

## CERCETĂRI PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA PROCESELOR DE DEGAZARE ȘI DEZOXIDARE A OȚELURILOR PENTRU ȚEVI

**Teză de doctorat – Rezumat**

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Ingineria materialelor

**autor ing. MAGAON MIRUNA**

conducător științific Prof.univ.dr.ing. HEPUȚ TEODOR

luna Iulie anul 2021

REZUMAT

PREFAȚĂ

Industria metalurgică (siderurgie, metale și aliaje neferoase, pulberi metalice, materiale compozite, aliaje cu memoria formei, aliaje metalice speciale etc) reprezintă baza dezvoltării industriale avansate pentru orice țară. Istoric vorbind, siderurgia a avut importanța ei în crearea UE, țările europene începând din 1950 să se unească, din punct de vedere economic și politic, în cadrul Comunității Europene a Cărbunelui și Oțelului, propunându-și totodată să asigure o pace durabilă.

Semnificativă pentru situația dificilă a siderurgiei europene, este faptul că "s-a apropiat nepermis de mult de pragul de rentabilitate", de trecere definitiv în zona cu pierderi economice, dacă UE întârzie în acțiuni pentru redresarea economică de ansamblu[1/1].

Industria siderurgică din Europa este lider mondial în cazul anumitor segmente de pe piața produselor siderurgice, reprezintă 1,3% din PIB-ul UE și, în 2015, oferea aproximativ 328.000 de locuri de muncă, fiind în același timp o sursă importantă de locuri de muncă indirecte [2/4].

Pe plan internațional, dar în mod deosebit pe plan național, industria siderurgică se confruntă cu dificultatea de a se menține competitivă în raport cu alte sectoare economice și, în același timp, cu necesitatea de a continua să satisfacă cerințele tot mai severe a consumatorilor de oțel.

De menționat că după 1990 în urma restructurării și ca urmare a privatizării industriei siderurgice naționale, cele 4 oțelăriile Siemens-Martin (din care 3 cu flux integrat - 2 la Hunedoara și 1 la Reșița - și pe flux neintegrat oțelăria de la Oțelu Roșu), precum și oțelăria electrică nr. 1 de la Hunedoara cu turnarea oțelului sub formă de lingouri au fost complet dezafectate. În prezent oțelăriile rămase în funcțiune (Hunedoara, Reșița, Oțelu Roșu, Târgoviște și Călărași sunt echipate cu cuptoare cu arc electric tip EBT, instalații de procesare în oală (LF și VD) și cu mașini de turnare continuă (MTC). De menționat că la Galați mai funcționează pe flux integrat o oțelărie (din 3) cu convertizoare tip LD și turnare continuă (MTC), cu mențiunea că după restructurare, din cele 6 furnale în funcțiune a rămas un singur furnal, iar uzina cocso-chimică este dezafectată (ar putea fi considerat flux integrat parțial).

De menționat că prin privatizare s-a urmărit gruparea în același concern a fluxului elaborare (elaborare-turnare continuă- laminare la faza semifabricat) cu fluxul de laminare de la semifabricat –laminat finit: în acest sens sunt reprezentative TMK (Reșița-Slatina), ArcelorMittal (Hunedoara-Roman), Tenaris (Călărași-Zalău)

Cu ocazia definitivării tezei de doctorat, doresc să adresez mulțumiri tuturor celor care m-au îndrumat, sprijinit și împărtășit cunoștințe profesionale.

## CAPITOLUL 1 – PLAN DE DESFĂȘURARE A EXPERIMENTĂRILOR ȘI CERCETĂRILOR

Tema tezei de doctorat se referă la realizarea unor studii și cercetări privind elaborarea oțelurilor în cuptoare cu arc electric tip EBT, procesarea în oala de turnare (procedeele LF și VD) și turnare continuă. Pe fluxul de elaborare s-a cercetat în mod deosebit eliminarea gazelor (hidrogen, azot și oxigen din baia de oțel la procesarea în vid, puritatea în incluziuni nemetalice, scopul final fiind îmbunătățirea calității semifabricatelor turnate continuu și evident creșterea scoaterii de metal. Teza de doctorat este structurată pe 9 capitole, cuprinse în 3 părți. Experimentările industriale s-au desfășurat la TMK S.A. Reșița (fostul Combinat Siderurgic Reșița), companie specializată în producția de [3/5]:

- țagle rotunde Ø 177 mm, Ø 220 mm, Ø 280 mm și Ø 350 mm, turnate continuu pentru țevi din oțel carbon, slab aliat și aliat, destinate laminării țevelor mecanice, a țevelor pentru schimbătoare de căldură, a țevelor petroliere / de gaz, a țevelor de presiune și a țevelor pentru construcții;

- semifabricate rotunde Ø 177 mm, Ø 220 mm, Ø 280 mm și Ø 350 mm, turnate continuu din oțel carbon, slab aliat și aliat, destinate prelucrării plastice la cald prin forjare/matrișare (flanșe, inele, axe, pinioane);

TMK S.A. Reșița dispune de agregate, instalații și echipamente moderne pentru elaborarea produselor de calitate superioară și anume: cuptor electric cu arc tip EBT (Excentric Bottom Tapping) de 100 t; cuptor oală (LF-Ladle Furnace) de 100 t; instalație de vidare a oțelului lichid tip VD (Vidare- Degazare) de capacitate 100 t; Mașină de Turnare Continuă (MTC) cu 3 fire curbe. Mentenanța echipamentelor de producție este realizată de către propria secție de întreținere și reparații.

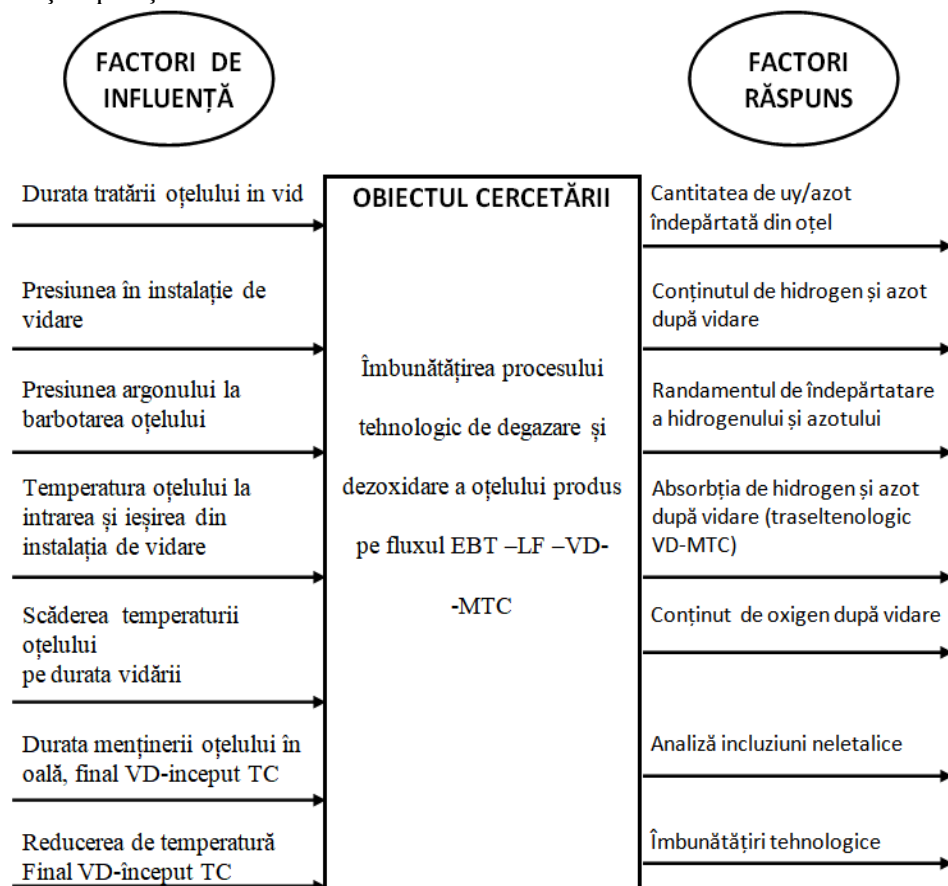


Fig. 1/(1.1.) Modelul de intrări - ieșiri al obiectului cercetării

Strategia de cercetare aplicată (conform modelului din fig.1/1.1.) în vederea elaborării tezei de doctorat a constat în parcurgerea următoarelor etape:

- studiu bibliografic din literatura de specialitate cu privire la:
- elaborarea oțelului în cuptoare cu arc electric tip EBT, procesate în oala de turnare și turnate continuu;
- reducerea conținutului de gaze (H, N și O) din baia de oțel;
- tehnici de analiză a incluziunilor nemetalice din oțel
- cercetări și experimentări industriale privind stabilirea unor corelații între parametrii procesării oțelului în vid și turnării continue asupra:
  - conținutului final de hidrogen din oțelul vidat și randamentul de eliminare a hidrogenului, absorbția de hidrogen pe traseul tehnologic VD→MTC;
  - conținutului final de azot din oțelul vidat și randamentul de eliminare a azotului, cantitatea de azot eliminată, absorbția de azot pe traseul tehnologic VD→MTC;
  - conținutului final de oxigen din oțelul vidat și analiza incluziunilor nemetalice;
  - verificarea industrială a rezultatelor cercetării efectuate;
  - concluzii finale, contribuții originale, diseminarea rezultatelor cercetărilor.

## **PARTEA I-a.-STUDIUL DIN LITERATURA DE SPECIALITATE PRIVIND ELABORAREA ÎN CUPTOARE CU ARC ELECTRIC ȘI TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI**

### **CAPITOLUL 2 – ELABORAREA ÎN CUPTOARE CU ARC ELECTRIC TIP EBT, PROCESAREA ÎN OALĂ ȘI TURNAREA CONTINUĂ A OȚELULUI**

Oțelul (aliaj al fierului cu carbonul) este unul dintre cele mai importante materiale ale epocii noastre, din oțel fiind produse partea activă a fondurilor fixe ale economiei.

În prezent pe plan mondial, majoritatea oțelărilor electrice sunt echipate cu cuptoare cu arc electric de mare putere tip E.B.T., instalații de procesare în oală și mașini de turnare continuă.

Cuptorul cu arc electric, ca urmare a perfecționărilor aduse atât din punct de vedere constructiv, cât și tehnologic, precum și cuplarea acestuia în fluxul tehnologic de elaborare cu instalații de tratament în oală, a permis pe de o parte, dezvoltarea “Metalurgiei în Oală”, iar pe de altă parte extinderea procedurii de turnare continuă și la oțelăriile electrice.

Echiparea oțelărilor electrice cu cuptoare cu arc electric tip EBT și instalații de procesare în oală (fără sau cu aport de căldură) LF, RH, VD, VAD, VOD etc., asigură elaborarea atât a oțelurilor carbon obișnuite sau oțeluri slab aliate, cât și a celor înalt aliate, acestea construindu-se în limite foarte largi de capacitate [4/15, 5/18, 6/30].

Etapele de elaborare a oțelului în cuptorul cu arc electric tip EBT sunt: încărcătura și încărcarea cuptorului cu arc electric cu fier vechi; încălzirea încărcăturii; topirea; afinarea și evacuarea, turnarea în oala de turnare (fig.2/(2.3.)).

Introducerea în fluxul tehnologic de elaborare a oțelului a tehnologiilor de procesare a oțelului în oala de turnare, la început în instalații fără aport de căldură (barbotarea cu gaz inert, barbotare cu gaz inert + vidare) urmate de cele cu aport de căldură, a condus la gruparea acestora sub denumirea de “METALURGIA ÎN OALĂ”, frecvent cunoscut și sub denumirea de “METALURGIE SECUNDARĂ” [4/15, 7/33]. În fig. 3(2.5.) se prezintă schema procesului tehnologic de tratare în oala de turnare [4/15, 7/ 33].

Procesarea oțelului în instalația LF asigură pe lângă obținerea efecte metalurgice îmbunătățite și sincronizarea șarjelor la turnarea continuă (de importanță deosebită la turnarea secvențială), iar instalația de vidare VD are rolul de degazare a oțelului [4/15,7/33].

Durata șarjei la cuptoarele cu arc electric tip EBT este cuprinsă între 40 – 80 min (foarte apropiată de cea la convertizoarele cu oxigen), iar productivitatea este în medie 100t/h;

Instalațiile LF funcționează în sistem duplex cu agregatul de elaborare primară, cuptorul electric cu arc sau convertizorul cu oxigen, acestea putând fi considerate în etapa actuală ca "stații tampon" între oțelării și masinile de turnare continuă (MTC).

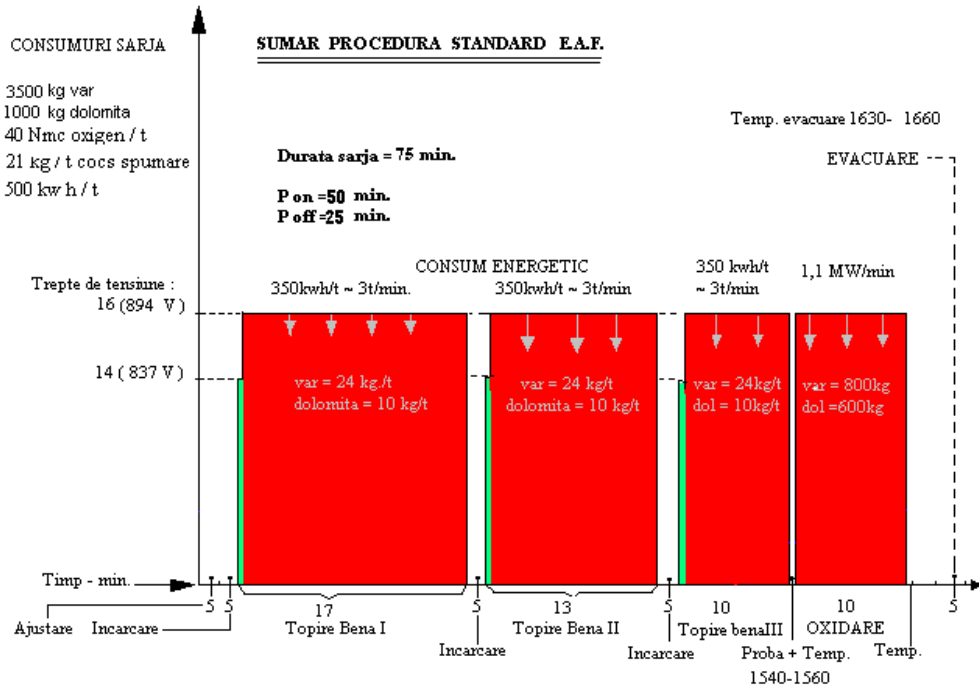


Fig. 2/(2.3).Schema procesului tehnologic de elaborare [15].

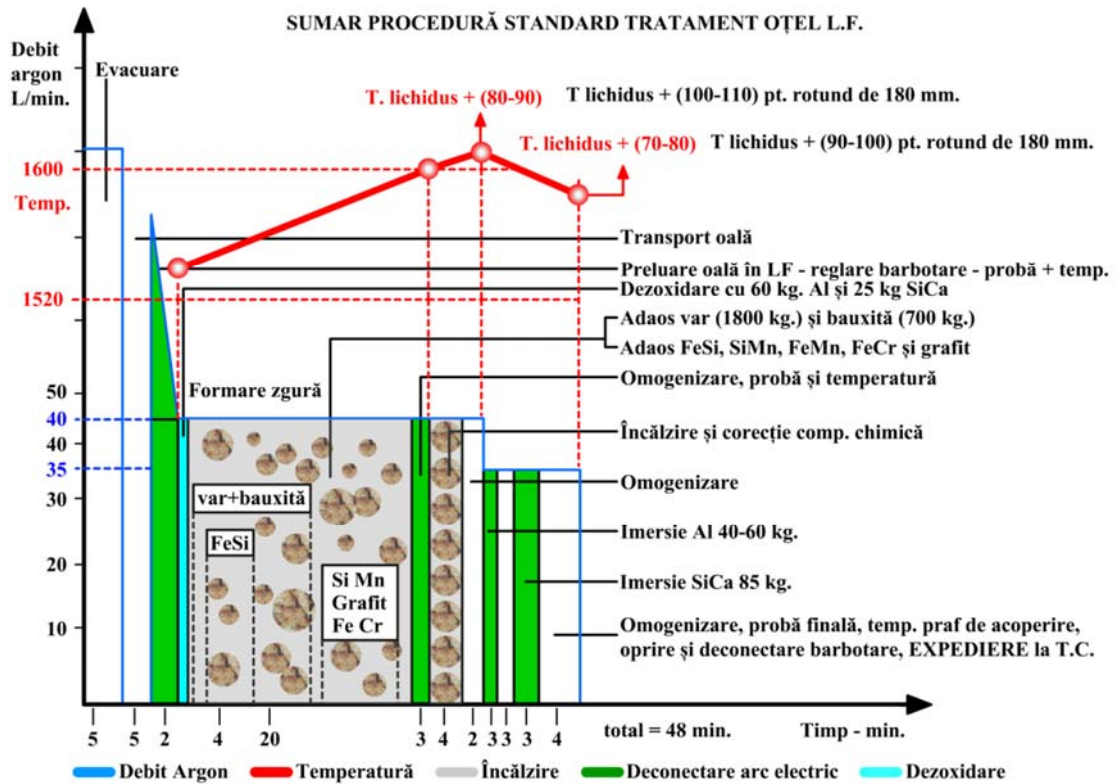


Fig. 3 (2.5).Schema procesului tehnologic de tratare în oala de turnare (LF) [15].

Odata cu perfecționarea tehnologiilor de elaborare, era normal să se perfecționeze și tehnologiile de turnare, mai precis a avut loc trecerea de la turnarea sub formă de lingouri la turnarea continuă șarjă cu șarjă, respectiv la cea secvențială.

Progresul extrem de rapid al turnării continue a oțelului, atât din punct de vedere metalurgic, cât și în ceea ce privește construcția instalațiilor, a condus la dezvoltarea intensă a acestui procedeu în industria siderurgică [8/34], ca urmare a următoarelor avantaje: creșterea scoaterii de metal de la 82-85% la turnarea clasică la min.99% la turnarea continuă secvențială, reducerea investițiilor, consumurilor energetice, reducerea manoperei etc.

Actualmente pe plan mondial dar și național, turnarea secvențială reprezintă tehnologia standard pentru toate instalațiile de turnare continuă (diferă însă numărul șarjelor turnate într-o secvență și frecvența secvențelor), care sunt prevăzute cu dispozitive de schimbare rapidă a oalei de turnare și a distribuitorului, tendința actuală fiind aceea de a se turna semifabricate cu secțiune cât mai apropiată de cea finală.

### **CAPITOLUL 3 – STUDIU DIN LITERATURA DE SPECIALITATE PRIVIND REDUCEREA GAZELOR DIN BAIJA DE OȚEL**

Îndepărtarea gazelor din baia de oțel este o problemă permanentă a inginerilor metalurghi, apărută odată cu dezvoltarea producției de oțel, astfel încât acest proces tehnologic este tot mai mult studiat în ultimii ani, mai ales în cadrul operației de rafinare.

Minimizarea conținutului de gaze (H, N) ca obiectiv major în programele de fabricație a oțelurilor durabile, trebuie legată de cunoașterea influenței pe care o exercită gazele asupra calității oțelului, apreciată prin valorile diverselor caracteristici calitative, respectiv comportarea în exploatare a acestora.

Hidrogenul are o influență negativă asupra calității oțelului [4/15, 9/32], deoarece: constituie una din cauzele apariției suflurilor în lingouri și piese turnate din oțeluri calmate; contribuie la apariția defectului numit „fulgi” (fisuri foarte mici cu formă stelară) în oțelurile aliate cu crom și nichel, care reduc substanțial rezistența la oboseală a pieselor din oțel; micșorează plasticitatea și tenacitatea oțelului; afectează proprietățile electrice și magnetice ale oțelurilor.

Influența negativă a azotului în oțeluri se manifestă prin aceea că [4/15, 9/32]: reduce plasticitatea și tenacitatea oțelului; în asociere cu hidrogenul contribuie la apariția suflurilor în oțelul turnat; provoacă fenomenul de îmbătrânire a oțelului prin depunere de nitruți la limitele grăunților structurali.

Din studiul literaturii de specialitate [10/16, 11/25], se poate considera ca principale surse de hidrogen și azot în oțelăriile electrice (cuptoare cu arc electric tip EBT) următoarele: încărcătura metalică propriu-zisă (sortimentele de deșeuri feroase, fonta, feroaliaje, burete de fier, pelete metalizate, aglomerat metalizat etc.); umiditatea încărcăturii metalice, neexistând întotdeauna posibilitatea tehnică de preîncălzire a încărcăturii din bene; adaosurile necesare formării zgurii, minereu, calcar, var, topex etc., precum și modul de aprovizionare cu var și var dolomit, acestea pe timpul transportului și staționării în buncărele de stocare absorb umiditatea din aerul atmosferic (mai ales acolo unde nu se dispune de fabrică de var proprie), funcție de durata de staționare, de granulație, de gradul de ardere; atmosfera cuptorului, datorită metodelor constructive (panouri, boltă și alte elemente răcite cu apă) pot apărea cazuri accidentale de spargere a acestor elemente și astfel pentru scurte perioade de timp, dar cu presiuni mari de lucru, apa de răcire pătrunde în atmosfera de elaborare a agregatului; efectul ionizant al atmosferei cuptorului generat de arcului electric, care contribuie la dizolvarea N și H mai ales în cazul unui strat foarte subțire de zgură.

De menționat că solubilitatea gazelor în baia de oțel este influențată de elementele însoțitoare și în mod deosebit de cele de aliere.

În general, hidrogenul și azotul trec din atmosfera gazoasă a agregatului de elaborare în

oțel nu direct, ci prin intermediul zgurii (solubilitatea fiind mai mică zgurile acide.

Condițiile favorabile care asigură conținut minim de hidrogen și azot în oțel sunt: folosirea unor materii prime materiale cu conținut scăzut de umiditate sau H și N (încărcătură metalică, minereu, var, calcar, var dolomitic, feroaliaje etc.); asigurarea unei viteze de decarburare suficient de mari, mai precis superioare cele critice ( $v.c. > v.c_{cr}$ ); folosirea unei zguri cu bazicitate minimă admisibilă din punct de vedere a altor procese (defosforare, desulfurare etc); durată de menținere a oțelului în cuptor deoarece după dezoxidare  $v.c.=0$  și deci  $V_{elim}^{H,N}=0$ ; barbotarea cu un gaz inert (în general argon), iar în cazul oțelului inoxidabil aliat chiar și cu azot; vidarea de dorit în instalații cu aport de căldură.

Gradul de degazare variază în general mult în funcție de solubilitatea gazelor în oțel, de starea lor (libere sau în combinație) și de anumite caracteristici ale procedeelor de tratare în vid, de parametrii vidării, ca valori de reper se poate admite că se îndepărtează 60 – 70% din hidrogen și 0 – 40% din azot (în medie 30%) [9/32, 11/25].

#### **CAPITOLUL 4 – STUDIU PRIVIND REDUCEREA OXIGENULUI DIN BAIA DE OȚEL**

În practica elaborării oțelurilor este cunoscut faptul că o dată cu scăderea conținutului de carbon în oțel, crește cel de oxigen, ceea ce face ca la finalizarea perioadei de afinare conținutul de oxigen dizolvat este relativ mare (0,02 – 0,06%, respectiv 200 – 600 ppm) și crește puternic când [C] scade sub 0,20%.%, asemenea conținuturi nefiind admise în oțeluri deoarece dăunează calității prin: ”fragilizarea la cald” care se manifestă în susceptibilitate mărită la supraîncălzire și apariția de crăpături în timpul deformării la cald, ca urmare a depunerilor de oxizi și oxisulfuri la limita grăunților structurali; formarea suflurilor (golurilor de metal) în timpul solidificării produsului turnat (specifice oțelurilor necalmate și semicalmate turnate sub formă de lingouri – nesemnificativ în etapa actuală);

Din motivele menționate conținutul de oxigen dizolvat în oțelul calmat nu trebuie să depășească la oțelul calmat limitele de 0,0040 – 0,0080% (40 – 80ppm), iar la semicalmat și necalmat 150 - 300ppm. Dezoxidarea se face prin următoarele metode: precipitare, extracție/difuziune și cu ajutorul vidului.

**Dezoxidarea prin precipitare** constă în esență în introducerea în oțelul lichid a unor materiale, **denumite dezoxidanți**, care au în componența lor elemente cu afinitate față de oxigen mai mare decât a fierului, aceasta fiind **o primă condiție ca un element să fie dezoxidant**.

Elementul dezoxidant se combină cu oxigenul dizolvat în oțel și formează oxizi stabili și insolubili în oțelul lichid, care se separă (precipită) în faze oxidice distincte, aceasta fiind **a doua condiție ca elementul să fie dezoxidant**.

Dezoxidantul trebuie să aibă greutate specifică și granulație mari pentru a putea pătrunde în oțelul lichid (sau cel puțin la interfața zgură-oțel) și să reacționeze cu oxigenul dizolvat în oțel, unul din motivele pentru care sub formă de feroaliaje. O altă soluție tehnologică este aceea de imersare în baia de oțel a feroaliajului sub formă de sârmă (fir de aluminiu) sau fir umplut (silico-calciu, aluminiu–calciu-siliciu). Ca urmare aceste aspecte reprezintă **o a treia condiție pentru ca un element să fie dezoxidant**.

Pentru ca un element să poată fi utilizat în practică ca dezoxidant acesta trebuie să fie convenabil din punct de vedere economic, **deci practic este a patra condiție impusă pentru un element dezoxidant**.

În practică se folosesc dezoxidanți uzuali atât simpli (FeMn, FeSi, Al), cât și complecși (SiMn, SiCa, AlCaSi), precum și speciali (FeTi, FeV, FeNb, FeB, PR). [10/16, 11/25].

**Dezoxidarea oțelului prin extracție/difuziune** are la bază faptul că oxigenul, respectiv oxidul feros FeO, este solubil atât în oțel, cât și în zgură, iar ca urmare a dezoxidării acesteia,  $[FeO] \rightarrow (FeO)$ , deci oțelul se dezoxidează. Această metodă poate fi aplicată la elaborarea

oțelului în cuptorul cu arc electric sau în oala de turnare (la orice agregat de elaborare). Dezoxidarea în vid reprezintă unul din procedeele de mare eficiență de dezoxidare a oțelului cu multiple aplicații la elaborarea oțelurilor de înaltă puritate.

Procesul de îndepărtare a incluziunilor nemetalice din oțelul lichid decurge în mare măsură concomitent cu procesul de formare și creștere a acestora, importanță deosebită având tensiunea interfațială oțel-incluziune, greutatea specifică a acestora, creșterea pe orice cale a vitezei de îndepărtare a incluziunilor (barbotarea băii, vidarea, retopirea etc.), [10/16, 11/ 25].

De menționat că la barbotarea cu argon/azot poate avea loc și eliminarea incluziunilor nemetalice neumectate de oțel, prin fenomenul de flotație [10/16, 11/ 25].

Distrugerea /reducerea incluziunilor nemetalice în vid se bazează pe faptul că afinitatea carbonului pentru oxigen crește astfel încât acesta este un dezoxidant foarte puternic, reduce incluziunea și CO părăsește baia metalică [10/16, 11/ 25].

## PARTEA II-a

### CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND DEGAZAREA ȘI DEZOXIDAREA OȚELURILOR PROCESATE ÎN INSTALAȚII DE VIDARE DE TIP VD

#### CAPITOLUL 5 –CERCETĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PRIVIND REDUCEREA CONȚINUTULUI DE HIDROGEN LA PROCESAREA OȚELULUI ÎN INSTALAȚII DE VIDARE TIP VD

În cadrul cercetărilor efectuate și a căror rezultate sunt prezentate în acest capitol, s-a urmărit posibilitățile de reducere a conținutului de hidrogen și de creștere a randamentului de îndepărtare a acestuia la oțelurile destinate fabricației de țevi.

Cercetările s-au efectuat la o oțelărie electrică, echipată cu un cuptor electric cu arc tip EBT, instalație LF, instalație VD și instalație de turnare continuă cu 3 fire. Au fost analizate pe fluxul tehnologic prezentat (cap. I) un număr de 22 de șarje de oțel marca ST 52-3 turnat continuu în țagă rotund de  $\phi 280$ mm. Aceste cercetări au avut în vedere stabilirea unor corelații tehnologice între parametrii dependenței și cei independenți, astfel:

- **parametri dependenți:** conținutul de hidrogen din baie la terminarea vidării  $[H]_{VD}$ , ppm; randamentul de eliminare a hidrogenului  $R_H$ , %.
- **parametri independenți:** durata totală a vidării ( $D_{TV}$ ), min; durata vidării sub vid avansat ( $D_{vid.av}$ ) min; presiunea în instalația de vidare la vid avansat ( $P_{vid.av}$ ), mBar; presiunea argonului la barbotare ( $P_{bAr}$ ) în VD, atm; reducerea de temperatură pe durata vidării ( $\Delta T$ ),  $^{\circ}C$ ; temperatura oțelului la intrarea în instalația de vidare ( $T_{inVD}$ ),  $^{\circ}C$ ; temperatura oțelului la ieșire din instalația de vidare ( $T_{isVD}$ ),  $^{\circ}C$ ;

O dată cunoscute valorile pentru parametri menționați, datele au fost prelucrate în programele de calcul EXCEL și MATLAB.

În cadrul programului de calcul EXCEL au fost stabilite ecuații de corelație polinomiale de gradul 1; 2; 3; 4 și logaritmice, în fiecare caz rezultatele fiind prezentate grafic și analitic. De asemenea pentru fiecare caz este prezentat și coeficientul de corelație.

Prin prelucrarea datelor în programul de calcul MATLAB au rezultat ecuații de corelație multiplă (dublă) între parametrul dependent ( $z$ ), cei independenți ( $x$  și  $y$ ) și  $a_1$ - $a_9$  coeficienții, rezultatele fiind prezentate atât sub formă analitică cât și grafică (suprafața de corelație, curbele de nivel proiecție spațială și plană).

Pentru stabilirea corelațiilor au fost utilizate funcții/ecuații de forma:

**Ecuația 1**  $z = a_1 + a_2x + a_3x^2 + a_4x^3 + a_5y + a_6y^2 + a_7y^3 + a_8y^4 + a_9y^5$  ((1)/(5.2))

**Ecuația 2**  $z = a_1 + a_2 \log x + a_3 (\log x)^2 + a_4 (\log x)^3 + a_5/y + a_6/y^2 + a_7/y^3 + a_8/y^4 + a_9/y^5$  ((2)/(5.3))

**Ecuația 3**  $z = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6$  ((3)/(5.4))

În continuare se prezintă exemple de corelații simple și multiple (exprimate analitic și grafic)



precum și analiza tehnologică a acestor corelații [12/58, 13/61, 14/64, 15/68]

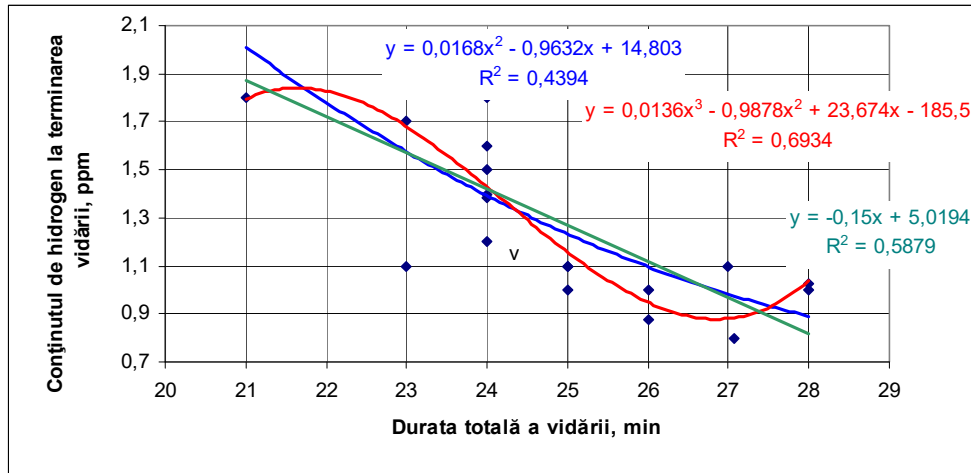
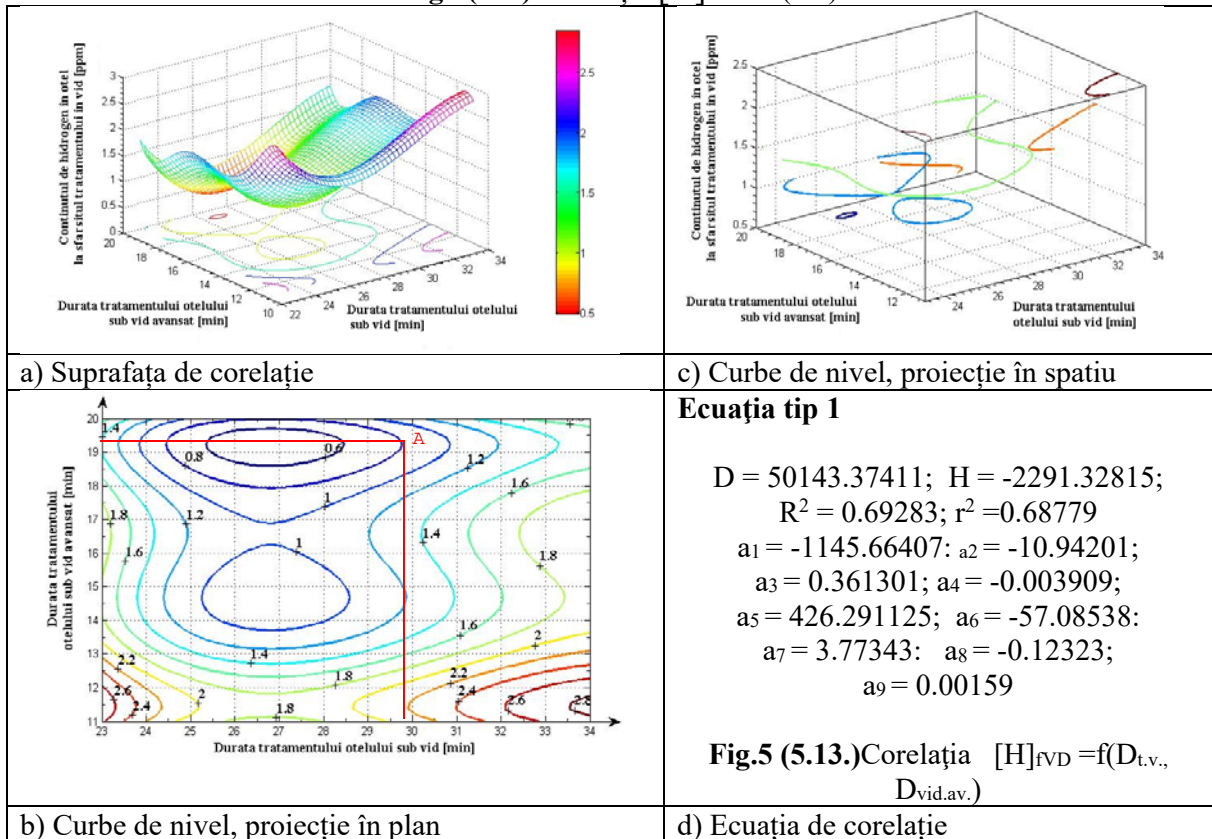


Fig4(5.1) Corelația  $[H]_{FVD} = f(D_{tv})$



Creșterea duratei totale de vidare a oțelului în instalația de vidare tip VD, conduce la reducerea avansată a conținutului final de hidrogen (fig. 5.1.), de dorit durata totală a vidării să fie cuprinsă în intervalul 25-28 min., ceea ce este foarte bine pentru o instalație de vidare fără aport de căldură pe durata tratamentului, asigurându-se astfel un conținut de hidrogen de 0,8-1,1ppm.

**Corelația 1:**  $[H]_{FVD} = f(D_{tv}, D_{vid.av.})$  prezentată în figurile 5.13; 5.14 și 5.15 cu punctele de coordonate spațiale A(30; 19; 0,9); B(30; 19; 1,0) și respectiv C (30; 19; 1,1). Diferență de 0,2ppm  $[H]_{FVD}$  este admisibilă având în vedere max. de 1,1ppm. Rezultate foarte bune se obțin pentru  $D_{tv} = 25-31$  min și  $D_{vid.av} = 15-20$  min, rezultând  $[H]_{FVD}$  sub 1,4ppm; Similar sunt analizate și celelalte reprezentări grafice din cadrul acestui capitol.



## CAPITOLUL 6 CERCETARI PRIVIND REDUCEREA CONȚINUTULUI DE AZOT PRIN VIDARE ÎN OTELURILE PENTU ȚEVI

Cercetările a căror rezultate sunt prezentate în acest capitol au decurs în același cadru tehnologic experimental ca și cele prezentate în capitolul 5, cu următoarele precizări:

- parametrii independenți sunt aceiași;
- parametrii dependenți sunt: conținutul de azot la terminarea vidării; randamentul de îndepărtare a azotului pe durata vidării; cantitatea de azot îndepărtată pe durata vidării.
- datele au fost prelucrate în programele EXCEL și MATLAB [16/65,17/63].

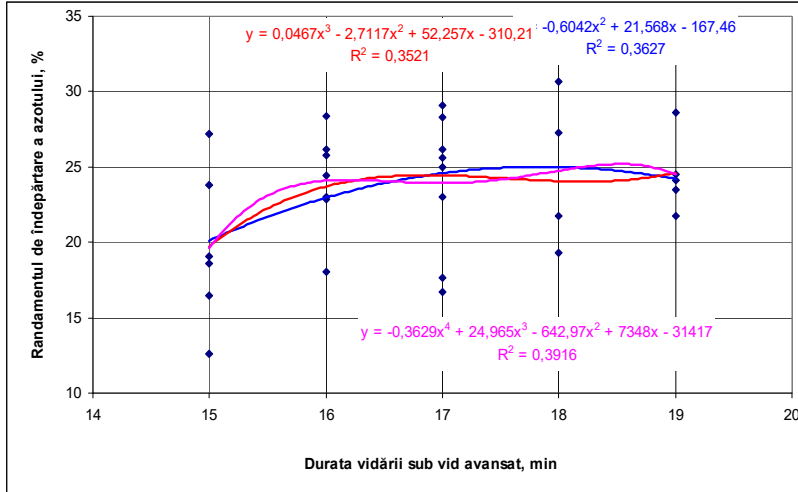


Fig. 6/(6.9). Corelația  $R_N = f(D_{vid.av.})$

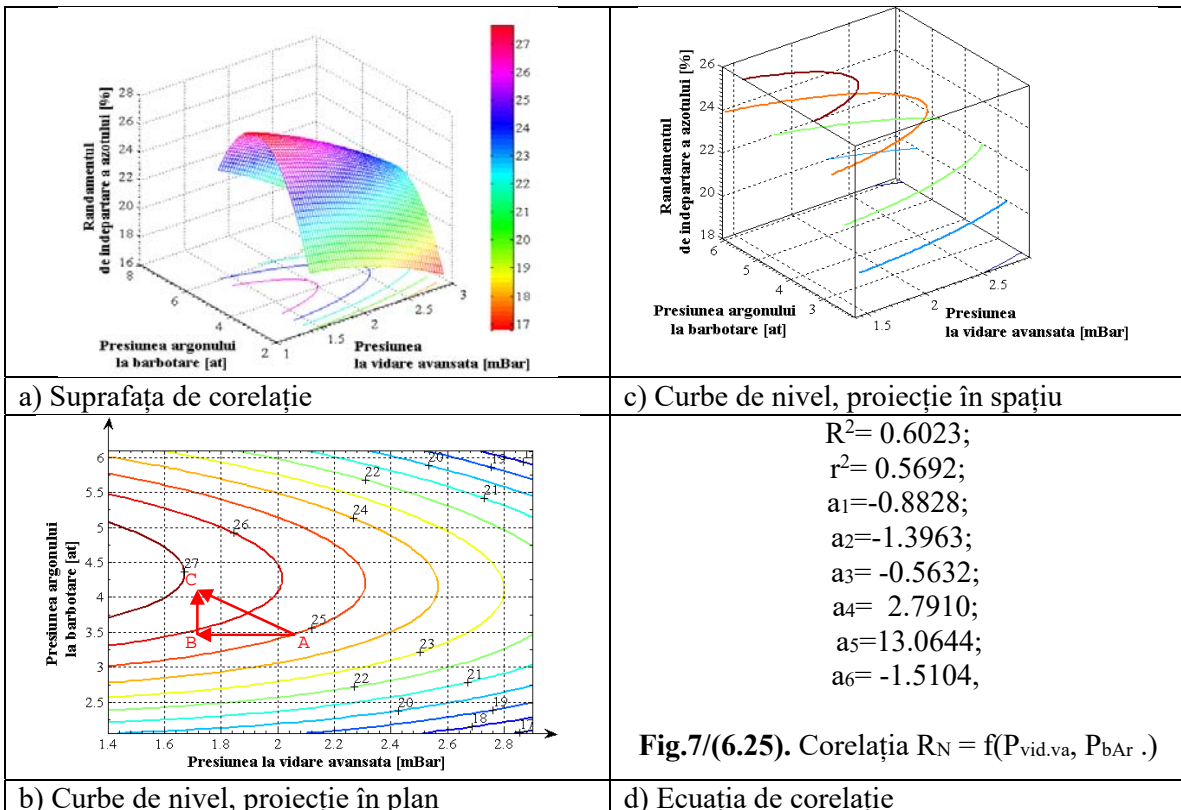


Fig.7/(6.25). Corelația  $R_N = f(P_{vid.va}, P_{bAr} .)$

Prin prelucrarea datelor în programul EXCEL au fost stabilite ecuații de corelație polinomiale de gradul 1; 2; 3 și 4, în fiecare caz rezultatele fiind prezentate atât grafic cât și analitic. În programul MATLAB datele au fost prelucrate în vederea obținerii unor corelații duble de gradul 2 (ecuația 3, capitolul 5). În continuare se prezintă analiza tehnologică a celor 2 corelații prezentate mai sus.

- referitor la influența asupra randamentului de eliminare a azotului, a duratei de vidare sub vid avansat (fig.6/(6.9)), se constată o creștere a acestui la valori de 25-30%, pentru  $D_{vid.av}=17-19$  min.; rezultatele obținute se corelează foarte bine cu cele de la durata totală a vidării  $D_{tv}=25-29$  min, putându-se astfel cel mai scăzut conținut de azot la terminarea vidării (60-70ppm);

- din datele prezentate în fig.(7/(6.25)) rezultă influența parametrilor tehnologici independenți, presiunea în instalație sub vid avansat și presiunea argonului pentru barbotarea oțelului pe durata vidării, asupra parametrului dependent, randamentul de îndepărtare a azotului din baia de oțel. Creșterea presiunii argonului la barbotare și scăderea presiunii în instalația de vidare, prin faptul că generează condiții favorabile degazării, influențează pozitiv randamentul de eliminare a azotului (Ex. A(15; 3,5; 24)→B(16; 3,5;26)→C(16;4,8;28)).

În teză sunt prezentate și corelații triple, atât sub formă analitică cât și grafică. De asemenea sunt analizat și procesul de absorbție a azotului pe traseul tehnologic VD- TC.

## CAPITOLUL 7

### CERCETARI PRIVIND REDUCEREA CONȚINUTULUI DE OXIGEN PRIN VIDARE ÎN OȚELURILE PENTU ȚEVI

Bazele teoretice referitoare la reducerea conținutului de oxigen din oțeluri [18/48, 19/57] sunt prezentate în capitolul 4, astfel încât în prezentul capitol se prezintă o serie de rezultate obținute în cadrul unor experimentări industriale efectuate în același cadru tehnologic ca cele prezentate în capitolele 5 și 6. În cazul cercetărilor efectuate a fost ales un singur parametru dependent – conținutul de oxigen din oțel după vidare-, parametrii independenți fiind aceeași. ca în celelalte două cazuri (hidrogen și azot).

De asemenea și în acest caz, datele tehnologice au fost procesate în programul EXCEL pentru corelații simple și în MATLAB pentru corelații duble, în ambele cazuri rezultatele obținute fiind prezentate atât analitic cât și grafic (în prima parte a acestui capitol) și însoțite de analiza tehnologică. În continuare se prezintă exemple de asemenea corelații.

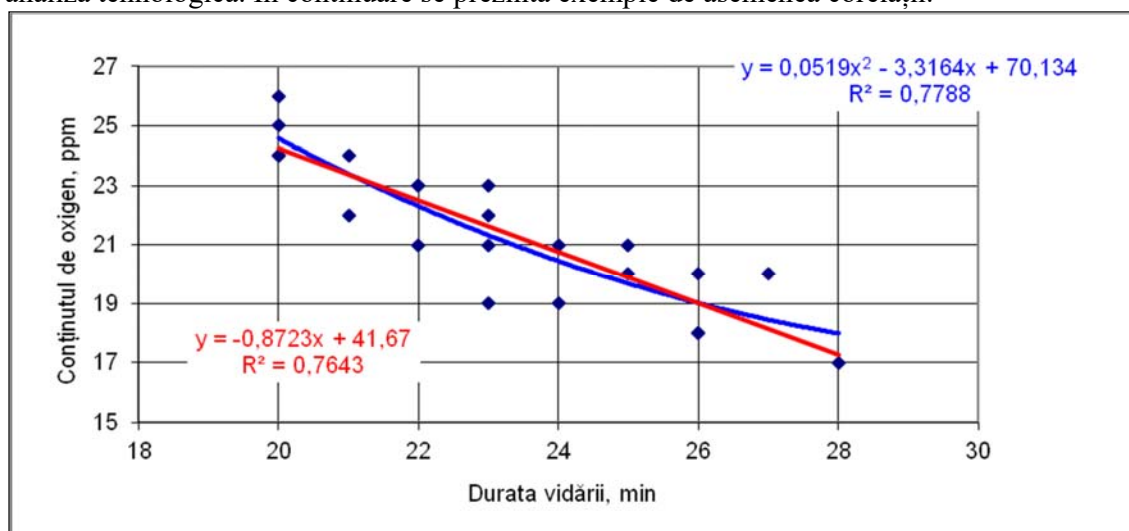
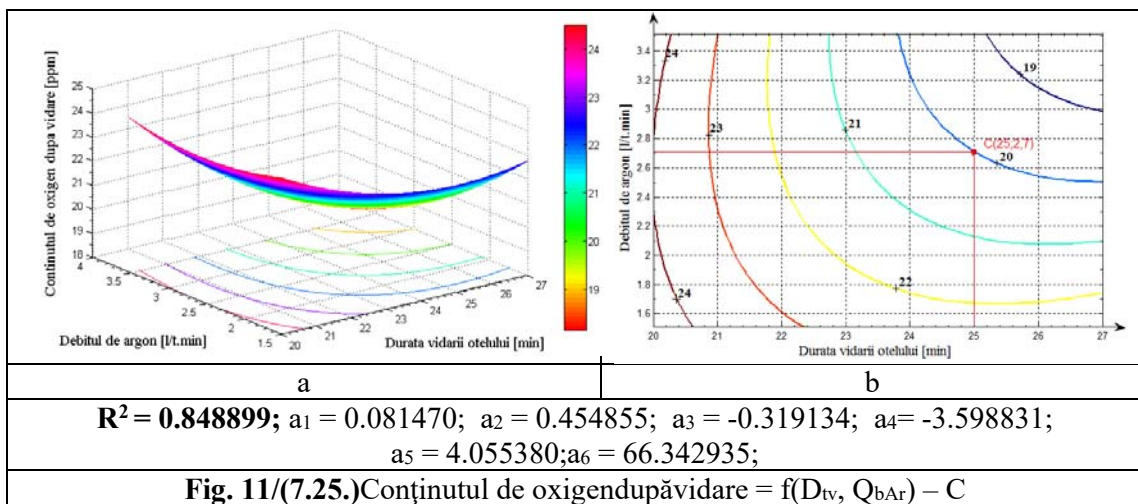
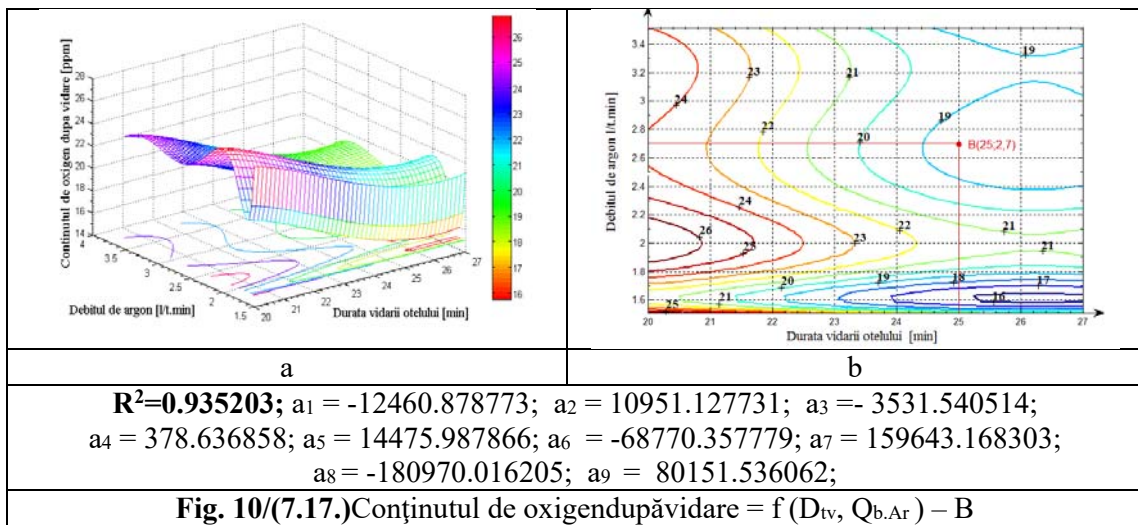
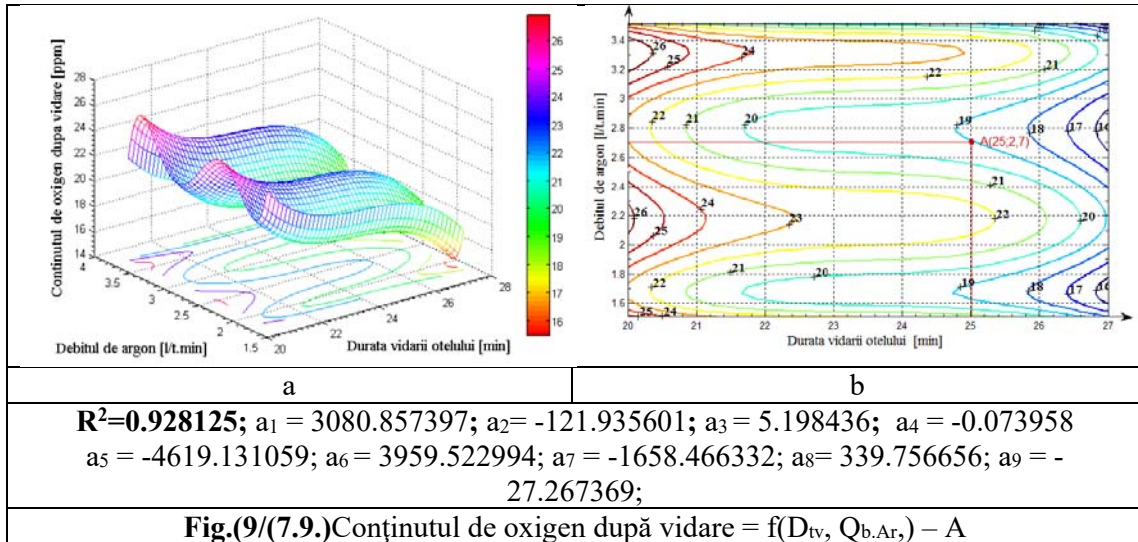


Fig.8/(7.1.) Corelația conținut de oxigen = f (durata vidării)



Referitor la durata tratării oțelului sub vid (fig.8/(7.1) se constată că o dată cu creșterea acestor durate, se asigură o scădere a conținutului de oxigen, tehnologic explicabil prin timp mai mare de difuzie a oxigenului din baia de oțel în spațiul vidat. Din prezentarea analitică a

acestor ecuații se constată valori foarte apropiată pentru coeficienți de regresie, iar în reprezentarea grafică ele practic coincid. Având în vedere aceste aspecte se poate considera că în cercetare și practica curentă se poate utiliza corelația liniară. Similar sunt analizate și celelalte corelații simple.

În ceea ce privesc corelațiile acestea au fost stabilite după cele trei tipuri de ecuații (5.2) grafic A; (5.3) grafic B și (5.4) grafic, acestea fiind analizate unitar și comparativ, astfel:

**Corelația 2:**  $[O]_{FVD} = f(D_{tv}, Q_{bAr})$  prezentată în figurile 9/(7.19), 10/(17) și 11/(7.25) cu punctele de coordonate spațiale A(25; 2,7; 19); B(25; 2,7; 18,75) și respectiv C(25; 2,7; 20). Diferențele de -1,0 ppm, -1,25 ppm și 0 ppm  $[O]_{FVD}$  sunt admisibile având în vedere max. de 26 ppm, ba mai mult și faptul că este sub cea de referință (20 ppm). Rezultate foarte bune se obțin pentru  $D_{tv} = 20-28$  min și  $Q_{bAr} = 2,5l/t.min - 3,5l/t.min$ , putându-se obține  $[O]_{FVD}$  sub 24ppm;

**În partea a II-a a acestui capitol** se prezintă o serie de rezultate privind natura și compoziția chimică a incluziunilor nemetalice conținute de semifabricatele turnate **continuu** (calitatea AMJ 21C). Stabilirea naturii incluziunilor s-a efectuat prin analiză microstructurală realizată prin microscopie electronică de baleiaj (SEM) și prin microanaliză de raze X dispersivă în energie (EDAX) la microscopul electronic cu baleiaj *QuantInspect F.*

Din studiul analizei compoziției chimice a incluziunilor din probele studiate (în total 6) pot fi scoase în evidență următoarele:

- Limitele de variație pentru principalele trei elemente (predominante) din incluziunile analizate (microariile cu zona 1) la probele 1; 3; 4 și 5 sunt:

- O = 26,81 - 27,72 în % de greutate (media 27,26%);
- O = 43,44 - 44,38 în % atomice (media 43,91%);
- Al = 20,65 - 25,71 în % de greutate (media 23,18%);
- Al = 20,06 - 24,59 în % atomice (media 22,32%);
- Ca = 41,93 - 42,18 în % de greutate (media 42,05%);
- Ca = 26,01 - 27,72 în % atomice (media 26,86%);

- Ponderea celor trei elemente cumulate (O+Al+Ca) din compoziția incluziunilor variază în limitele: 86,41- 95,61% % greutate, respectiv 89,51-96,69% atomice (valorile medii fiind de 91,01% greutate, corespunzător 93,10% atomice; de menționat că foarte rar pot fi atinse valorile extreme).

- Elementele magneziu (Mg), siliciu (Si), sulf (S) și fier (Fe), prezente alături de celelalte trei elemente menționate anterior în zona 1 din microariile analizate, au o pondere relativă mică în compoziția incluziunilor în limitele: 5,73-11,82% greutate (media 8,78%) și 4,96- 9,49% atomice (media 7,22%).

**În partea a III-a (ultima) a acestui capitol** se prezintă o serie de rezultate privind creșterea purității microscopice a oțelurilor produse la TMK Reșița. Pe perioada efectuării experimentărilor industriale prevăzute în planul de elaborare a tezei de doctorat, la această societate siderurgică s-a recurs la câteva tehnologii de dezoxidare care și-au demonstrat eficiența, și s-a avut în vedere următoarele:

- stabilirea dezoxidanților utilizați, adaosul specific, stare de prezentare a dezoxidantului, ordinea adaosului în cuptor, oală, instalația Lf, respectiv VD;
- stabilirea parametrilor de tratament în LF și VD;

Este studiată tehnologia elaborarea oțelurilor cugrăunți cristalini fini –fine crystalline grains-, precizând importanța raportului  $[Ca]/[Al]:0.92-1,02$  (considerat raport optim).

În cadrul experimentărilor a fost analizată și impurificarea oțelului (calitatea 4140) cu incluziuni exogene (praf din cristalizor ca urmare a fisurării unui tub de imersie (tub 1).

Impurificarea oțelului turnat pe firul 1, cu incluziuni de dimensiuni de aproximativ 10 ori mai mari comparativ cu F2 și F3, s-a produs în momentul în care tubul de imersie s-a fisurat; curgerea oțelului lichid prin tubul 1, a antrenat praf de lubrifiere din cristalizor, fapt confirmat de compoziția incluziunilor.

## **CAPITOLUL 8**

### **VERIFICAREA INDUSTRIALĂ A REZULTATELOR OBTINUTE ÎN CADRUL CERCETĂRILOR EFECTUATE**

#### **Considerații tehnologice**

Rezultatele obținute în cadrul cercetărilor efectuate au fost verificate în practică la aceeași societate, pe un număr de cinci șarje de oțel (aceeași marcă ca la experimentări și același flux tehnologic. De menționat că referitor la structura și calitatea încărcăturii (materii prime și auxiliare) nu au fost deosebiri semnificative (variații în limite obișnuite), respectiv procesarea oțelului în instalațiile LD și VD au decurs fără nici o abatere tehnologică.

Datele tehnologice obținute în cadrul verificării industriale a rezultatelor cercetării efectuate, confirmă valabilitatea cercetărilor efectuate și posibilitatea aplicării acestora în practica curentă.

#### **PARTEA III-a**

#### **CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE**

#### **CAPITOLUL 9**

#### **CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR**

#### **Concluzii finale**

După restructurarea industriei siderurgice (perioada 1990-2000) pentru producerea oțelului în România se folosesc următoarele tipuri de agregate: cuptoare cu arc electric (tip EBT) și convertizoare cu oxigen (tip LD). Concluziile finale se referă la elaborarea oțelului în cuptoare cu arc electric tip EBT, turnarea continuă, eliminarea gazelor din baia de oțel (hidrogen și azot) și dezoxidarea în instalații de vidare fără aport de căldură (tip VD.). Corelațiile obținute prin prelucrarea datelor industriale în programele de calcul EXCEL și MATLAB, sunt prezentate atât sub formă analitică cât și grafică, întotdeauna însoțite de analiza tehnologică și posibilitățile de aplicare în practică.

#### **Contribuții originale**

Pe baza studiului literaturii de specialitate, cu referire la tematica tezei de doctorat, a experimentărilor efectuate la nivel de fază industrială, a prelucrării datelor experimentale și analizei tehnologice a rezultatelor obținute, precum și a verificării industriale a acestora, pot fi considerate ca și contribuții personale/originalare următoarele:

- 1) realizarea pe baza studiului literaturii de specialitate referitor la tematica tezei de doctorat a sintezelor privind: elaborarea oțelului în cuptoare cu arc electric și turnarea continuă, eliminarea hidrogenului și azotului din baia de oțel și dezoxidarea oțelurilor;
- 2) stabilirea prin prelucrarea datelor experimentale (industriale) în programul de calcul EXCEL a unor ecuații de corelație (simple) polinomiale de gradul 1; 2; 3; 4 și logaritmice, iar în programul de calcul MATLAB a și respectiv dublă, între principali parametri ai vidării considerați independenți și conținutul de hidrogen din oțel după vidare și randamentul de eliminare a hidrogenului, considerați dependenți, în fiecare caz rezultatele fiind prezentate atât grafic, cât și analitic, precum și analizate din punct de vedere tehnologic;
- 3) obținerea corelațiilor (în programele EXCEL și MATLAB) simple și respectiv duble prin prelucrarea datelor referitoare la absorbția de hidrogen în baia de oțel pe traseul tehnologic VD - distribuitor, urmată de analiza tehnologică.
- 4) prelucrarea datelor experimentale (industriale) în programul de calcul EXCEL și obținerea a unor ecuații de corelație (simple) polinomiale de gradul 1; 2; 3; 4 și logaritmice, între principali parametri ai vidării considerați independenți și conținutul de azot din oțel după vidare, randamentul de eliminare a azotului și cantitatea de azot îndepărtată, considerați dependenți, în fiecare caz rezultatele fiind prezentate atât grafic, cât și analitic, precum și analizate din punct de vedere tehnologic;

5) analiza datele referitoare la randamentul de eliminare a azotului, determinarea și prelucrarea acestora în programul MATLAB cu obținerea unor corelații duble exprimate prin ecuații polinomiale de gradul 2 (parametrii independenți aceeași ca la corelațiile simple), și prezentate atât sub formă analitică, cât și grafică, fiind însoțite de analiza tehnologică;

6) determinarea prin prelucrarea în programul MATLAB a datele referitoare la randamentul de eliminare a azotului a unor corelații triple exprimate prin ecuații polinomiale de gradul 2 (parametrii independenți aceeași ca la corelațiile simple), și prezentate atât sub formă analitică, fiind însoțite de analiza tehnologică;

7) stabilirea prin prelucrarea în programul MATLAB a datele referitoare la cantitatea de azot a unor corelații triple exprimate prin ecuații polinomiale de gradul 2 (parametrii independenți aceeași ca la corelațiile simple), și prezentate atât sub formă analitică, cât și grafică, fiind însoțite de analiza tehnologică; pentru prezentarea sub formă grafică corelațiile triple au fost transformate în corelații duble (o corelație triplă generează trei corelații duble), aceste reprezentări fiind însoțite de o analiză tehnologică;

8) prelucrarea în programele de calcul EXCEL și MATLAB a datelor referitoare la absorbția de azot în baia de oțel pe traseul tehnologic VD - distribuitor și obținerea corelațiilor simple și respectiv duble, urmată de analiza tehnologică.

9) stabilirea prin prelucrarea datelor experimentale (industriale) în programul de calcul EXCEL a unor ecuații de corelație (simple) polinomiale de gradul 1; 2; 3; 4 și logaritmice, între principali parametri ai vidării considerați independenți și conținutul de oxigen din oțel după vidare, în fiecare caz rezultatele fiind prezentate atât grafic, cât și analitic, precum și analizate din punct de vedere tehnologic;

10) determinarea prin prelucrarea în programul MATLAB a datele referitoare la conținutul de oxigen în oțel după vidare a unor corelații duble exprimate prin ecuații polinomiale de gradul 2 (parametrii independenți aceeași ca la corelațiile simple), de gradul 5 și o formă combinată/mixtă polinomială+logaritmice, în toate cazurile fiind prezentate atât sub formă analitică, cât și grafică, însoțite fiind de analiza tehnologică;

11) determinarea naturii, compoziției și mărimii incluziunilor nemetalice (oțeluri pentru țevi) prin analiză microstructurală realizată prin microscopie electronică de baleiaj (SEM) și prin microanaliză de raze X dispersivă în energie (EDAX) la microscopul electronic cu baleiaj ***Quanta Inspect F***;

11) elaborarea unei tehnologii de procesare a oțelului lichid pe fluxul de fabricație CAE-LF-VD-MTC care reduce fenomenul clogging, deci se evită colmatarea tuburilor de imersie;

12) Analiza caracteristicilor incluziunilor nemetalice din semifabricat, generate de fisurarea tubului de imersie;

13) Verificarea industrială a rezultatelor cercetărilor efectuate, rezultatele obținute confirmând valabilitatea/importanța acestora;

14) Diseminare rezultate și direcții de continuare a cercetărilor.

#### **Direcții de continuare a cercetărilor**

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul cercetărilor efectuate privind tematica tezei de doctorat, se poate considera că prezintă interes deosebit pentru industria metalurgică/siderurgică și nu numai, continuarea cercetărilor în următoarele direcții:

1) absorbția oxigenului în oțelul lichid după terminarea procesării acestuia în instalație de vidare (fără sau cu aport de căldură) pe traseul tehnologic instalație de vidare – distribuitor – cristalizor – semifabricat;

2) influența calității prafurilor de turnare (distribuitor și cristalizor) asupra absorbției de gaze în semifabricatul de oțel turnat continuu;

3) colmatarea tuburilor de imersie în funcție de dezoxidanți utilizați și calitatea prafurilor de turnare (unguente).

## DISIMINARE REZULTATE

- 1.M. Magaon**, S. Șerban, T. Hepuț, “Research on the reduction of the hydrogen content in steels treated in vacuum“, International Conference on Applied Sciences (ICAS) 25-27 May 2016 Hunedoara, ROMANIA, IOP Conference Series – Materials Science and Engineering, Volume 163 Article Number 012015, Published 2017.
- 2.M. Magaon.**, M. Radu., S. Șerban, L. Zgripcea, “Research regarding the vacuuming of steel on the steel degassing“, International Conference on Applied Sciences (ICAS) 10-12 May 2017 Hunedoara, ROMANIA, IOP Conference Series-Materials Science and Engineering.
- 3.M. Magaon**, “Study on behaviour under load for resistance mechanical structures. Analysis and case study – hall for agricultural machinery and storage units”, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 12(4), 2014, pp.359-366, indexed Google Scholars.
- 4. M. Magaon**, A. Rusalinescu, “Functional analysis and technical solutions to achieve the mechanical system of waste collection and disposal beaches”, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 12(4), 2014, pp.311-314, indexed Google Scholars.
- 5.M. Magaon.**, T. Hepuț, “Research on the disposal of hydrogen content from the steel designed for manufacturing steel pipes”, Acte Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering, Hunedoara, 9(4), 2016, pp.87-90, indexed Google Scholars.
- 6.M. Magaon**, M. Vatasescu, T. Hepuț, E. Crișan, “The optimization of the removal process of nitrogen content from steels treated in vacuum facilities”, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2016), 19-25 September 2016 Rodos, Greece, AIP Conference Proceeding Volume 1863, Article number 130007, 2017, indexed SCOPUS.
- 7.M. Magaon**, E. Ardelean, S. Șerban, V. Puțan, “Mathematical modeling of the removal efficiency of hydrogen from steels treated in vacuum facilities”, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2016), 19-25 September 2016 Rodos, Greece, AIP Conference Proceeding Volume 1863, Article number 130006, 2017, indexed SCOPUS.
- 8. M. Magaon**, A. Socalici, S. Șerban, “Researches on the influence of the vacuuming parameter on the gas content in steels”, International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, Banja Luka, 26-27 May 2017, Book of proceedings, pp. 905-915.
- 9. M. Magaon**, D. Milostean, I. Ilca, “Finishing blanks for pipes intended to oil industry”, Conferința Internațională Multidisciplinară Profesor Dorin Pavel – fondatorul hidrotehnicii românești, Știință și Inginerie vol 32, Editura Agir 2017, pp. 287-294.
- 10. M. Magaon**, D. Milostean, I. Ilca, “Tension and deformation state at billet performance for seamless pipes”, Conferința Internațională Multidisciplinară Profesor Dorin Pavel – fondatorul hidrotehnicii românești, Știință și Inginerie vol 32, Editura Agir 2017, pp. 305-310.
- 11. M. Magaon**, L. Zgripcea, “Cercetări privind absorbția gazelor în oțelul lichid”, Simpozion științific studentesc HD 47 STUD, 26-27 Mai, Hunedoara, 2017.



**BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ**

1/1	Hans Jürgen Kerkhoff: ”Stahl an der Grenze der Belastbarkeit Zur Lage der Stahlindustrie in Deutschland und Europa., Rizescu C,...noiembrie 2014, p.3
2/4	***Masuri la nivel comunitar pentru revigorarea industriei siderurgice, Univers Ingineresc nr.: 6/2016, pag. 3, data: 16-31 martie 2016;
3/5	Standardul de firma SF-TMK-03
4/15	Drăgoi, F., Cercetări privind reducerea conținutului de gaze din oțelurile elaborate și tratate pe fluxul tehnologic E.B.T. – LF, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica Timișoara, 2012.
5/18	Pogea, G., Nicolae, A.-“Extinderea bazei de materii prime la elaborarea oțelurilor în cuptorul electric cu arc”, Teza de Doctorat, București 2000.
6/30	Vacu, S., ș.a.- „Elaborarea oțelurilor aliate”, vol II, Editura Tehnică, București, 1983.
7/33	Tripșa, I., Pumnea, C., Dezoxidarea oțelurilor, Editura Tehnică, București 1982.
8/34	Ardelean, E., Cercetări privind îmbunătățirea comportării la deformare a semifabricatelor turnate continuu, Teză de doctorat, Timișoara 2004.
9/32	Geantă, V. (2003). Procedee și tehnologii de rafinare a oțelului, Editura Printech, București, 2003
10/16	Rău, A., Tripșa, I.,- „Metalurgia oțelului”, București, E.D.P. 1981.
11/25	Dragomir, I., Teoria proceselor siderurgice, Editura Didactică și Pedagogică, București 1985.
12/58	Magaon, M., Șerban, S., Hepuț, T., “Research on the reduction of the hydrogen content in steels treated in vacuum“, International Conference on Applied Sciences (ICAS) 25-27 May 2016 Hunedoara, ROMANIA, IOP Conference Series – Materials Science and Engineering, Volume 163 Article Number 012015, Published 2017.
13/61	Magaon, M, A. Rusalinescu, “Functional analysis and technical solutions to achieve the mechanical system of waste collection and disposal beaches”, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara, 12(4), 2014, pp.311-314, indexed Google Scholars.
14/64	Magaon, M.,E. Ardelean, S. Șerban, V. Puțan, “Mathematical modeling of the removal efficiency of hydrogen from steels treated in vacuum facilities”, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2016), 19-25 September 2016 Rodos, Greece, AIP Conference Proceeding Volume 1863, Article number 130006, 2017, indexed SCOPUS.
15/68	M. Magaon, L. Zgripcea, “Cercetări privind absorbția gazelor în oțelul lichid”, Simpozion științific studențesc HD 47 STUD, 26-27 Mai, Hunedoara, 2017.
16/65	M. Magaon, A. Socalici, S. Șerban, “Researches on the influence of the vacuuming parameter on the gas content in steels”, International Conference on Accomplishments in Mechanical and Industrial Engineering, Banja Luka, 26-27 May 2017, Book of proceedings, pp. 905-915.
17/63	Magaon, M.,M. Vatasescu, T. Hepuț, E. Crișan, “The optimization of the removal process of nitrogen content from steels treated in vacuum facilities”, International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2016), 19-25 September 2016 Rodos, Greece, AIP Conference Proceeding Volume 1863, Article number 130007, 2017, indexed SCOPUS.
18/48	Heput, T. Contribuții la morfologia și geneza incluziunilor nemetalice în oțelul elaborat în cuptoare electrice cu arc, Teza de doctorat, Universitatea Politehnica București, 1998.
19/57	Călae, M., Cercetări privind procesele de rafinare a oțelurilor speciale prin metalurgia secundară, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica București, 2007.