

Grant: AT COD CNCSIS 249
CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA STRUCTURII
LINGOURILOR DE OȚEL

Autor: SOCALICI ANA

Universitatea: POLITEHNICA TIMIȘOARA, FACULTATEA DE INGINERIE HUNEDOARA

PARTEA I

CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA STRUCTURII DE TURNARE A
LINGOURILOR DIN OȚEL CARBON

1. Analiză cu privire la factorii care influențează calitatea lingourilor de 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 este prezentată schema unui lingou în curs de solidificare.

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

a) o zonă exterioară, subțire, cu grăunți mici, orientați dezordonat, formată pe peretele 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 peretele 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, echiace și dezordonate în centrul lingoului numită zonă echiacă. 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.

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.

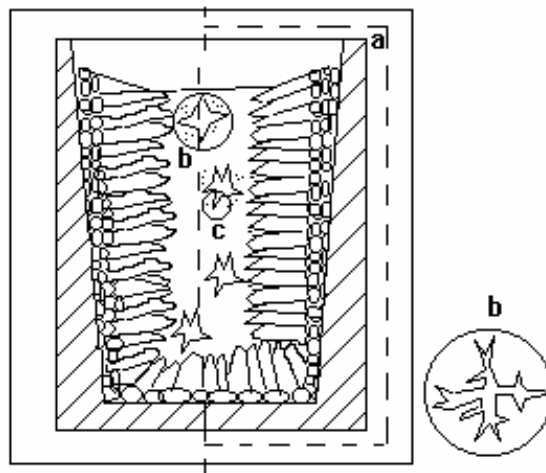


Fig.1. Prezentarea schematică a unui lingou în curs de solidificare [45]:
a - zona exterioară; b - zona cristalelor columnare; c - zona centrală.

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.

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.

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.

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 [12]:

- 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 segregărilor 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 și gazele 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] 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.

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 multor 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.2).

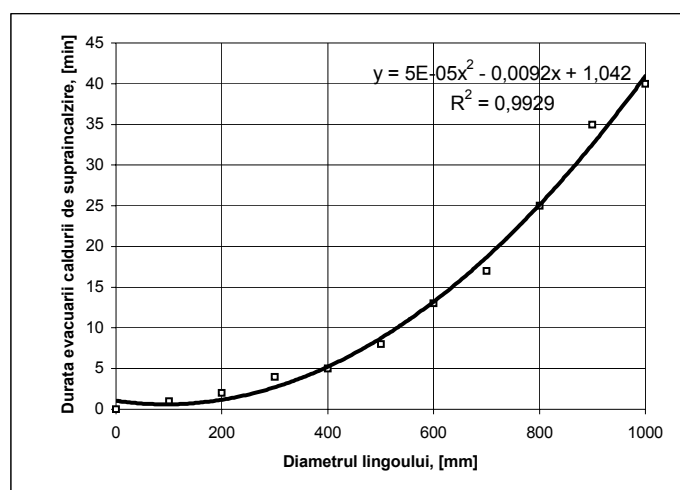


Fig.2. Variația duratei de eliminare a căldurii de supraîncălzire în funcție de mărimea lingoului [13].

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

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

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).

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 dispăre. Acest fapt se poate realiza fiind caracterizat de următoarea relație [14]:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}} \geq m \frac{C_o}{D} \left(\frac{1 - K_o}{K_o} \right) \quad (2)$$

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 unghiului 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 [14]:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}} = m \frac{C_o}{D} \left(\frac{1 - K_o}{K_o} \right) \quad (3)$$

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 [14]:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}^2} \leq \frac{A \cdot C_o}{K_o} \quad (4)$$

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.3. 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 segregarea 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 segregare 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.

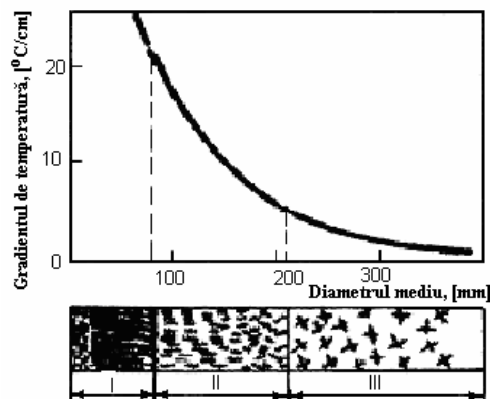


Fig.3. Modificarea structurii cristaline în funcție de intensitatea răcirii [15]:

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 [16]. 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:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}} \leq m \frac{C_o}{D} \left(\frac{1 - K_o}{K_o} \right) \quad (5)$$

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 [14]:

$$\frac{\Delta T}{v_{cr}} < m \frac{C_o(1 - K_o)}{DK_o} - \frac{\Delta T}{v_{cr} \delta} \quad (6)$$

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 [16].

$$d \approx \frac{D}{2 \cdot \pi \cdot R} \left\{ 1 + \left[1 + \frac{16 \cdot \pi^2 \cdot v_{cr}}{D} \left(\frac{0,6 \cdot \sigma}{\Delta S \Delta T_o} \right)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (7)$$

unde: σ este tensiunea interfațială;

ΔS – entropia de topire;

ΔT_o – gradientul de temperatură în partea superioară a cristalului.

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.4). 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 grăunțurilor 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.

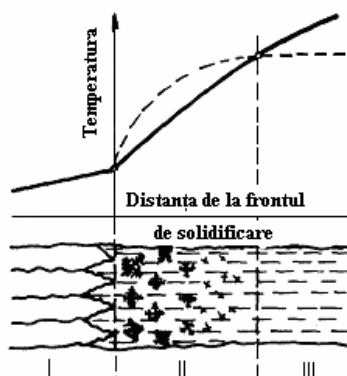


Fig.4. Schema formării zonei bifazice [15]:
I – zona cristalelor columnare; II – zona bifazică; III – topitură lichidă.

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 [12] 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 $\Delta T = (0,01 - 0,11) \cdot T_{top}$;

II – microrăcitorii se topesc, însă microgrupările atomilor se mențin până la începutul cristalizării oțelului caz în care ei joacă rolul și de germeni exogeni;

III – microrăcitorii se topesc până la sfârșitul solidificării oțelului, aceștia acumulează și căldura latentă de cristalizare, determină cristalizarea și solidificarea în volum a oțelului respectiv schimbă direcția fluxului de căldură, în sensul că fluxul exterior nu coincide 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 microvolume cu densități și vâscozități diferite, care influențează substanțial curenții de convecție (la solidificarea de tip I aceștia dispar repede, la solidificarea de tip II și III se mențin).

În prezența microrăcitorilor netopiți, solidificarea oțelului suferă schimbări radicale: capătă un caracter volumic succesiv, frontal, de solidificare, fiind fragmentat și multiplicat la nivelul numărului granulelor inoculate, astfel suprafața de răcire crește foarte mult, de asemenea segregarea 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 [13], 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.

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:

$$V = V_0 \left(1 - e^{-\frac{\pi}{3} \cdot n \cdot v^3 \cdot t^4} \right) \quad (8)$$

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.

Microrăcitorii se utilizează și pentru armarea lingourilor și pieselor [12]. În acest caz se realizează un proces de solidificare de tip IV, când microrăcitorii nu se topesc sau se topesc numai parțial. În acest caz particulele sunt denumite și macrorăcitori, cantitatea acestora din urmă ajungând până la 50% din masa lingoului rezultând nu piese monolit, ci piese armate (compozite). Pentru aceste scopuri pot fi folosite, în calitate de macrorăcitori particule cu dimensiuni mari, de exemplu bile de rulmenți cu diametrul cuprins între 5 - 60mm, în funcție de masa lingoului, alice, bucăți de sârmă, etc.

2. Cercetări experimentale cu privire la dirijarea solidificării lingourilor de oțel carbon

Experimentările au avut scopul de a îmbunătăți structura de turnare a lingourilor de oțel carbon, și au fost orientate pe ideea dirijării structurii cristaline, 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 structurii lingourilor din oțel carbon în fază de laborator s-au efectuat în Hala tehnologică a Facultății de Inginerie Hunedoara iar experimentările în fază industrială s-au desfășurat pe platforma industrială la S.C.Siderurgica S.A. Hunedoara.

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. 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, partea superioară a lingourilor a fost acoperită cu praf antiretasură.

După răcire și dezbateri 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/mm²], limita de curgere $R_{p0.2}$ [N/mm²], alungirea procentuală după rupere A_5 [%] și coeficientul de gătuire Z [%].

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.5 se prezintă microstructura probei pentru lingoul turnat cu microrăcitori și a celui turnat clasic.

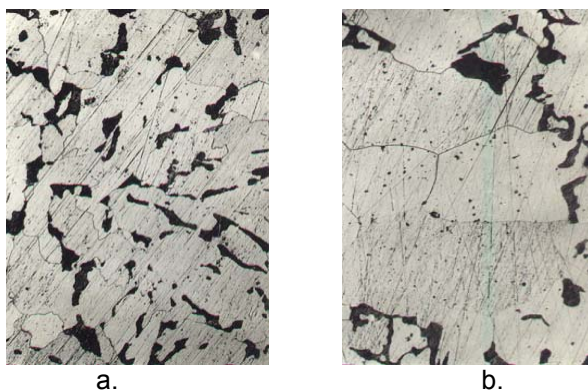


Fig.5. Microstructura probei, atac Nital 2%, x500:
a – cu microrăcitori; b – fără microrăcitori.

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.

Datele obținute în urma experimentărilor în fază de laborator au fost prelucrate cu ajutorul programului de calcul EXCEL. În urma analizei rezultatelor experimentale obținute în fază de laborator

și a diagramelor prezentate rezultă: o creștere semnificativă a caracteristicilor mecanice, finisarea grăuntelui cristalin și o reducere a dispersiei valorilor caracteristicilor mecanice.

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.

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.

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.6. 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.

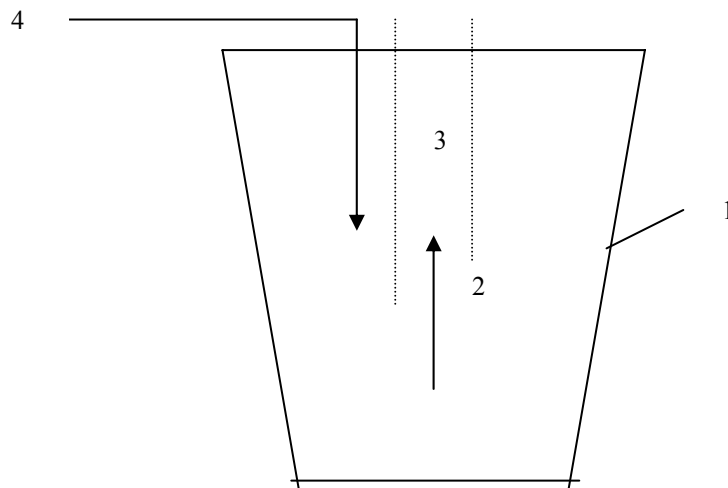


Fig.6 Schema modului de adăugare a microrăcitorilor în lingotieră în timpul umplerii cu oțel:

1 – lingotieră; 2 – oțel lichid; 3 – microrăcitori; 4 – gaz inert.

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. 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 - [%].

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 segregare și aspectul general al secțiunii. Rezultatele analizei macro sunt prezentate în tab.1.

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 redată în fig 7.

Tab.1 Punctajele acordate probelor experimentale.

	Nr. probă	Porozitate centrală	Porozitate generală	Pătrat segregare	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 în timp ce la lingourile turnate clasic 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. 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.

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.

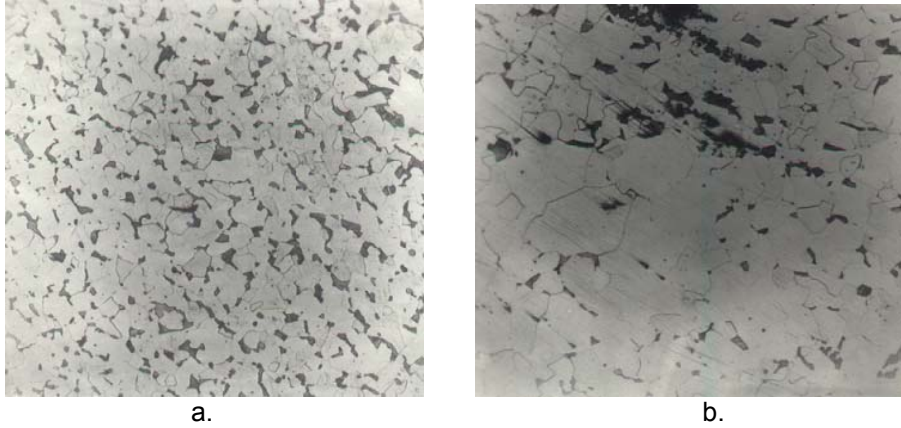


Fig.7. Microstructură obținută din probe, atac Nital 2%, x100:
a – cu microrăcitori; b – fără microrăcitori.

Deformarea plastică s-a realizat în cadrul secției de forjă a S.C. “Siderurgica” S.A. Hunedoara. După tăierea capetelor s-a observat o creștere a scoaterii de metal bun în favoarea lingourilor la care s-a făcut adaos de 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.

3. Modelarea matematică a factorilor de influență asupra calității oțelurilor

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.

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.

După efectuarea calculelor se obține următoarea relație pentru temperatura oțelului:

$$T = \frac{1000 \cdot c \cdot T_t + (m \cdot c - m \cdot c_{mr}) T_l - m \cdot L}{m \cdot c + 1000 \cdot c} \quad (9)$$

- unde: c – căldura specifică a oțelului, în $J/kg \cdot ^\circ C$;
 T_t – temperatura de turnare a oțelului, în $^\circ C$;
 T_l – temperatura lichidus, în $^\circ C$;
 L – căldura latentă de topire a microrăcitorilor, în J/kg
 m – consumul specific de microrăcitori, în kg/t .

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 (9) se simplifică cu căldura specifică a oțelului (c) se obține relația:

$$T = \frac{1000 \cdot T_t + \left(1 - \frac{c_{mr}}{c}\right) \cdot m \cdot T_l - m \frac{L}{c}}{m + 1000} \quad (10)$$

Dacă se utilizează următoarele valori pentru proprietățile termofizice ale oțelurilor carbon: $c = 690 J/kg^\circ C$, $c_{mr} = 836 J/kg^\circ C$, $L = 267776 J/kg$ și $T_l = 1500^\circ C$ și se înlocuiesc în relația (10), se obține relația pentru temperatura oțelului după terminarea topirii microrăcitorilor:

$$T = \frac{1000 \cdot T_t - 705 \cdot m}{m + 1000} \quad (11)$$

- unde: T_t este temperatura de turnare a oțelului, în $^\circ C$;
 m – consumul specific de microrăcitori, în kg/t .

Cu ajutorul relației (11) s-a trasat nomograma din fig.8 care redă temperatura oțelului carbon după introducerea microrăcitorilor.

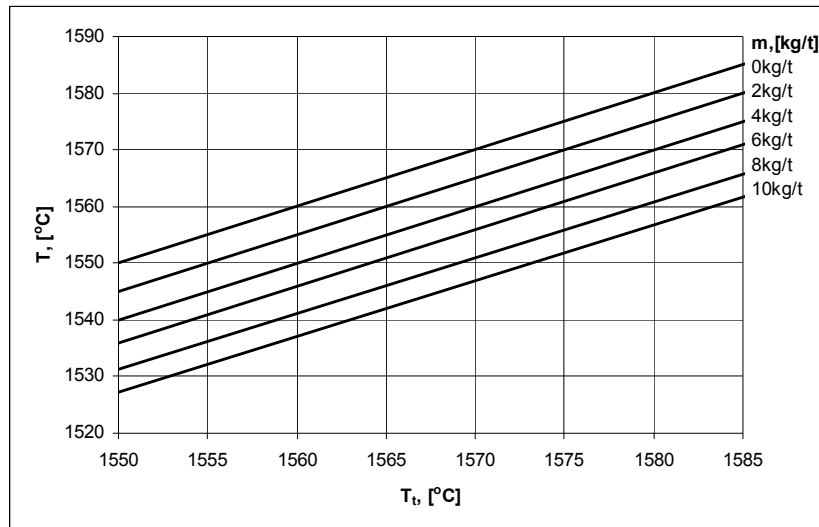


Fig.8. Nomogramă pentru determinarea temperaturii oțelului după introducerea microrăcitorilor.

De exemplu, dacă temperatura de turnare a oțelului este de 1575°C și introducând 2kg/t microrăcitori, temperatura oțelului va scădea la 1570°C respectiv dacă introducem 8kg/t temperatura oțelului va scădea la 1555°C. De asemenea, din calcule rezultă că la introducerea cantității de 1kg/t microrăcitori temperatura oțelului scade cu circa 3°C.

Folosind relația (11) 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:

$$m = \frac{1000 \cdot (T_l - T)}{T + 705} \quad (12)$$

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 $T_o = 20^\circ\text{C}$ și topirea lui, astfel încât, în final, microrăcitorul să fie complet topit, cu temperatura $T_l = 1520^\circ\text{C}$.

Ecuatia de bilanț [72]:

$$Q = M_{mr} \cdot c_{mr} \cdot (T_l - T_o) + M_{mr} \cdot \lambda = \rho \frac{4\pi r^3}{3} [c_{mr} (T_l - T_o) + \lambda], \text{ [J]} \quad (13)$$

unde: T_l - temperatura lichidus a oțelului, $^\circ\text{C}$;
 T_o - temperatura microrăcitorilor, în $^\circ\text{C}$;
 c_{mr} - căldura specifică a microrăcitorilor, în $\text{J/kg}^\circ\text{C}$;
 M_{mr} - masa de microrăcitorilor, în kg;
 r - raza microrăcitorilor, în m;
 λ - conductivitatea aliajului lichid, în $\text{W/m}^\circ\text{C}$;

ρ - densitatea microrăcitorilor, în kg/m³.

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

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_t , iar la distanța R de centru, temperatura T_l .

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 $T = T_t$;

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

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

Se obține că: $T_t - T_l = a(R - r)$ de unde rezultă $a = \frac{T_t - T_l}{R - r}$ respectiv,

$$\frac{T_l - b}{T_t - b} = \frac{r}{R} \quad (14)$$

$$R \cdot T_l - R \cdot b = r \cdot T_t - r \cdot b \Rightarrow R \cdot T_l - r \cdot T_t = (R - r)b$$

$$b = \frac{R \cdot T_l - r \cdot T_t}{R - r} \quad (15)$$

$$T = \frac{T_t - T_l}{R - r} x + \frac{R \cdot T_l - r \cdot T_t}{R - r}$$

$$dQ = dm \cdot c_{mr} \cdot \Delta T = \rho \cdot 4 \cdot \pi \cdot x^2 \cdot c_{mr} (T_t - T) dx - \rho \cdot 4 \cdot \pi \cdot c_{mr} \cdot x^2 (T_t - a \cdot x - b) dx =$$

$$= 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} (T_t - b) x^2 dx - 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} \cdot a \cdot x^3 dx \quad (16)$$

Prin integrare rezultă:

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} \left[(T_t - b) \int_r^R x^2 dx - a \int_r^R x^3 dx \right] =$$

$$= 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} \left[\frac{(T_t - b)(R^3 - r^3)}{3} - a \frac{R^4 - r^4}{4} \right] \quad (17)$$

$$\text{Dar } T_t - b = T_t - \frac{R \cdot T_l - r \cdot T_t}{R - r} = \frac{R \cdot T_t - r \cdot T_t - R \cdot T_l + r \cdot T_t}{R - r} = R \frac{T_t - T_l}{R - r} \quad (18)$$

Astfel, se obține:

$$Q = 4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot c_{mr} \left[\frac{(T_t - T_l)(R^3 + R^2 \cdot r + R \cdot r^2)}{3} - \frac{(T_t - T_l)(R^3 + R^2 \cdot r + R \cdot r^2 + r^3)}{4} \right] =$$

$$= \frac{\pi \cdot \rho \cdot c_{mr}}{3} (T_t - T_l) (R^3 + R^2 \cdot r + R \cdot r^2 - 3 \cdot r^3) \quad (19)$$

Egalând relațiile (13) și (19) rezultă:

$$c(T_l - T_o) + \lambda = c_{mr} (T_t - T_t) (R^3 + R^2 \cdot r + R \cdot r^2 - 3 \cdot r^3) \quad (20)$$

Dacă notăm $\frac{R}{r} = y$, se obține:

$$y^3 + y^2 + y = \frac{4[c_{mr}(T_l - T_o) + \lambda]}{c_{mr}(T_t - T_o)} - 3 \quad (21)$$

Pentru $T_t = 1580^\circ\text{C}$, $T_l = 1520^\circ\text{C}$, $c_{mr} = 465 \text{ J/kg} \cdot \text{grad}$, $T_o = 20^\circ\text{C}$

Rezultă: $\frac{R}{r} = y = 4,81$

Raportul dintre masa zonei de unde microrăcitorul preia căldura și masa microrăcitorului va fi:

$$\frac{M}{M_{mr}} = \frac{R^3 - r^3}{r^3} = \left(\frac{R}{r}\right)^3 - 1 = y^3 - 1 \quad (22)$$

Se calculează raportul razelor și procentul din volumul afectat de răcire, cu formula:

$$\frac{M_{mr}(y^3 - 1)}{M} \cdot 100 \quad (23)$$

În urma prelucrării 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.9 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 propriu SIDHD 4.

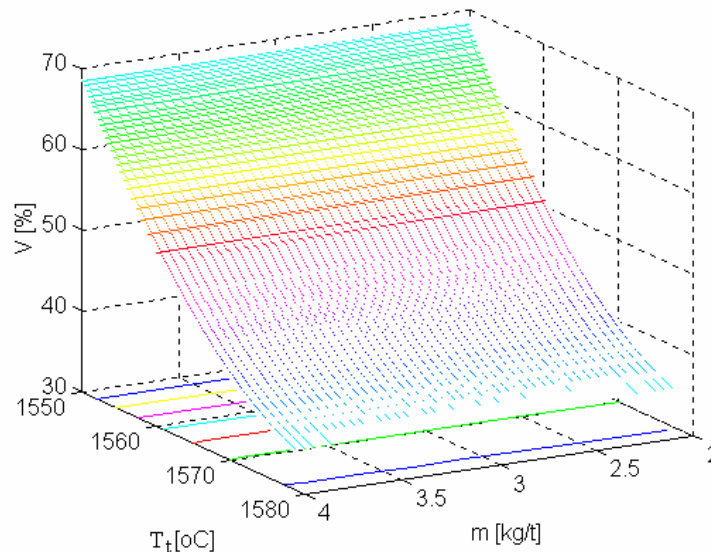


Fig.9. Suprafața de regresie pentru procentul de volum afectat de răcire în cazul turnării oțelului cu microrăcitori.

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 (fig.10).

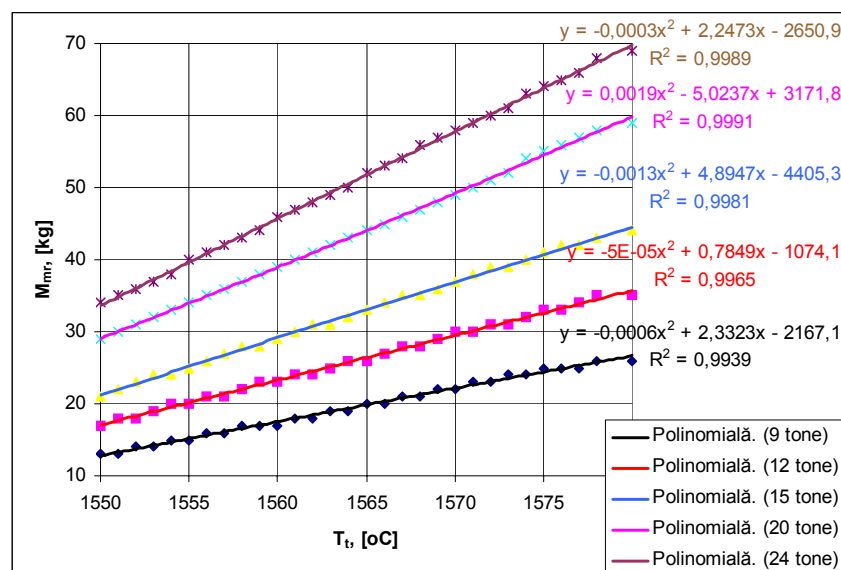


Fig.10. Dependența masei microrăcitorilor de temperatura de turnare pentru lingouri de oțel cu masa 9 – 24t.

În ce privește modelarea matematică a factorilor tehnologici cu influență asupra proprietăților mecanice la oțelurile carbon am întocmit 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:

$$u = c_1 x^2 + c_2 y^2 + c_3 z^2 + c_4 xy + c_5 yz + c_6 xz + c_7 x + c_8 y + c_9 z + c_{10} \quad (24)$$

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, 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 parametri independenți: dimensiunile microrăcitorilor (d , [mm]), cantitatea de microrăcitori (m , [kg/t]) și temperatura de turnare (t , [°C]).

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:

$$R_{p0,2} = -3,997 \cdot m^2 + 0,9814 \cdot d^2 + 0,0001533 \cdot t^2 - 0,4112 \cdot m \cdot d - 0,005089 \cdot d \cdot t + 0,02484 \cdot t \cdot m - 0,002547 \cdot m + 0,006111 \cdot d - 0,00003174 \cdot t + 0,00003806; \quad R^2 = 0,9726 \quad (25)$$

Ecuațiile suprafețelor de regresie:

$$R_{p0,2} = 0,9814 \cdot d^2 + 0,0001533 \cdot t^2 - 0,005089 \cdot d \cdot t - 0,7821 \cdot d + 0,04757 \cdot t - 14,69 \quad (26)$$

$$R_{p0,2} = -3,997 \cdot m^2 + 0,0001533 \cdot t^2 + 0,02484 \cdot t \cdot m - 1,647 \cdot m - 0,02039 \cdot t + 15,73 \quad (27)$$

$$R_{p0,2} = -3,997 \cdot m^2 + 0,9814 \cdot d^2 - 0,4112 \cdot m \cdot d + 38,87 \cdot m - 7,958 \cdot d + 375,5; \quad (28)$$

Ecuația hipersuprafeței de regresie pentru rezistența la rupere (R_m) este:

$$R_m = -3,745 \cdot m^2 + 0,03494 \cdot d^2 + 0,0002385 \cdot t^2 - 0,7767 \cdot m \cdot d - 0,004689 \cdot d \cdot t + 0,02739 \cdot t \cdot m - 0,004822 \cdot m + 0,0002206 \cdot d - 0,00002927 \cdot t + 1,393 \cdot 10^{-6}; \quad R^2 = 0,9920 \quad (29)$$

Ecuațiile suprafețelor de regresie:

$$R_m = 0,03494 \cdot d^2 + 0,0002385 \cdot t^2 + 0,004689 \cdot d \cdot t - 1,488 \cdot d + 0,05252 \cdot t - 13,77 \quad (30)$$

$$R_m = -3,745 \cdot m^2 + 0,0002385 \cdot t^2 + 0,02739 \cdot t \cdot m - 3,112 \cdot m + 0,01878 \cdot t + 0,5599 \quad (31)$$

$$R_m = -3,745 \cdot m^2 + 0,03494 \cdot d^2 - 0,7767 \cdot m \cdot d + 42,86 \cdot m + 7,338 \cdot d + 584 \quad (32)$$

Ecuația hipersuprafeței de regresie pentru limita de curgere aparentă (A_5) este:

$$A_5 = -0,5567 \cdot m^2 + 0,06035 \cdot d^2 + 9,121 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 - 0,5331 \cdot m \cdot d - 0,0001736 \cdot d \cdot t + 0,004736 \cdot t \cdot m - 0,003318 \cdot m + 0,0003761 \cdot d - 1,069 \cdot 10^{-6} \cdot t + 2,344 \cdot 10^{-6} \quad R^2 = 0,9812 \quad (33)$$

Ecuațiile suprafețelor de regresie:

$$A_5 = 0,06035 \cdot d^2 + 9,121 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,0001736 \cdot d \cdot t - 1,021 \cdot d + 0,009078 \cdot t - 2,051 \quad (34)$$

$$A_5 = -0,5567 \cdot m^2 + 9,121 \cdot 10^{-6} \cdot t^2 + 0,004736 \cdot t \cdot m - 2,136 \cdot m + 0,0006956 \cdot t + 0,9671 \quad (35)$$

$$A_5 = -0,5567 \cdot m^2 + 0,06035 \cdot d^2 - 0,5331 \cdot m \cdot d + 7,408 \cdot m + 0,2721 \cdot d + 22,34 \quad (36)$$

Ecuația hipersuprafeței de regresie pentru Z este:

$$Z = -0,548 \cdot m^2 - 0,03047 \cdot d^2 + 0,00002312 \cdot t^2 - 0,02422 \cdot m \cdot d - 0,00004905 \cdot d \cdot t + 0,00344 \cdot t \cdot m - 0,0001488 \cdot m - 0,0001898 \cdot d - 7,688 \cdot 10^{-8} \cdot t - 1,183 \cdot 10^{-6}; \quad R^2 = 0,9974 \quad (37)$$

Ecuațiile suprafețelor de regresie:

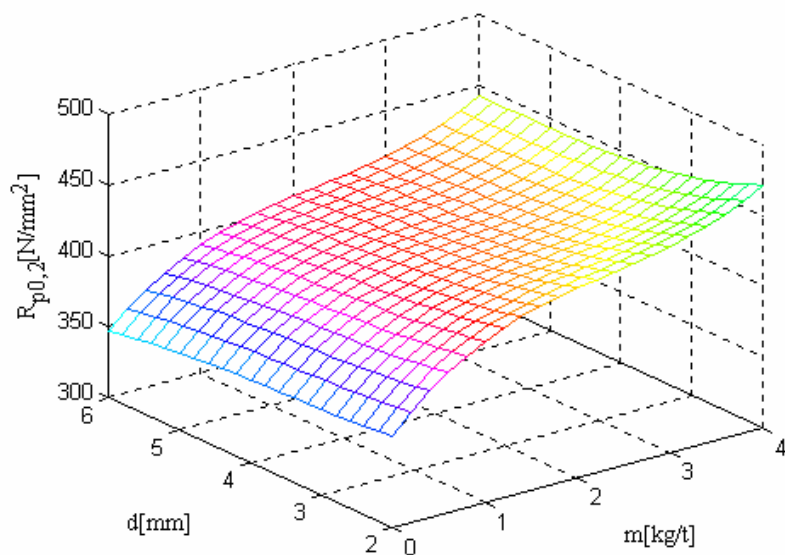
$$Z = 0,03047 \cdot d^2 + 0,00002312 \cdot t^2 - 0,00004905 \cdot d \cdot t - 0,0559 \cdot d + 0,007912 \cdot t - 2,899 \quad (38)$$

$$Z = -0,548 \cdot m^2 + 0,00002312 \cdot t^2 + 0,00344 \cdot t \cdot m - 0,09704 \cdot m + 0,0001637 \cdot t - 0,4883 \quad (39)$$

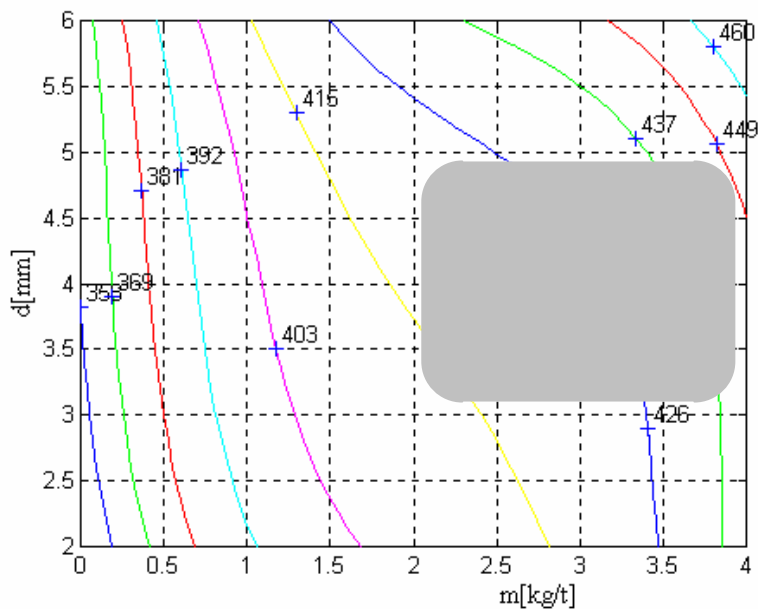
$$Z = -0,548 \cdot m^2 - 0,03047 \cdot d^2 - 0,02422 \cdot m \cdot d + 5,383 \cdot m + 0,0639 \cdot d + 56,62 \quad (40)$$

Pentru exemplificare se prezintă în continuare ecuațiile de corelație multiplă de gradul trei și suprafețele de regresie corespunzătoare (fig.11, fig.12, fig.13, fig.14):

$$R_{p0,2} = 3,578 \cdot m^3 + 0,231 \cdot d^3 + 0,908 \cdot m^2d - 0,541 \cdot md^2 - 25,903 \cdot m^2 - 8,868 \cdot d^2 + 5,806 \cdot md + 85,360 \cdot m - 22,75 \cdot d + 391,137 \quad (41)$$



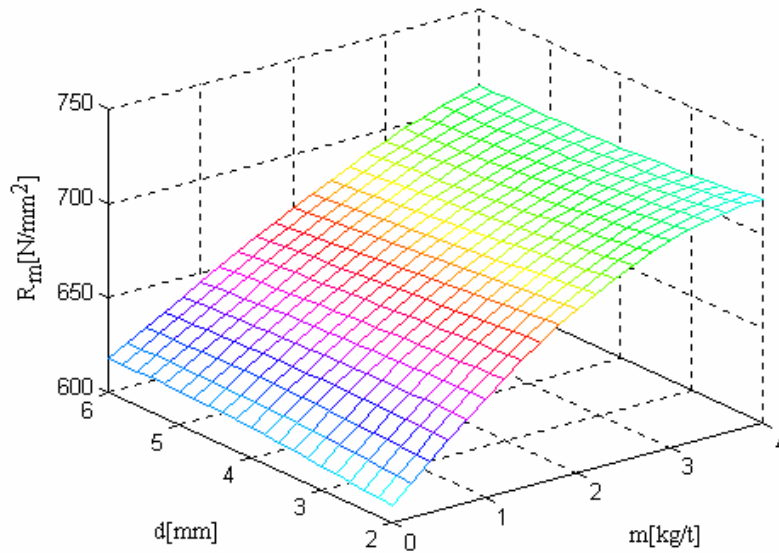
a.



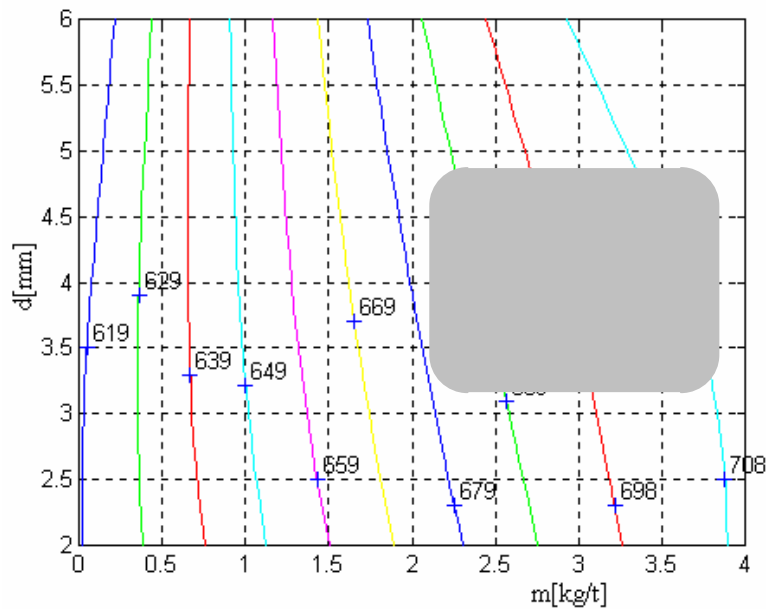
b.

Fig. 11. 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.

$$R_m = -0,407 \cdot m^3 + 0,998 \cdot d^3 + 0,336 \cdot m^2 d - 0,055 \cdot m d^2 - 5,351 \cdot m^2 - 7,8 \cdot d^2 + 0,033 \cdot m d + 61,6 \cdot m + 4,97 \cdot d + 599,10 \quad (42)$$



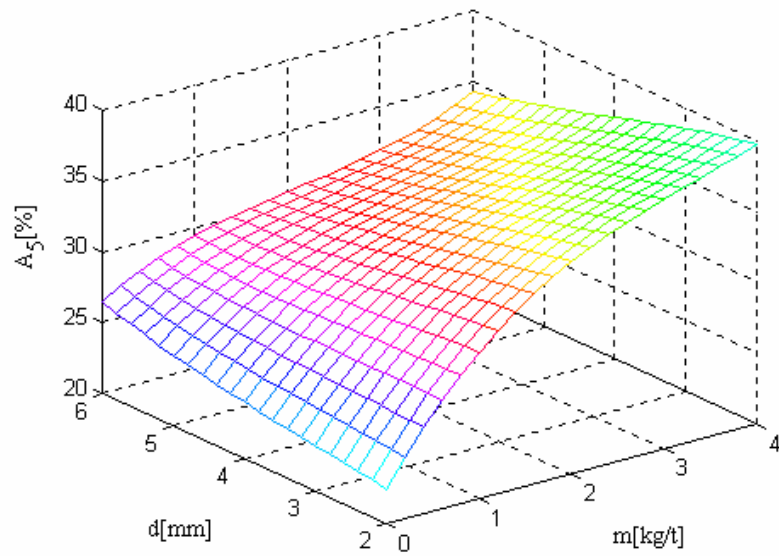
a.



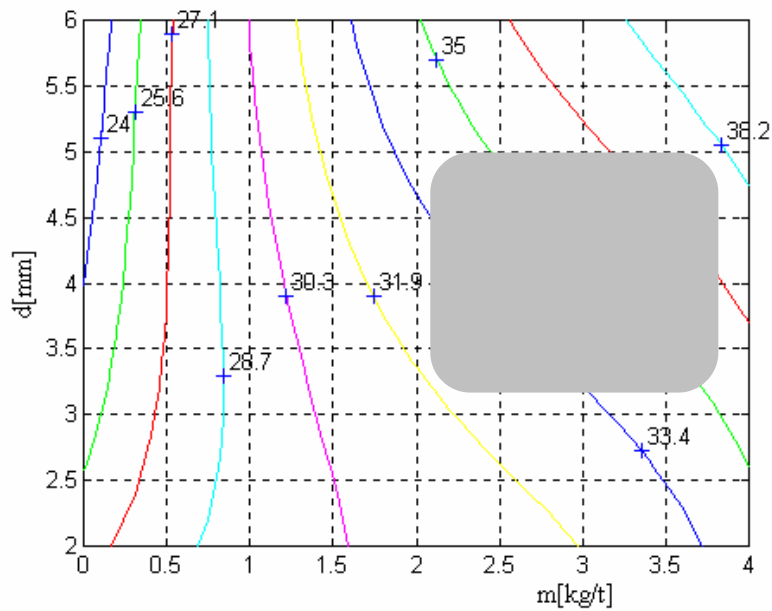
b.

Fig. 12. Suprafața de regresie R_m (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului de microrăcitori și diametrul acestora.

$$A_5 = 0,230 \cdot m^3 + 0,220 \cdot d^3 - 0,032 \cdot m^2d + 0,041 \cdot md^2 - 2,789 \cdot m^2 - 1,22 \cdot d^2 - 0,379 \cdot md + 12,650 \cdot m + 1,88 \cdot d + 19,828 \quad (43)$$



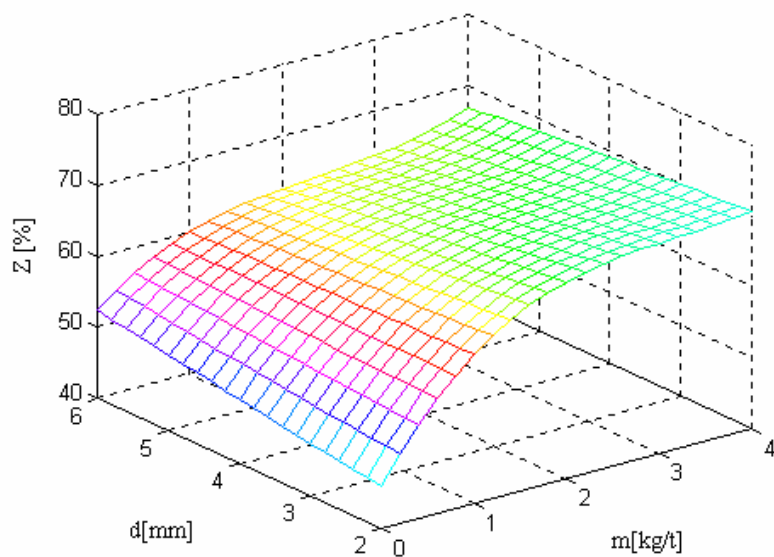
a.



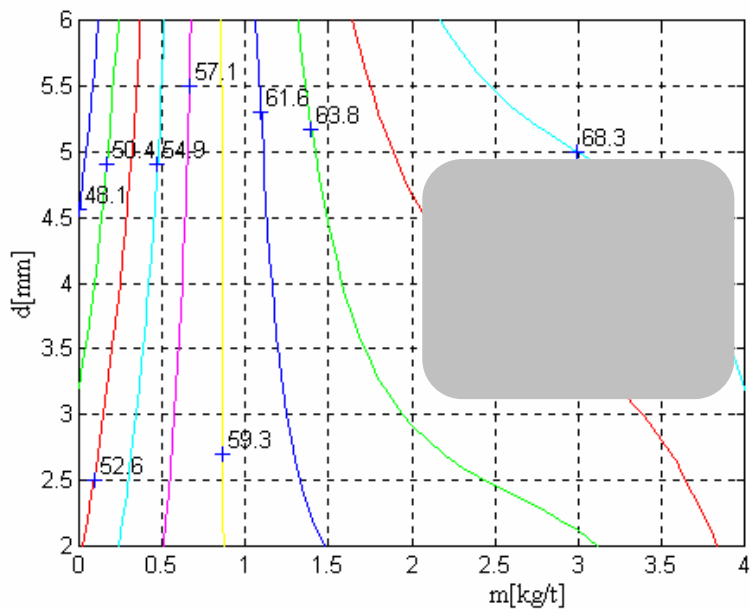
b.

Fig. 13 Suprafața de regresie A_5 (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului de microrăcitori și diametrul acestora.

$$Z = 0,602 \cdot m^3 + 0,415 \cdot d^3 - 0,029 \cdot m^2d - 0,013 \cdot md^2 - 6,822 \cdot m^2 - 2,06 \cdot d^2 + 0,0198 \cdot md + 24,720 \cdot m + 0,757 \cdot d + 43,709 \quad (44)$$



a.



b.

Fig.14 Suprafața de regresie Z (a) și liniile de nivel (b) a domeniilor tehnologice pentru diferite intervale ale consumului de microrăcitori și diametrul acestora.

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).

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;

Analizând diagramele prezentate în ce privește stabilirea domeniilor optime de variație pentru parametri 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 consumul specific de microrăcitori utilizați pentru dirijarea solidificării sunt cuprinse între 2 – 4kg/t;
- domeniile optime de variație pentru diametrul microrăcitorilor utilizați sunt cuprinse între 3 – 5mm.

PARTEA II

CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA STRUCTURII DE TURNARE A LINGOURILOR DIN OȚEL ALIAT

4. Îmbunătățirea structurii lingourilor din oțel aliat

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.

În cazul lingourilor mari din oțel, una din cauzele care conduce la înrăutățirea calității acestora, se datorează conținutului de hidrogen. 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) [35].

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.

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 [27] obținând o serie de corelații sub formă grafică și analitică.

Ca și în cazul procedurii RH, procedurii 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 ajutoare 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.15). Se observă că se obține prin această dublă injecție cu argon un conținut scăzut de hidrogen în oțel, și anume sub 1ppm.

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

$$\text{pentru tratament și injecție cu argon,} \\ |H| = 0,0091 \cdot t^2 - 0,3527 \cdot t + 4,7235; \quad R^2 = 0,9807 \quad (45)$$

$$\text{pentru tratament și injecție dublă cu argon,} \\ |H| = 0,0096 \cdot t^2 - 0,3513 \cdot t + 3,8604; \quad R^2 = 0,9756 \quad (46)$$

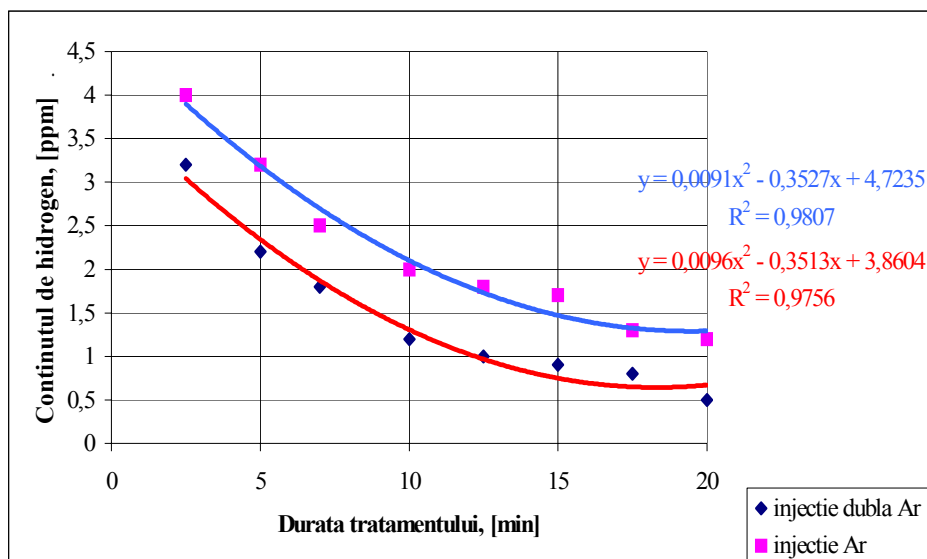


Fig.15. Efectul injecției duble cu argon asupra dehidrogenării oțelului lichid în instalația RH [9].

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 [10], s-au obținut corelații (fig.16) 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.

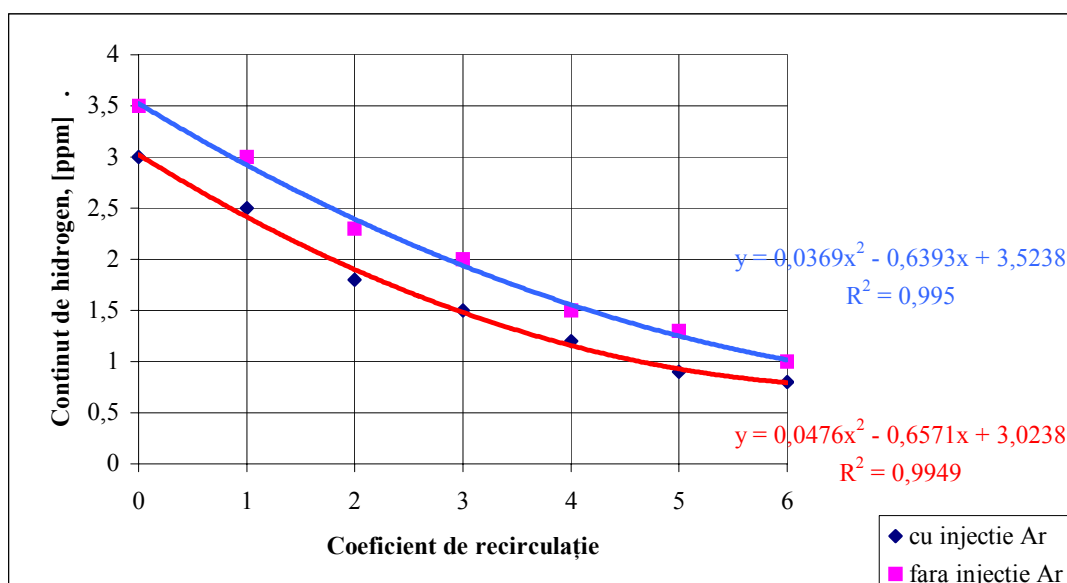


Fig.16. Variația conținutului de hidrogen în oțel în funcție de coeficientul de recirculație [10].

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:

$$[H] = 0,0369 \cdot k^2 - 0,6393 \cdot k + 3,5238; \quad R^2 = 0,995 \quad (47)$$

$$[H] = 0,0476 \cdot k^2 - 0,6571 \cdot k + 3,0238; \quad R^2 = 0,9949 \quad (48)$$

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.17).

$$\text{Ecuatiile de corelație sunt:} \\ [H] = -0,0053 \cdot t^2 + 0,0322 \cdot t + 2,5828; \quad R^2 = 0,8556 \quad (49)$$

$$[H] = -1,4001 \cdot \ln(t) + 5,5723; \quad R^2 = 0,7817 \quad (50)$$

$$[H] = 4,3639 \cdot e^{-0,0608t}; \quad R^2 = 0,8391 \quad (51)$$

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.

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 rebuturilor la prelucrarea lingourilor mari de oțel.

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.

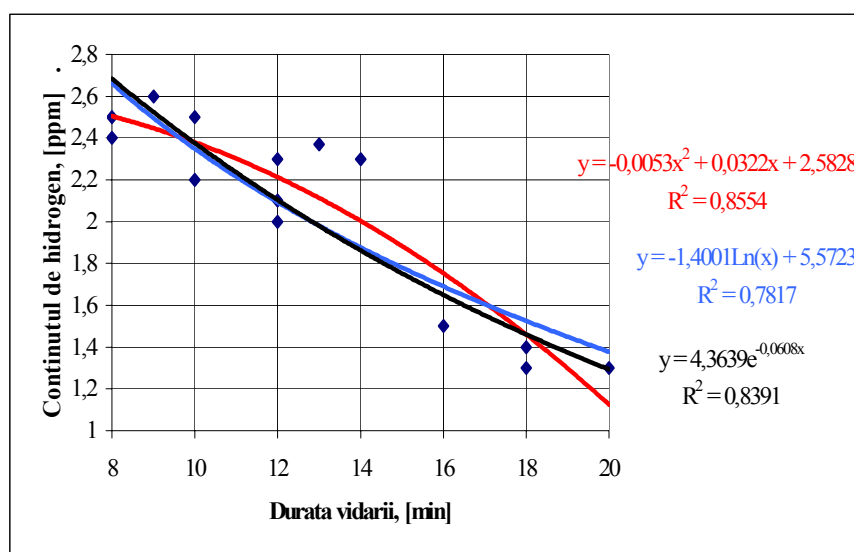


Fig.17. Variația conținutului de hidrogen în funcție de durata vidării la tratarea oțelului în instalații de vidare de tip VOD [10].

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.

La dirijarea proceselor de germinare a cristalelor în lingourile de oțel aliat 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.

Microrăcitorii introduși în oțelul lichid în timpul turnării acestuia provoacă la răcire și solidificare 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.

5. Experimentări și rezultate cu privire la îmbunătățirea structurii de turnare a lingourilor din oțel aliat

Pentru a determina influența vidului asupra calității oțelului aliat s-a analizat elaborarea unui număr de 10 șarje de oțel, marca 30CrNiMo8 - conform SR EN 10183-1, oțel elaborat în cuptorul electric cu arc și tratat în vid.

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

Prin prelucrarea datelor experimentale în programul de calcul EXCEL, cu privire la influența parametrilor de elaborare, turnare și prelucrare în vid asupra conținutului de hidrogen din oțel, s-au obținut o serie de corelații sub formă grafică și analitică.

În fig.18 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. 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.19 se prezintă variația conținutului de hidrogen în funcție de durata vidării.

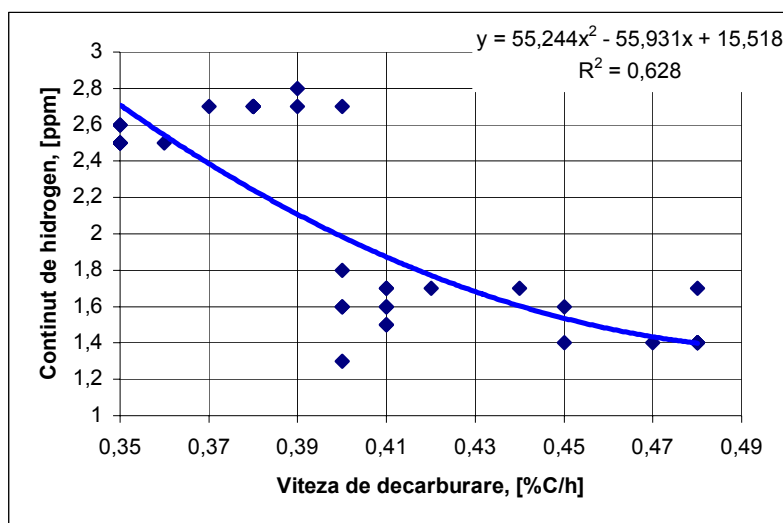


Fig.18. Variația conținutului de hidrogen în funcție de viteza de decarburare.

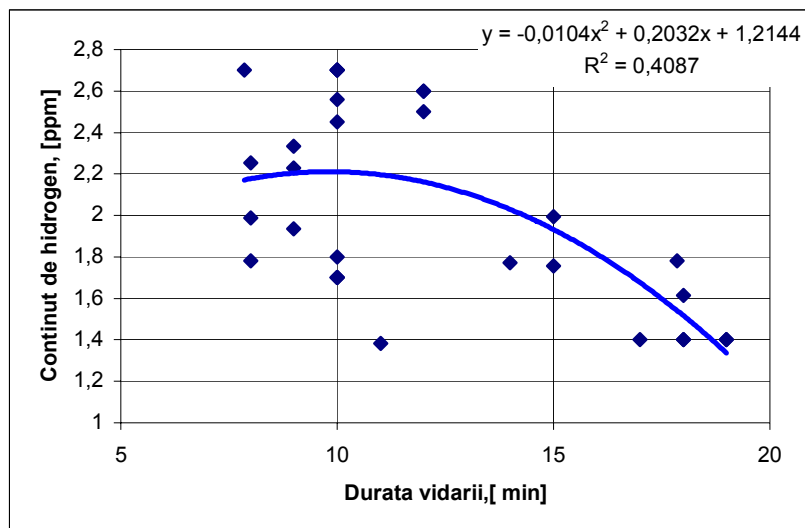


Fig.19. Variația conținutului de hidrogen în funcție de durata vidării (sub 3 torr).

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 corespunzător pentru această marcă de oțel este necesară o menținere sub vid a acestuia de 15 - 20 min.

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.

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.

Pentru atenuarea deficiențelor la solidificarea clasică, este necesară adoptarea unei metode eficiente de evacuare a căldurii din oțelul în curs de solidificare. O astfel de metodă constă în turnarea oțelului cu microrăcitori. Particulele metalice, care joacă rol de microrăcitori, trebuie să îndeplinească o serie de condiții: puritate ridicată în ceea ce privește conținutul de incluziuni oxidice, să nu aibă suprafața oxidată, să aibă o anumită compoziție granulometrică, umiditatea nu trebuie să fie mai mare de 0,25%, formă sferică sau apropiată, densitate mare în vrac și cost relativ mic, comparativ cu cel al oțelului.

Pentru studiul îmbunătățirii structurii de turnare a lingourilor de oțel aliat (23,5t, având în vedere utilajele din dotarea SC Siderurgica SA Hunedoara), în cadrul experimentărilor efectuate s-a adoptat metoda introducerii în lingotieră, în același timp cu turnarea oțelului, a microrăcitorilor sub formă de granule.

Experimentările industriale efectuate au constat din următoarele etape:

- elaborarea oțelului în cuptorul electric cu arc;
- pregătirea microrăcitorilor pe clase granulometrice;
- pregătirea ansamblurilor de turnare (poduri, lingotiere, maselotiere, etc.);
- turnarea oțelului în lingotiere și administrarea de microrăcitori;
- încălzirea lingourilor în vederea deformării plastice;
- deformarea plastică propriu-zisă a lingourilor;
- prelevarea și pregătirea probelor necesare analizelor;
- determinarea valorilor pentru caracteristicile mecanice ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 și Z);
- studiul metalografic;
- alegerea metodei de analiză matematică a datelor obținute, concluzii.

Experimentările industriale s-au efectuat pe lingouri de oțel marca 30CrNiMo8, elaborat în cuptoare electrice cu arc și destinate forjării, cu masa de 23,5t. Au fost turnate 10 lingouri, iar în paralel cu variantele experimentale s-au analizat și lingouri turnate prin metoda clasică. După terminarea turnării, lingourile experimentale au urmat fluxul tehnologic de încălzire și deformare plastică din cadrul societății Siderurgica Hunedoara. În calitate de microrăcitori s-au folosit granule obținute prin tăiere din sârmă de oțel, marca S 235, cu diametru de 2-6 mm și lungimi de 3-5mm, în cantități specifice de 2-4kg/t. Introducerea granulelor în lingotiere s-a realizat la procente de umplere a acestora de 30%, 60% și 90%. Stabilirea acestor nivele s-a făcut în urma unor încercări prealabile și

având pentru documentare cercetările efectuate pe plan local precum și lucrările publicate în literatura de specialitate.

S-au prelevat probe pentru determinarea valorilor caracteristicilor mecanice (rezistența la rupere la tracțiune - R_m - [N/mm²], limita de curgere - $R_{p0,2}$ - [N/mm²], alungirea procentuală după rupere - A_5 - [%] și coeficientul de gătuire - Z - [%]) respectiv pentru studiul microscopic al structurii oțelului atât la lingourile turnate cu microrăcitori cât și la cele turnate după metoda clasică.

Analiza probelor pentru studiul microscopic a scos în evidență faptul că în cazul lingourilor turnate cu microrăcitori granulația este mai fină și constituenții metalografici uniform repartizați în timp ce la lingourile turnate clasic 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.

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 capetelor s-a observat o creștere a scoaterii de metal bun în favoarea lingourilor la care s-a făcut adaos de microrăcitori, în medie 3%.

După analiza datelor referitoare la încercările mecanice acestea au fost prelucrate cu ajutorul programelor de calcul EXCEL și MATLAB. Au fost comparate datele de la semifabricatele obținute prin deformarea plastică a lingourilor obținute prin turnarea cu microrăcitori cu datele de la semifabricatele obținute de la lingourile turnate clasic din cadrul experimentelor efectuate, și care au servit drept probe de comparație.

Prin prelucrarea datelor obținute în urma experimentărilor efectuate utilizând programul propriu SIDHD 5 și programul MATLAB am obținut ecuații de corelație multiplă, între parametri 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 parametri independenți: dimensiunile microrăcitorilor (d , [mm]) și cantitatea specifică de microrăcitori (m , [kg/t]).

Pentru exemplificare se prezintă corelațiile de gradul 2 obținute atât sub formă analitică cât și grafică pentru limita de curegere aparentă ($R_{p0,2}$), rezistența la tracțiune (R_m), alungirea procentuală după rupere (A_5) și coeficientul de gătuire (Z) (fig.20, 21, 22 și 23).

Ecuația de corelație pentru limita de curgere este:

$$R_{p0,2} = 1,1571 - 0,0258 \cdot d + 0,3001 \cdot m - 0,004 \cdot d \cdot m - 0,0025 \cdot d^2 - 0,0476 \cdot m^2 \quad (52)$$

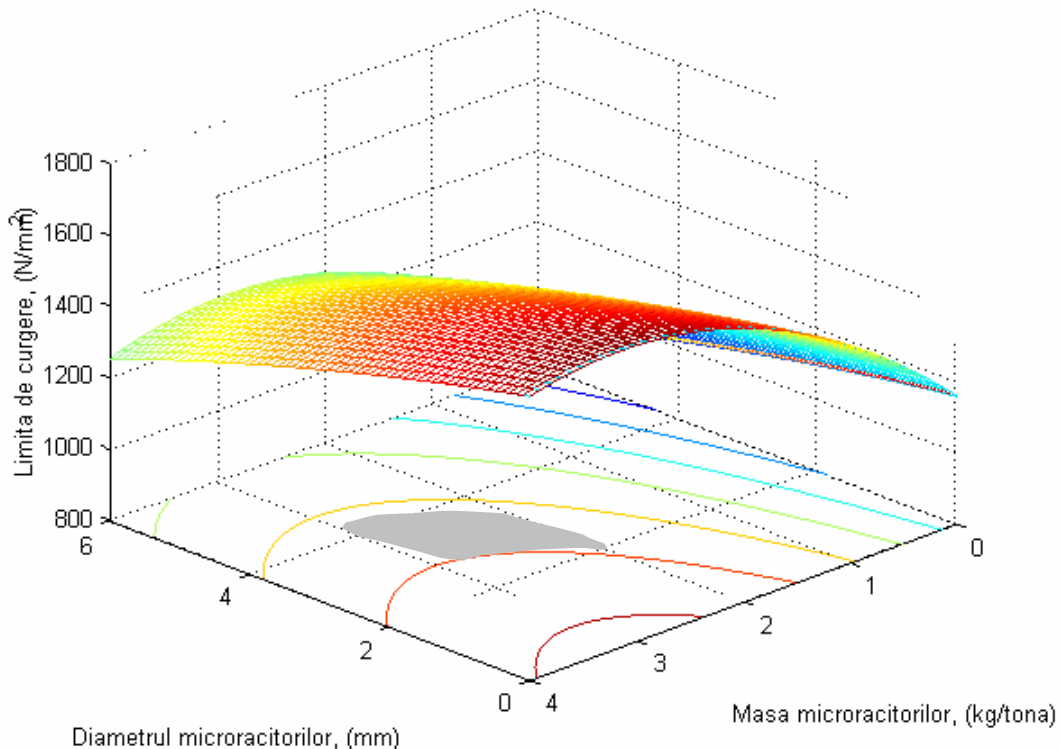


Fig.20. Suprafața de regresie $R_{p0,2}$.

Ecuția de corelație pentru rezistența la rupere este:

$$R_m = 1,2488 - 0,0818 \cdot d + 0,4155 \cdot m + 0,0037 \cdot d \cdot m + 0,0005 \cdot d^2 - 0,0724 \cdot m^2 \quad (53)$$

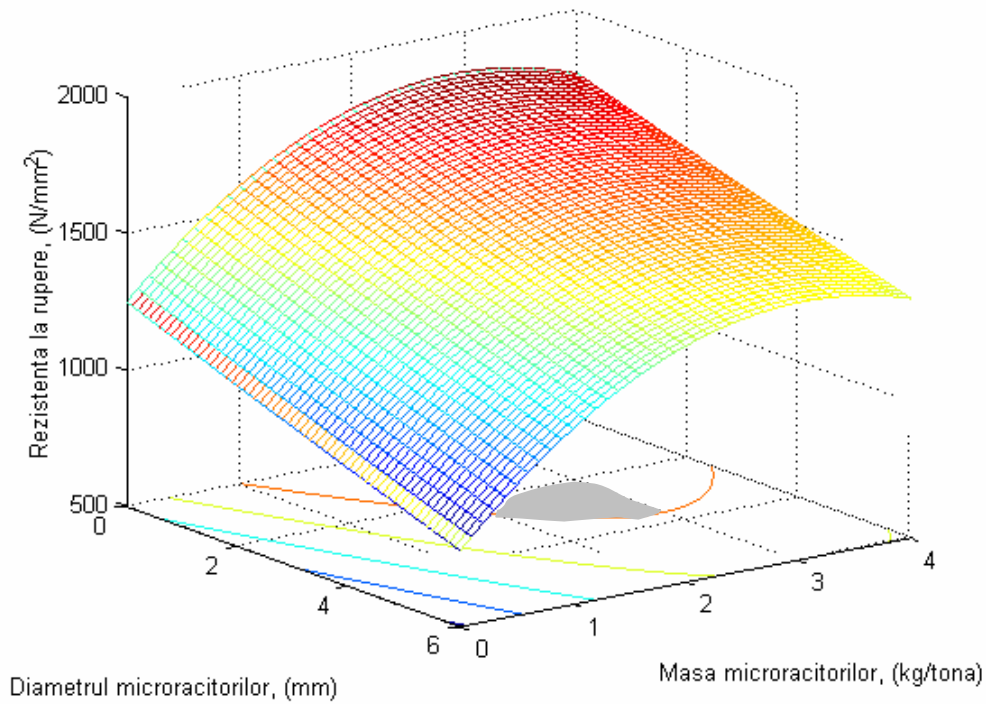


Fig.21. Suprafața de regresie R_m .

Ecuția de corelație pentru alungirea la rupere este:

$$A_5 = 12,0530 - 0,287 \cdot d + 3,4386 \cdot m - 0,1818 \cdot d \cdot m + 0,0299 \cdot d^2 - 0,4326 \cdot m^2 \quad (54)$$

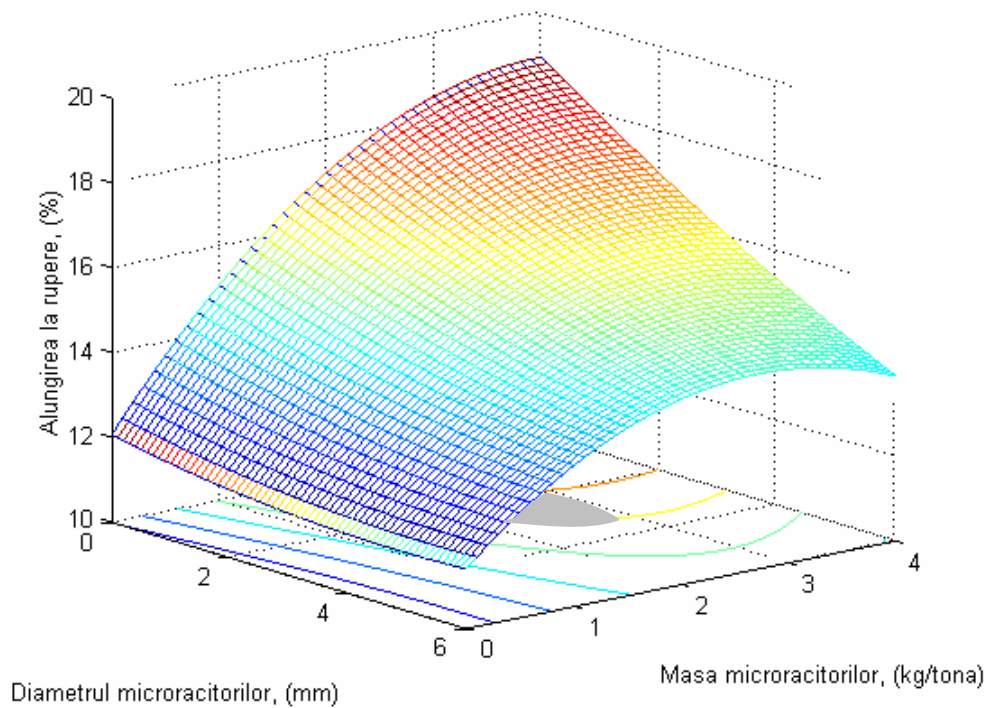


Fig. 22. Suprafața de regresie A_5 .

Ecuția de corelație pentru gătuirea la rupere este:

$$Z = 53,9432 + 2,5172 \cdot d + 6,3943 \cdot m - 0,6159 \cdot d \cdot m - 0,4096 \cdot d^2 - 0,2580 \cdot m^2 \quad (55)$$

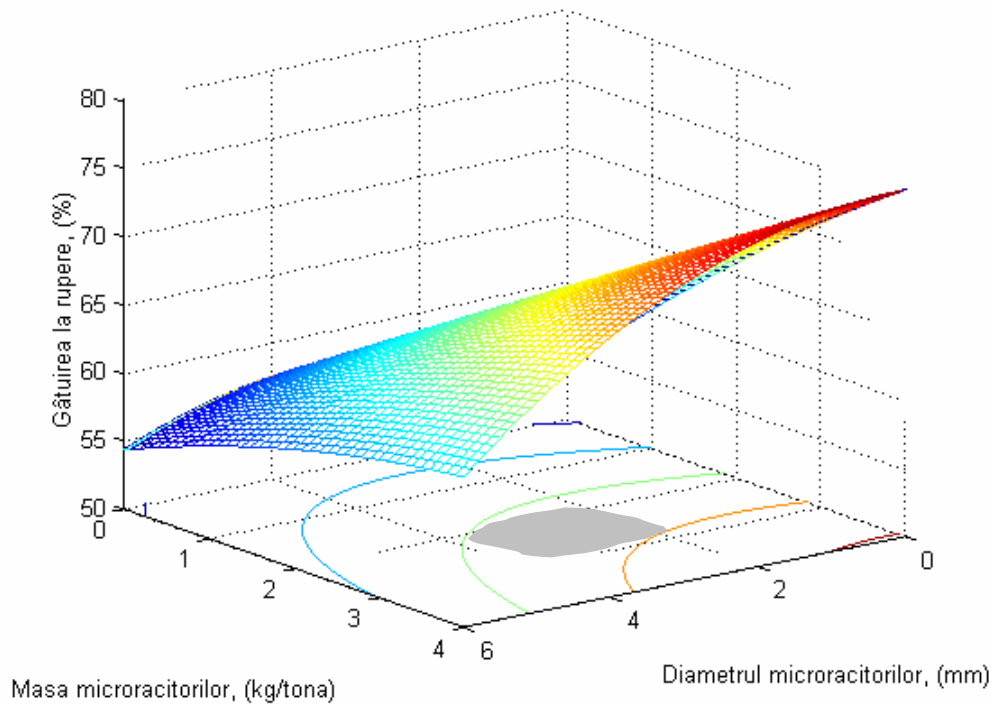


Fig.23. Suprafața de regresie Z.

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 și a dimensiunii acestora pentru rezultarea de caracteristici de rezistență respectiv de plasticitate în limitele dorite. Programul utilizat poate fi implementat cu succes în condiții industriale pentru turnarea oțelului cu microrăcitori;

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:

- tehnologic temperatura de turnare este cuprinsă între limitele 1560 – 1580°C;
- domeniul optim de variație pentru consumul specific de microrăcitori administrați este cuprins între 2 – 3kg/t;
- domeniul optim de variație pentru diametrul microrăcitorilor utilizați este cuprins între 2 – 4mm.

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.

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.

Pe baza concluziilor formulate în urma analizării cercetărilor experimentale în cadrul lucrării au fost extrapolate o parte din rezultatele modelării realizate și s-au stabilit posibilitățile de îmbunătățire a structurii lingourilor de oțel, cu influență asupra calității produselor obținute din acestea, în condiții de eficiență tehnico-economică.

5. Verificarea industrială a rezultatelor și implementarea în practică a acestora

Scopul lucrării de cercetare a fost îmbunătățirea structurii de turnare a lingourilor 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.

În cadrul metodicii de cercetare adoptate pentru elaborarea lucrării de cercetare s-au efectuat experimentări în fază industrială cu privire la turnarea lingourilor din oțel aliat cu microrăcitori obținând o îmbunătățire a structurii de turnare.

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 precisă 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.

Rezultatele și concluziile obținute în urma modelării pot fi extrapolate cu un grad înalt de veridicitate la procesele industriale.

Utilizarea ecuațiilor de corelație multiplă obținute, între parametri dependenți (caracteristicile mecanice - $R_{p0,2}$, R_m , A_5 , Z) și parametri independenți (temperatura de turnare, consumul specific de microrăcitori și diametrul acestora) au condus la stabilirea domeniilor optime de variație a acestora, ceea ce permite implementarea în practica industrială a rezultatelor obținute.

În urma utilizării metodei de dirijare a solidificării lingourilor 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.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

- 1/9. Vacu, S., ș.a. – Elaborarea oțelurilor aliate, vol. I și II, Ed. Tehnică, București, 1983.
- 2/10. Tripsa, I., s.a. - Optimizarea proceselor de turnare, solidificare și încălzire a lingourilor de oțel, Ed. Tehnică, București, 1975.
- 3/12. Socalici, A., Hepuț, T., Ardelean, E., Nica, Gh. – Tehnologii pentru îmbunătățirea calității oțelului, Ed. Mirton, Timișoara, 2003.
- 4/13. Brian, G. T. - Casting Process Simulation and Visualization, A JOM-e Perspective, JOM: HTML Enhanced Articles, January 2002, pag. 33.
- 5/14. Brown, S., Spittle, J., James, J. - Solidification of a Complex Foundry Casting, A JOM-e Perspective, JOM: HTML Enhanced Articles, January 2002, pag. 55.
- 6/15. 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.
- 7/16. Davis, S.H. - Theory of solidification, Cambridge Univ. Press, 2001, ISBN 0-521-65080.
- 8/19. Efimov, V.A. – Turnarea și cristalizarea oțelurilor, Ed. Tehnică, București, 1976.
- 9/20. 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.
- 10/35. Byrne, P., ș.a. – Solidification control by numerical optimization, Department of Mechanical and Industrial Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign, 2002.
- 11/44. Amiiailov, B.I. - "Vliianie temperaturi austenitizatii i reglementiruemoi deformatii covcoi na structura i svoistva productov perlitnovo prevrasceniia", Referativnii jurnal, nr.12 Moskva, 1990.
- 12/55. 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.
- 13/59. Bratu, C., Sofroni, L., Cucea, V. – Cercetări privind îmbunătățirea calității fontelor prin tratare, în stare lichidă, cu microrăcitori, Metalurgia, Nr.7, 1982, pag.365.
- 14/60. Bratu, C., Sofroni, L. – Cercetări privind dirijarea procesului de cristalizare a oțelurilor prin utilizarea microrăcitorilor, Metalurgia, Nr.6, 1981, pag.281.
- 15/62. Bratu, C. – Cercetări privind dirijarea procesului de solidificare a lingourilor prin introducerea microrăcitorilor, Metalurgia, Nr.3, 1982, pag.115.
- 16/72. Anno, I.K. - "Analiz asobennosti skorostnovo struinovo nagreva zagotovok v cuznecinih peciah", Referativnii jurnal, nr.3 Moskva, 1991.
- 17/73. Beckermann, C - Modelling of macrosegregation: applications and future needs, International Materials Reviews, vol. 47, iss. 5, 2002, pag.243.
- 18/75. Bocalini, H., Goldstein, H. – Solidification of high speed steel, International Materials Reviews, vol. 46, iss. 2, 2001, pag.92.
- 19/80. 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.
- 20/85. Socalici A. Contributions regarding the influence of micro-coolers over strenght characteristics of carbon steel Metalurgia Internațional nr. 6, 2004, 31-35.