	2.2000	2.4000	2.6000

Columns 162 through 168

3.2216	3.2425	3.2500	3.2662	3.2924	3.3201	3.3495
2.8000	3.0000	3.0676	3.2000	3.4000	3.6000	3.8000

Columns 169 through 175

3.3805	3.4000	3.4147	3.4530	3.4932	3.5353	3.5500
4.0000	4.1192	4.2000	4.4000	4.6000	4.8000	4.8669

Columns 176 through 182

3.5831	3.6351	3.6893	3.7000	3.7527	3.8204	3.8500
5.0000	5.2000	5.4000	5.4378	5.6000	5.8000	5.8840

Delimitarea volumului de variație pentru caracteristicile mecanice

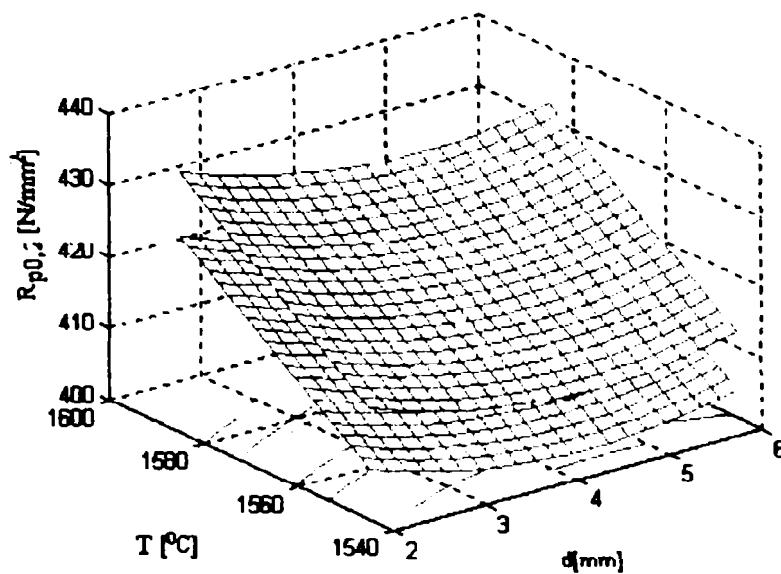


Fig. 1. Delimitarea volumului de variație pentru $R_{p0.2}$ în funcție de temperatura de turnare și de diametrul microrăcitorilor.

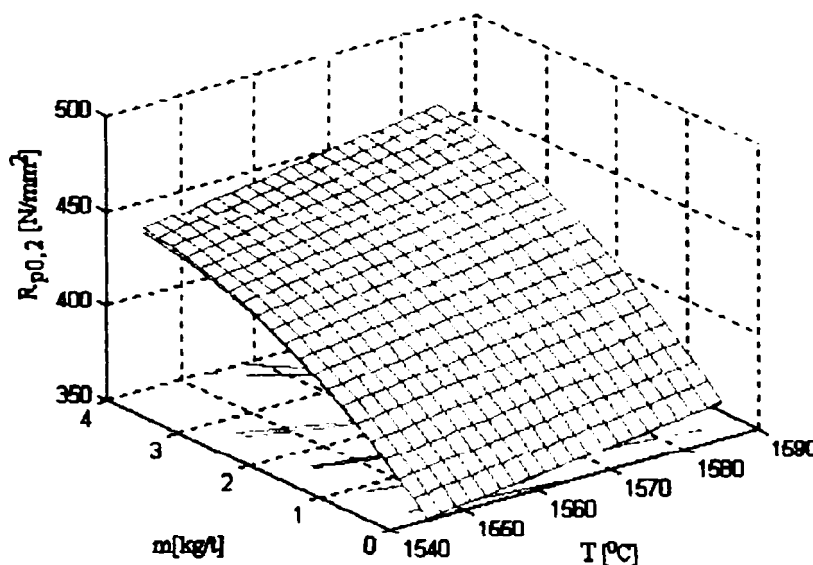


Fig. 2. Delimitarea volumului de variație pentru $R_{p0.2}$ în funcție de consumul specific de microrăcitori și de temperatura de turnare.

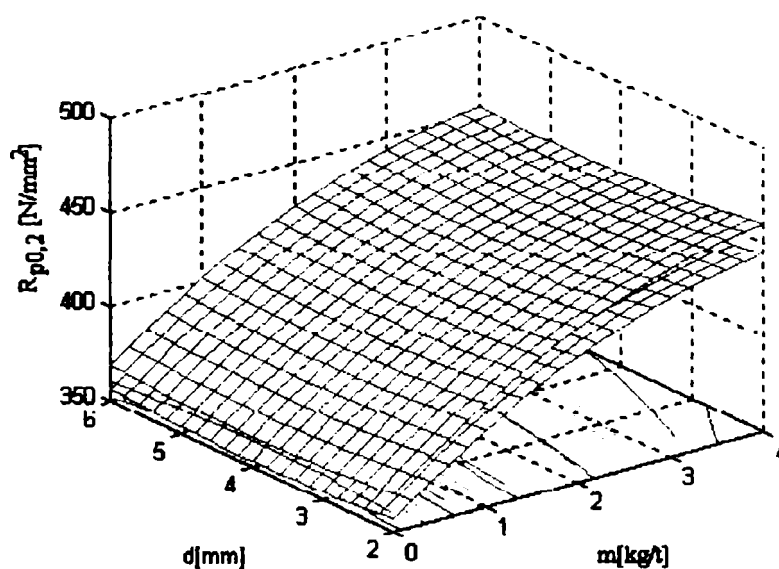


Fig. 3. Delimitarea volumului de variație pentru $R_{p0.2}$ în funcție de consumul specific de microrăcitori și de diametrul acestora.

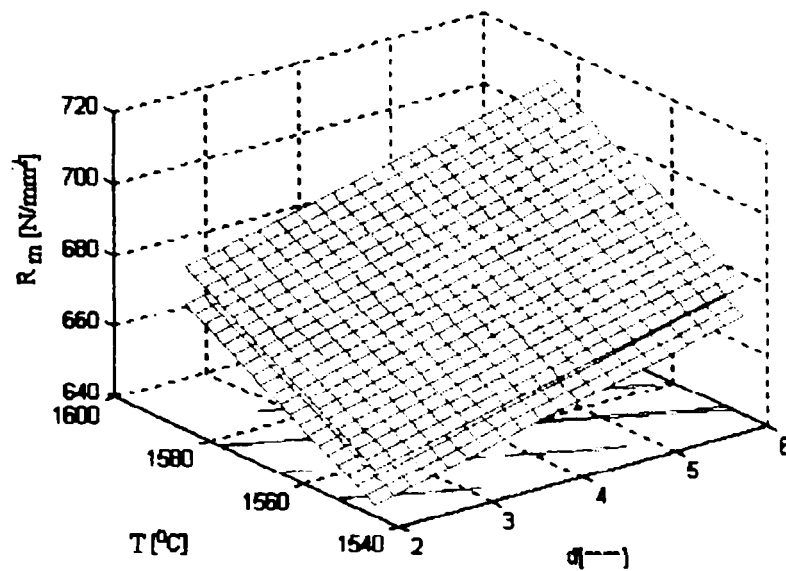


Fig.4. Delimitarea volumului de variație pentru R_m în funcție de temperatura de turnare și de diametrul microrăcitorilor.

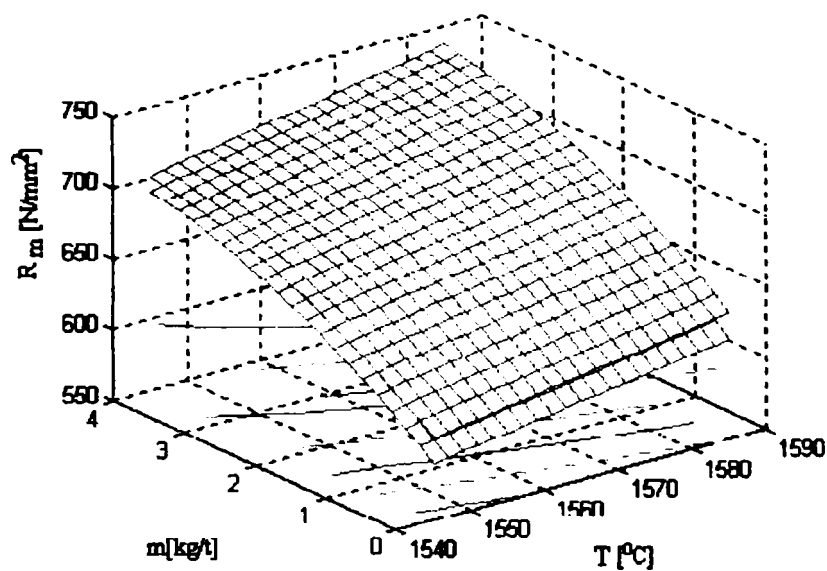


Fig.5. Delimitarea volumului de variație pentru R_m în funcție de consumul specific de microrăcitori și de temperatura de turnare.

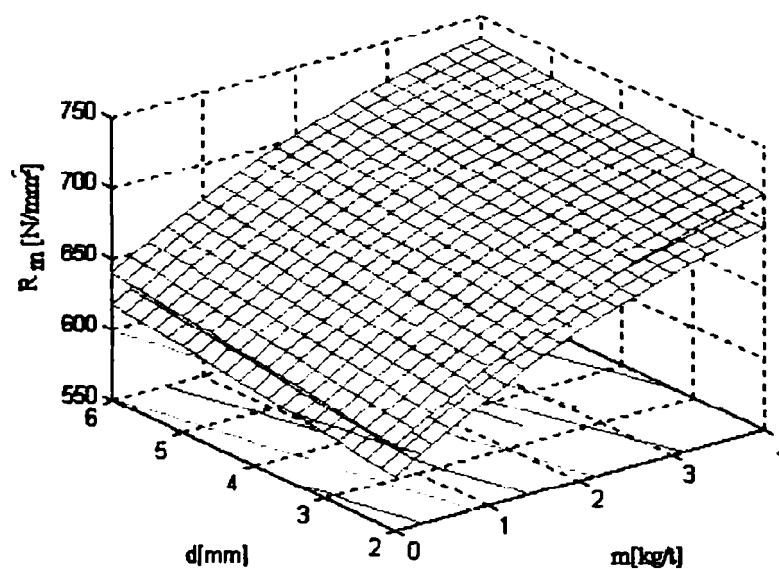


Fig.6. Delimitarea volumului de variație pentru R_m în funcție de consumul specific de microrăcitori și de diametrul acestora.

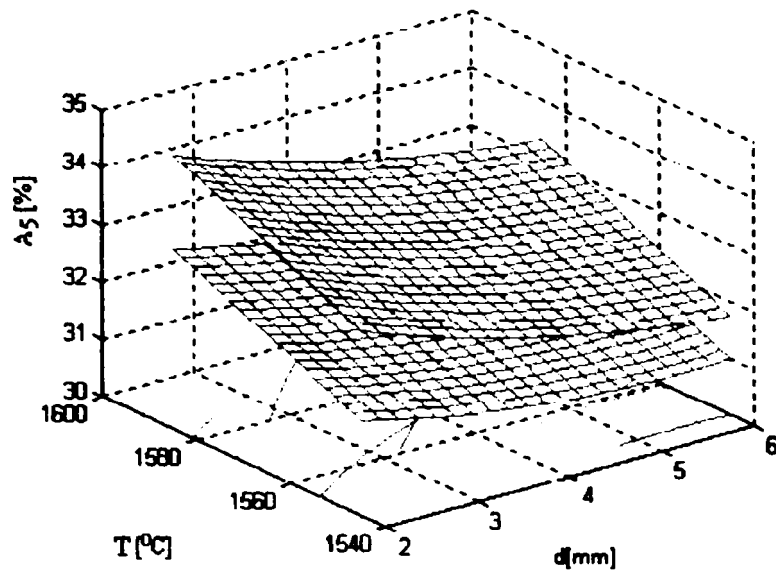


Fig. 7. Delimitarea volumului de variație pentru A_5 în funcție de temperatura de turnare și de diametrul microrăcitorilor.

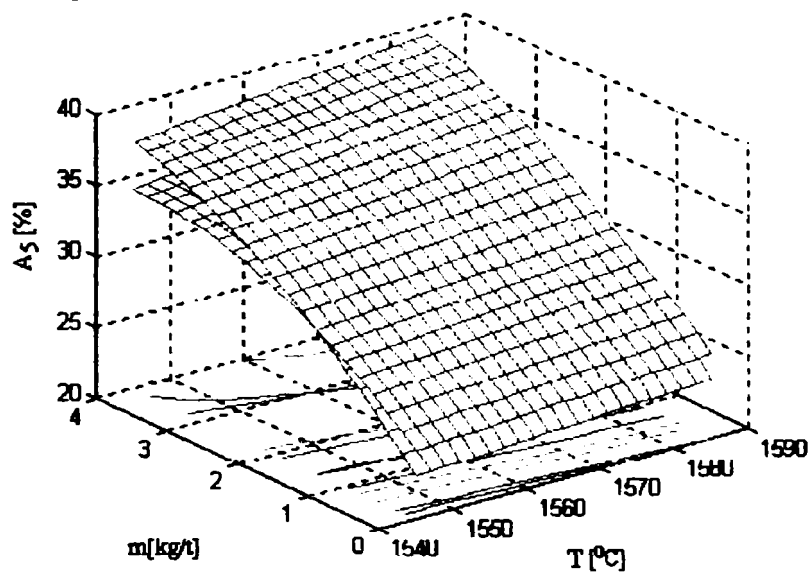


Fig. 8. Delimitarea volumului de variație pentru A_5 în funcție de consumul specific de microrăcitori și de temperatura de turnare.

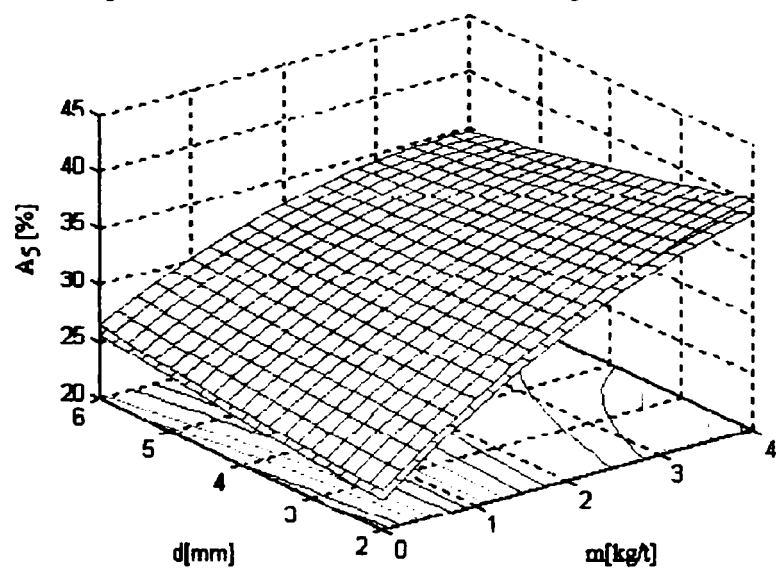


Fig. 9. Delimitarea volumului de variație pentru A_5 în funcție de consumul specific de microrăcitori și de diametrul acestora.

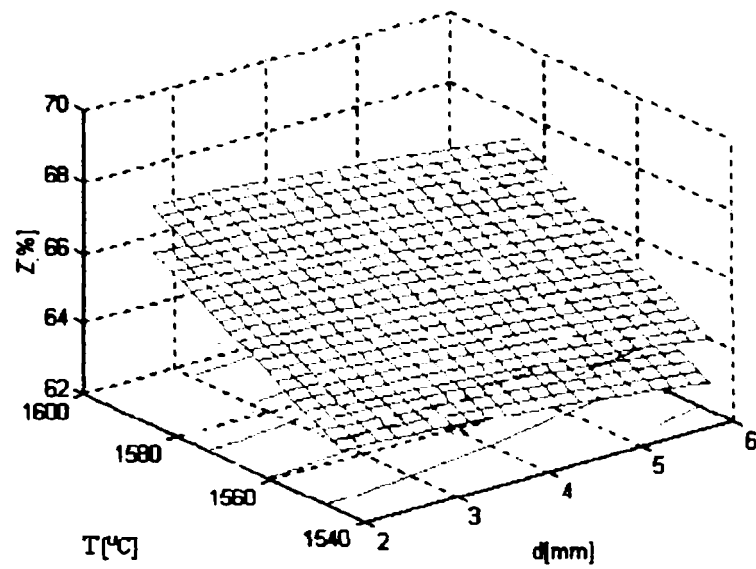


Fig. 10. Delimitarea volumului de variație pentru Z în funcție de temperatura de turnare și de diametrul microrăcitorilor.

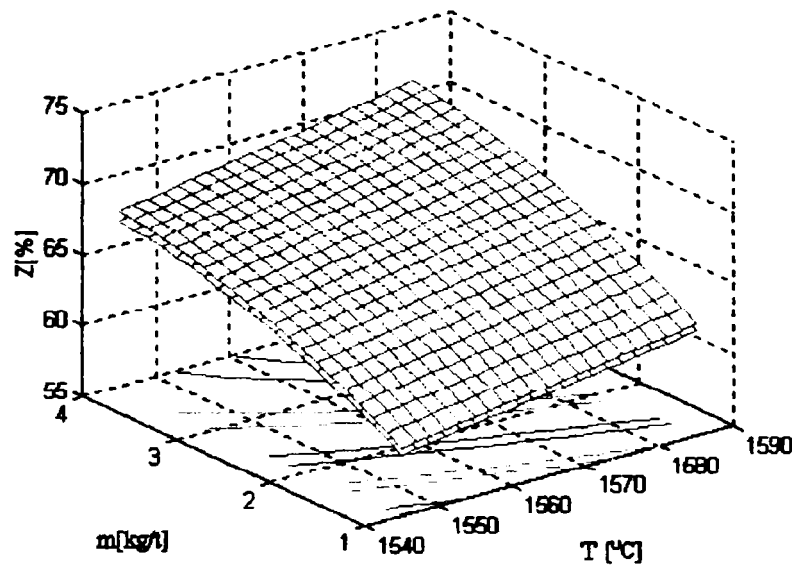


Fig. 11. Delimitarea volumului de variație pentru Z în funcție de consumul specific de microrăcitori și de temperatura de turnare.

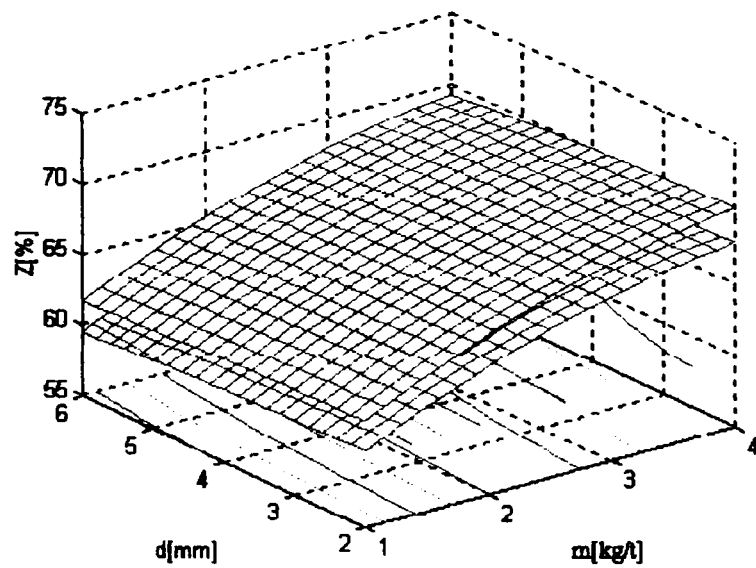


Fig. 12. Delimitarea volumului de variație pentru Z în funcție de consumul specific de microrăcitori și de diametrul acestora.