

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ**

ing. JOSAN ANA

TEZĂ DE DOCTORAT

**"Studii și cercetări privind creșterea durabilității
cilindrilor de laminare"**

*642. 449
369 E*

**Conducător științific:
Prof.dr.ing. SPOREA ION**

2004

CUPRINS

	Pag.
INTRODUCERE	4
CAPITOLUL I. STADIUL ACTUAL PRIVIND IMPORTANȚA, CARACTERISTICILE CALITATIVE ȘI TEHNOLOGIA DE OBTINERE A CILINDRILOR DE LAMINARE	7
I.1. NOȚIUNI GENERALE.....	7
I.1.1. Elementele componente ale cilindrilor de laminare.....	8
I.1.2. Criterii de clasificare a cilindrilor de laminare.....	9
I.1.2.1. Clasificarea cilindrilor de laminare, în funcție de materialul din care se execută.....	9
I.1.2.2. Clasificarea cilindrilor de laminare, în funcție de structură, duritatea suprafeței de lucru și destinația acestora.....	10
I.1.2.3. Clasificarea cilindrilor de laminare, în funcție de dimensiuni și greutate.....	10
I.1.2.4. Clasificarea cilindrilor de laminare, în funcție de tehnologia de turnare.....	13
I.2. COMPOZIȚIA CHIMICĂ ȘI TRATAMENTUL TERMIC APLICAT CILINDRILOR DE LAMINARE.....	17
I.2.1. Compoziția chimică a cilindrilor de laminare.....	18
I.2.2. Tratamente termice aplicate cilindrilor de laminare.....	18
I.3. CONSIDERAȚII PRIVIND TEHNOLOGIA ACTUALĂ DE FABRICAȚIE A CILINDRILOR DE LAMINARE, TURNAȚI DIN OȚEL HIPEREUTECTOID, TIP ADAMIT.....	20
I.3.1. Definirea aliajelor turnate tip Adamit.....	20
I.3.2. Fluxul tehnologic de fabricație a cilindrilor de laminare, turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara.....	25
I.3.2.1. Executarea formelor.....	25
I.3.2.2. Elaborarea oțelului hipereutectoid.....	31
I.3.2.3. Turnarea și dezbaterea cilindrilor.....	32
I.3.2.4. Curățirea și controlul calității.....	35
I.3.2.5. Eboșarea cilindrilor.....	35
I.3.2.6. Tratamentul termic.....	36
I.3.2.7. Finisarea cilindrilor și recepția finală.....	38
I.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	39
CAPITOLUL II. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR DE MATERIAL PENTRU OȚELUL HIPEREUTECTOID, TIP ADAMIT, DESTINAT TURNĂRII CILINDRILOR DE LAMINARE. ÎNCERCĂRI PRACTICE	40
II.1. CARACTERISTICILE OȚELURILOR HIPEREUTECTOIDE UTILIZATE LA TURNAREA CILINDRILOR DE LAMINARE.....	40
II.2. DETERMINAREA, PE PROBE, A CARACTERISTICILOR MECANICE ALE OȚELULUI HIPEREUTECTOID, TIP ADAMIT (OT-A3), TURNAT LA S.C. SIDERURGICA S.A. HUNEDOARA.....	42
II.3. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE ALE OȚELULUI HIPEREUTECTOID, TIP ADAMIT (OT-A3), PE INELE PRELEVATE DIN CILINDRI TURNAȚI LA S.C. SIDERURGICA S.A. HUNEDOARA.....	54
II.3.1. Prelevarea probelor.....	54
II.3.2. Determinarea durităților înregistrate pe secțiune.....	55
II.3.4. Analiza compoziției chimice.....	57
II.3.5. Determinarea rezistenței la tracțiune.....	59

II.3.6. Analiza microstructurală.....	61
II.3.7. Analiza metalografică a fazelor și constituenților structurali.....	65
II.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	67
CAPITOLUL III. CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA DURABILITĂȚII ÎN EXPLOATARE A CILINDRILOR DE LAMINARE TURNAȚI DIN OȚEL HIPEREUTECTOID, TIP ADAMIT.....	68
III.1. CREAREA UNEI BAZE DE DATE FOLOSIND SGBD MICROSOFT ACCESS, ÎN VEDEREA PRELUCRĂRII DATELOR ÎNREGISTRATE ÎN PRACTICA INDUSTRIALĂ.....	68
III.2. ANALIZA FACTORILOR DE INFLUENȚĂ ASUPRA DURABILITĂȚII CILINDRILOR TIP ADAMIT.....	79
III.2.1. Influența tehnologiei de fabricație asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare.....	79
III.2.1.1. Analiza tehnologiei de elaborare - turnare a cilindrilor.....	79
III.2.1.2. Analiza tehnologiei de tratament termic aplicat cilindrilor de laminare.....	94
III.2.1.3. Influența tehnologiei de fabricație asupra defectelor înregistrate și a fenomenului de uzare.....	96
III.2.2. Influența condițiilor din exploatare asupra durabilității cilindrilor de laminare.....	101
III.2.2.1. Prelucrarea statistico-matematică a datelor analizate.....	101
III.2.2.2. Analiza comportării în exploatare a cilindrilor studiați.....	113
III.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	120
CAPITOLUL IV. SIMULAREA NUMERICĂ A COMPORTĂRII ÎN EXPLOATARE A CILINDRILOR DE LAMINARE, FOLOSIND METODA ELEMENTULUI FINIT.....	122
IV.1. METODA ELEMENTULUI FINIT. NOȚIUNI INTRODUCTIVE.....	122
IV.1.1. Aplicații ingineresti ale metodei elementului finit.....	124
IV.1.4. Elemente finite tridimensionale.....	125
IV.2. OBȚINEREA MODELULUI NUMERIC, CU AJUTORUL METODEI ELEMENTULUI FINIT, A DISTRIBUȚIEI TENSIUNILOR TERMICE ȘI MECANICE ÎN INTERIORUL CILINDRULUI DE LAMINARE, PRECUM ȘI A CAMPULUI TERMIC PE PERIOADA LAMINĂRII.....	129
IV.2.1. Etapele obținerii modelului numeric.....	130
IV.2.1.1. Etapa de preprocesare a modelului numeric.....	130
IV.2.1.2. Etapa de postprocesare a modelului numeric. Obținerea rezultatelor.....	134
IV.2.2. Analiza distribuției de temperatură (câmpuri termice) în cilindrii de laminare.....	134
IV.2.2.1. Determinarea distribuției de temperatură în cazul aplicării apei de răcire pe două suprafețe.....	136
IV.2.2.2. Distribuția de temperatură în cazul laminării la 850°C, cu aplicarea apei de răcire pe patru suprafețe.....	141
IV.2.3. Determinarea stării de tensiune datorită variației de temperatură. Calculul tensiunilor termice produse în cilindrii de laminare.....	145
IV.2.3.1. Determinarea stării de tensiune în cazul aplicării apei de răcire pe două suprafețe.....	147
IV.2.3.2. Calculul tensiunilor termice la 850°C, cu răcirea aplicată pe patru suprafețe.....	156
IV.2.3. Calculul stării de tensiune datorită tensiunii mecanice (cazul de încărcare cu forță pe lățimea calibrului).....	162
IV.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	171
CAPITOLUL V. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE, PERSPECTIVE	172
V.1. CONCLUZII FINALE.....	172
V.2. CONTRIBUȚII PERSONALE.....	174

V.3. PERSPECTIVE.....	177
BIBLIOGRAFIE	178
ANEXE	183
Anexa III.2.1. Codul sursă al SGBD Microsoft Access.....	184
Anexa III.2.2. Grafice și curbe de nivel duble, pentru variațiile $HB=HB(C, Si, Mn)$, respectiv $HB=HB(Cr, Ni, Mo)$	191
Anexa III.2.3. Programul MATLAB pentru studiul variației $HB=HB(C, Si, Mn)$	197
Anexa III.2.4. Programul MATLAB pentru studiul variației $HB=HB(Cr, Ni, Mo)$	200
Anexa IV. Fișierul de date al programului de simulare COSMOS/M 2.5.....	203

INTRODUCERE

Industria metalurgică se confruntă, în prezent, cu dificultatea de a se menține competitivă, în raport cu alte sectoare economice și, în același timp, cu necesitatea de a continua să satisfacă pretențiile tot mai mari ale consumatorilor de oțel concretizate în filozofia economiei de piață, sintetizată în ideea că *obiectivul primordial al unei întreprinderi este acela de a produce și a vinde ceea ce dorește consumatorul, în modul în care acesta dorește, când și unde dorește și la prețul pe care acesta este dispus să-l plătească*. În sensul acestor cerințe, industria metalurgică actuală s-a văzut pusă în situația de a obține, la prețuri cât mai competitive, oțeluri cu caracteristici fizico-mecanice și tehnologice din ce în ce mai restrictive, cerute de exigențele utilizatorilor, care urmăresc consumuri mici și durabilități mari în exploatarea produselor obținute din oțel.

În acest context, șansa revigorării metalurgiei românești stă în cercetarea științifică, care să permită obținerea, cu costuri relativ reduse, a unor perfecționări tehnologice pe baza cărora oțelurile și produsele din oțel să devină competitive pe piață. O pondere importantă în valoarea produselor finite din oțel o reprezintă costurile de laminare, în care consumul de cilindri are un rol preponderent.

Intensificarea proceselor de laminare influențează, în mod direct, durabilitatea cilindrilor de laminare, aceștia fiind cele mai importante elemente componente utilizate în acest domeniu. Eficiența economică a producției de laminate depinde, în mare măsură, de calitatea cilindrilor de laminare, a căror durabilitate în exploatare este determinată de caracteristicile materialului din care aceștia sunt fabricați, caracteristicile materialului ce se laminează și, nu în ultimul rând, condițiile de exploatare.

Durabilitatea scăzută în exploatarea cilindrilor de laminare, care lucrează în condiții de solicitări variabile datorate procesului de deformare (solicitări care se repetă ciclic, la anumite intervale), reprezintă una din cele mai actuale probleme întâlnite în secțiile de laminare ale întreprinderilor metalurgice, fapt pentru care lucrarea de față dorește să răspundă la cât mai multe din problemele legate de acest aspect, creând o punte de legătură între factorii tehnologici și condițiile de exploatare.

Statistica efectuată pe o perioadă de exploatare de 10 ani, evidențiază următoarele consumuri de cilindri [4]:

- 0,08 kg/t oțel laminat, pentru laminoare bluming, slebing
- 0,40 kg/t oțel laminat, pentru laminoarele de semifabricate
- 1,8...2,0 kg/t oțel laminat, pentru laminoarele de profile grele
- 1,5 kg/t oțel laminat, pentru laminoarele de profile mijlocii
- 0,45 kg/t oțel laminat, pentru laminoarele de profile mici
- 0,40 kg/t oțel laminat, pentru laminoarele de sârmă,

ceea ce înseamnă un consum mediu de 0,785 kg/t oțel laminat. Apreciind cantitatea de oțel laminată anual în produse finite la cca. 4 milioane tone, rezultă că sunt necesare aprox. 140 miliarde lei

pentru asigurarea consumului de cilindri, sumă suficient de mare pentru a justifica cercetările privind durabilitatea cilindrilor și, implicit, scăderea consumului acestora, în condițiile de exploatare oferite de nivelul tehnologic al întreprinderilor românești [4],[80],[103].

Practica industrială a arătat faptul că 12,5% dintre cilindrii aflați în exploatare ies prematur din uz, datorită unor defecte (ruperi, uzări accentuate, fisuri, exfolieri etc.), ceea ce conduce, pe de o parte, la o creștere a consumului de cilindri și, pe de altă parte, la dereglarea întregului flux de laminare [80],[103].

Toate cele prezentate anterior arată faptul că abordarea problemei creșterii durabilității cilindrilor de laminare este pe deplin motivată.

Teza de doctorat cu titlul "**Studii și cercetări privind creșterea durabilității cilindrilor de laminare**" este structurată pe cinci capitole.

Capitolul I, intitulat "**Stadiul actual privind importanța, caracteristicile calitative și tehnologia de obținere a cilindrilor de laminare**" cuprinde noțiuni generale privitoare la criteriile de clasificare a cilindrilor de laminare, compoziție chimică, respectiv tratament termic aplicat acestora. În particular, în cadrul acestui capitol, este prezentat întregul flux tehnologic actual de fabricație a cilindrilor de laminare din oțel hipereutectoid, tip Adamit, la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara.

Datorită faptului că literatura de specialitate este destul de "săracă" în informații legate de caracteristicile oțelului hipereutectoid tip Adamit, în capitolul II, intitulat "**Determinarea caracteristicilor de material pentru oțelul hipereutectoid, tip Adamit, destinat turnării cilindrilor de laminare. Încercări practice**" se încearcă rezolvarea acestui aspect, prin încercări practice efectuate în două direcții și anume, pe probe cilindrice, prelevate la turnare și pe inele-probă prelevate de pe cilindri ce urmează a intra în exploatare. Pe aceste probe au fost determinate compozițiile chimice, caracteristicile mecanice și microstructurale.

În capitolul III, "**Cercetări privind creșterea durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit**" sunt utilizate diverse programe grafice și de calcul (SGBD al Microsoft ACCESS, MATLAB 5.0, EXCEL, AUTOCAD 2D, 3D), în vederea studiului influenței diferiților factori (tehnologici și de exploatare) asupra durabilității cilindrilor de laminare. Analizele sunt efectuate cu ajutorul statisticii-matematice și a corelațiilor matematice. Sunt trasate grafice de dependență și variație a factorilor de influență asupra durabilității cilindrilor de laminare.

În capitolul IV, intitulat "**Simularea numerică a comportării în exploatare a cilindrilor de laminare, folosind metoda elementului finit**", având la bază datele înregistrate în practica industrială, este efectuată o simulare a procesului de laminare la cald a profilului I, pentru punerea în evidență a distribuțiilor de temperatură, a tensiunilor termice și mecanice înregistrate în cilindri în timpul procesului de laminare. Simularea s-a efectuat cu ajutorul programului COSMOS/M versiunea 2.5., pentru diferite condiții de exploatare.

Capitolul V, "**Concluzii finale, contribuții personale, perspective**" cuprinde o sintetizare a concluziilor generale și punctează contribuțiile personale ale autoarei.

Lucrarea se poate considera de utilitate practică imediată, înscriindu-se în contextul valorificării, din punct de vedere tehnic, a perfecționării tehnologiilor de fabricație pentru cilindrii turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit și creșterea durabilității în exploatare a acestora, precum și în tendințele moderne de înlocuire treptată a evenimentelor fizice cu cele numerice în domeniul optimizării proceselor tehnologice din practica industrială. Una din metodele de cercetare alese, respectiv simularea numerică, este una din cele mai moderne și mai folosite metode la ora actuală în munca de cercetare inginerescă, cu o mare perspectivă de viitor.

În primul rând, doresc să adresez cele mai calde mulțumiri conducătorului științific, domnului prof.dr.ing. Sporea Ion, pentru sugestiile, sfaturile pline de profesionalism și încrederea acordată pe întreg parcursul elaborării tezei.

Totodată, doresc să adresez mulțumiri colegilor de la catedra Tehnologie Mecanică, din cadrul Facultății de Mecanică a Universității "Politehnica" Timișoara și domnilor profesori care au făcut parte din comisiile pentru susținerea examenelor și referatelor, pe toată perioada de stagiu.

De asemenea, doresc să mulțumesc tuturor colegilor de la Facultatea de Inginerie din Hunedoara care, în mod direct sau indirect, au fost alături de mine în realizarea acestui demers, precum și d-lui ing. Vlad Iosif și d-lui ing. Borcea Ioan, de la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, pentru tot sprijinul și ajutorul acordat.

Cele mai sincere mulțumiri doresc să le adresez d-lui. prof. Robert Lidner, fără de care ziua de astăzi nu ar fi fost posibilă, pentru exemplul de viață care a fost și este pentru mine, precum și pentru încrederea pe care mi-a transmis-o de-a lungul anilor.

În final, dar nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc soțului meu Alin și fetiței mele Diana, pentru dragostea, răbdarea și înțelegerea de care au dat dovadă, pentru sprijinul și încurajările permanente.

CAPITOLUL I

STADIUL ACTUAL PRIVIND IMPORTANȚA, CARACTERISTICILE CALITATIVE ȘI TEHNOLOGIA DE OBȚINERE A CILINDRILOR DE LAMINARE

I.1. NOȚIUNI GENERALE

Prin *laminare* se înțelege procesul de prelucrare plastică (la cald sau la rece) ce se realizează între cilindrii de laminare care se rotesc în sens contrar (*laminare longitudinală*) sau în același sens și cu axele înclinate (*laminare elicoidală*), antrenând astfel, prin frecare, materialul metalic în zona în care are loc deformarea [20],[102]. Tot în acest context, se poate vorbi și despre *laminarea transversală*, ca fiind un procedeu de laminare caracterizat prin laminarea materialului cu axa longitudinală perpendiculară pe direcția de laminare, lungimea produsului rezultând din lățirea inițială a materialului, iar lățirea din alungirea acestuia. Aproximativ 90% din produsele laminate se realizează prin laminare longitudinală (fig.I.1) [102].

Utilajul de lucru poartă denumirea de *laminor*, iar produsul rezultat se numește *laminat*.

Laminarea este un procedeu larg răspândit, peste 75% din producția mondială de oțel fiind prelucrată prin laminare, aceasta aplicându-se industrial de la sfârșitul secolului XVIII [102]. Conform literaturii de specialitate,[20], scopurile laminării sunt următoarele:

- să transforme materialul metalic (lingoul sau semifabricatul) în profile de secțiune dorită, din care pot fi prelucrate ulterior piese de mașini sau pot fi folosite direct în construcții, instalații etc;
- să schimbe structura grosolană, rezultată în urma turnării, într-o structură fină (cu grăunți mici), care favorizează obținerea caracteristicilor ridicate.

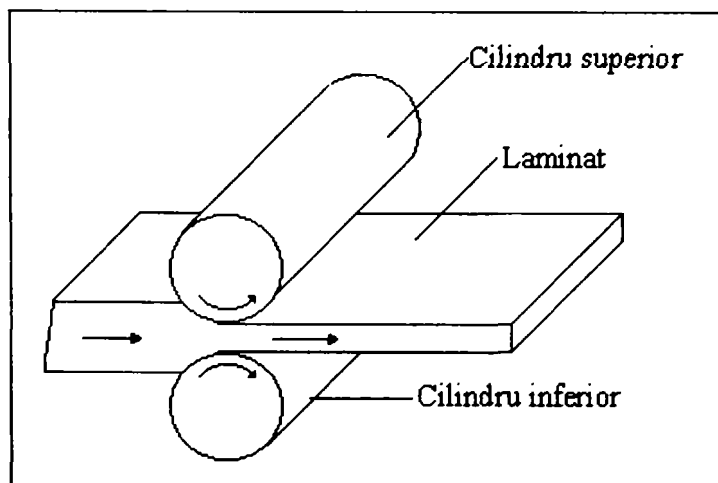


Figura I.1. Reprezentarea schematică a procedurii de laminare longitudinală cu doi cilindri cu tăblie netedă (caje cu cilindri orizontali).

În timpul laminării, materialele metalice își modifică dimensiunile, în sensul că se reduc în direcția presării de către cilindri și cresc în celelalte două direcții, mai ales în direcția de avans a acestuia. (fig.I.2). Astfel, dimensiunile laminatului înainte de laminare sunt h_0 , b_0 și l_0 , iar după laminare - h_1 , b_1 și l_1 .

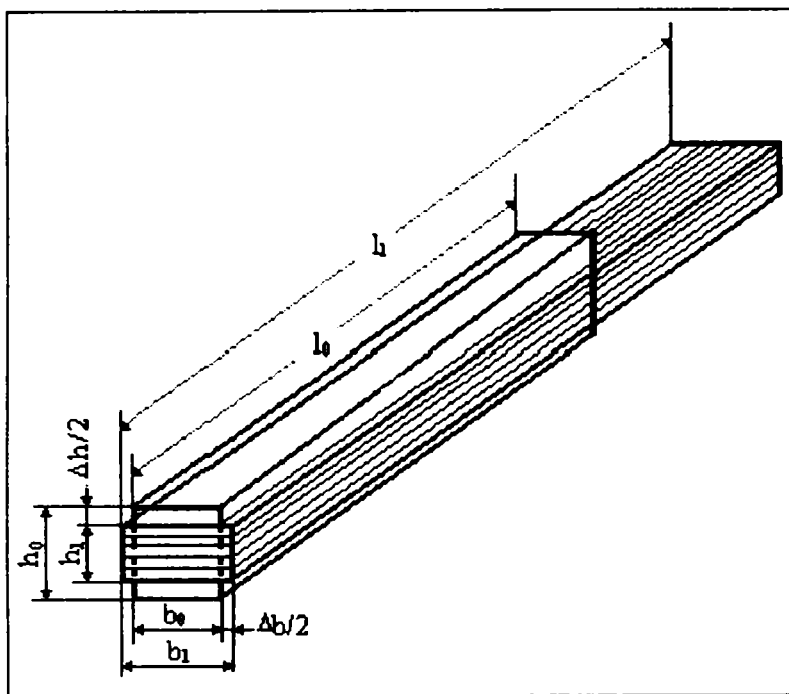


Figura I.2. Modificarea dimensiunilor materialului în procesul de laminare.

I.1.1. Elementele componente ale cilindrilor de laminare

Părțile componente ale unui cilindru de laminare sunt prezentate în fig. I.3 [6], [9], [102].

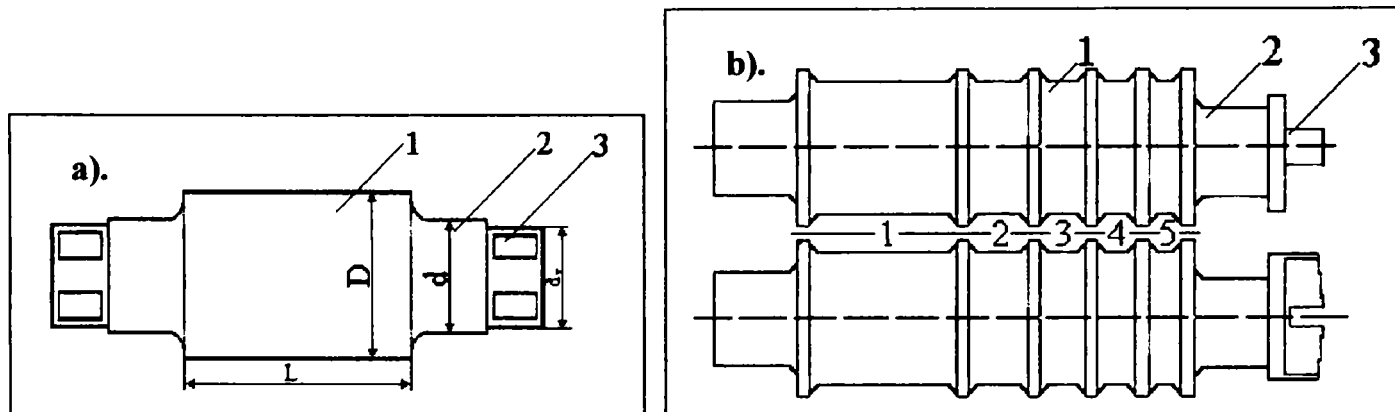


Figura I.3. Cilindru de laminare:

a). cu tăblie netedă: 1-tăblie; 2-fus; 3- cap de cuplare (rozetă); b). cu tăblie profilată (cu calibre: 1.2.3.4.5)

Elementele principale care caracterizează cajele de laminare sunt diametrul cilindrului (în cazul laminoarelor de profile), respectiv lungimea tăbliei (în cazul laminoarelor de tablă și benzi). Conform fig. I.3. părțile componente ale unui cilindru de laminare sunt tăblia, fusurile și capetele de cuplare.

Tăblia reprezintă suprafața cilindrului care vine în contact cu materialul supus laminării și este caracterizată prin diametrul D și lungimea L . Poate fi netedă, pentru laminarea tablelor și benzilor (fig.I.3a), prevăzută cu caneluri (calibre) sau de formă specială, pentru laminarea profilelor și a altor produse (fig.I.3b).

De o parte și de alta a tăbliei, cilindrii de laminare sunt prevăzuți cu *fusuri*, prin intermediul cărora se sprijină pe lagăre. La cele două extremități, cilindrul de laminare are o formă specială (*capete de cuplare*), care îi permite să se cupleze cu barele de antrenare, în vederea recepționării mișcării de rotație (capetele fusurilor pot fi sub formă de rozetă, pentru cuplarea cu bare cu rozete și manșoane, sau sub formă prismatică, pentru cuplarea cu bare universale). În unele cazuri, cu cel de-al doilea cap de cuplare, cilindrul poate transmite mișcarea de rotație cilindrilor altor caje de laminare.

I.1.2. Criterii de clasificare a cilindrilor de laminare

Marea diversitate a produselor laminate și condițiile diferite de lucru au determinat crearea unei game extrem de largi de cilindri. Pe lângă condițiile tehnice de lucru și de exploatare, la alegerea corectă a cilindrilor se ține seama, mai ales, de durabilitatea cilindrilor în exploatare (rezistența la uzare și la ruperi). Pentru a obține o durabilitate maximă a cilindrilor de laminare, este necesar să se stabilească o corelație optimă între condițiile de exploatare și calitate.

Astfel, cilindrii de laminare pot fi clasificați în funcție de: materialul din care se execută, domeniul de utilizare, duritatea suprafeței de lucru, structură metalografică, dimensiuni, tehnologia de turnare.

I.1.2.1. Clasificarea cilindrilor de laminare, în funcție de materialul din care se execută

Clasificarea cilindrilor de laminare, în funcție de materialul din care se execută, este prezentată în fig. I.4 [69].

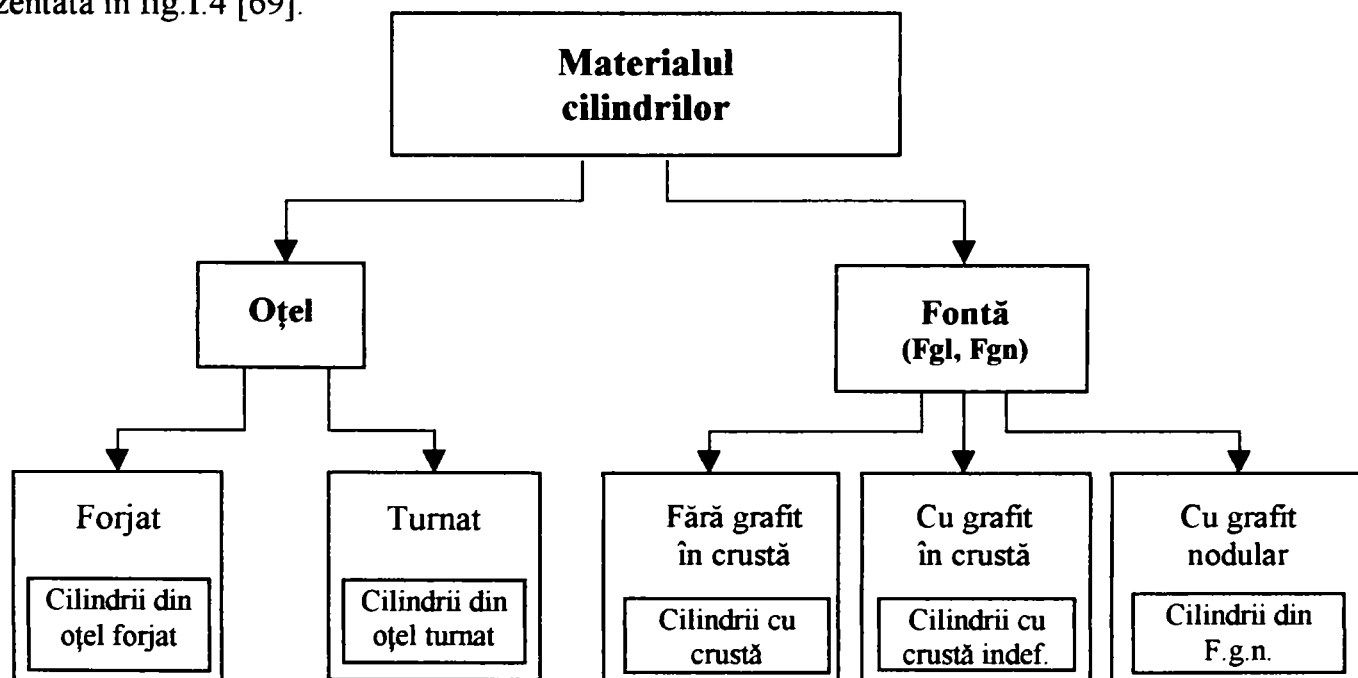


Figura I.4. Clasificarea cilindrilor, în funcție de materialul din care se execută.

O categorie aparte o reprezintă cilindri turnați din oțel cu conținut ridicat de carbon (1,7 - 2,2%), tip *ADAMIT*. Ca material, acesta se încadrează din punct de vedere al compoziției chimice, în domeniul oțelurilor hipereutectoide aliate cu Ni, Cr, Mo și, ca atare, trebuie să i se aplice și

operații de tratament termic. Prin apariția grafitului punctiform, ca efect al tratamentului termic de recoacere, structural are tangență și cu fontele.

1.1.2.2. Clasificarea cilindrilor de laminare în funcție de structură, duritatea suprafeței de lucru și destinația acestora

Clasificarea cilindrilor de laminare în funcție de structura aliajului în zona suprafeței de lucru caracterizează cel mai bine comportarea cilindrului în exploatare, în condițiile date de laminare. Acest criteriu de clasificare ține seama atât de micro și macrostructura aliajului la suprafața de lucru a cilindrului, cât și de variația acestora pe secțiune, precum și de uniformitatea structurii în diferite zone ale cilindrului.

Din punct de vedere al durității tăblii, cilindri de laminare se clasifică astfel [96]:

- cilindri moi, cu duritatea Brinell HB = 150 - 300, executați din oțel turnat sau din fontă cenușie;
- cilindri semiduri, cu duritatea Brinell HB = 300 - 425, executați din oțel sau din fontă semidură;
- cilindri duri, cu duritatea Brinell HB = 425 - 525, executați din oțel aliat sau din fontă dură;
- cilindri extraduri, cu duritatea Brinell HB = 525 - 700, executați din oțel aliat cu crustă dură.

În funcție de operațiile distincte de laminare, cilindrii sunt degrositori (moi sau semiduri), respectiv finisori (duri sau extraduri), iar după rolul pe care îl îndeplinesc, în cadrul cajei de laminare, aceștia sunt de lucru, respectiv de sprijin.

Cilindrii metalurgici se utilizează în industria siderurgică pentru:

- laminarea tablei de orice grosime;
- laminarea profilelor din orice tip de metal, inclusiv șinele și grinzile (de această grupă aparțin și cilindrii pentru laminarea țevelor).

Clasificarea laminoarelor după destinație este prezentată în tab.I.1, [20].

1.1.2.3. Clasificarea cilindrilor în funcție de dimensiuni și greutate

Din punctul de vedere al dimensiunilor, cilindrii de laminare sunt de o mare diversitate, diametrele cilindrilor metalurgici fiind cuprinse între 270 și 1700 mm. Pe plan mondial, diametrele cilindrilor pot atinge valori de 2500 mm. De asemenea, lungimile tăbliilor sunt cuprinse între 276-3300 mm, (ajungându-se, pe plan mondial, până la 5000 mm) [92].

Astfel, conform [92], cilindri de laminare se clasifică, în funcție de diametrul D și greutatea G , în:

- cilindri mici, cu: $D < 350$ mm, respectiv $G < 1000$ kg;
- cilindri mijlocii, cu: $D = 350 - 600$ mm, respectiv $G = 1000 \dots 7500$ kg;
- cilindri mari, cu: $D = 600 - 1000$ mm, respectiv $G = 7500 \dots 20000$ kg;
- cilindri foarte mari, cu: $D > 1000$ mm, respectiv $G > 20000$ kg.

Pentru caracterizarea și mai completă a cilindrilor din punct de vedere a dimensiunilor și, mai ales, a formei constructive, este utilă clasificarea în funcție de coeficientul constructiv $S = D_{cil} / L_{tăblie}$ (numit *coeficient de svelțețe*). În funcție de acest coeficient, cilindrii se clasifică în:

- cilindri subțiri, cu $S < 0,4$;
- cilindri mijlocii, cu $S = 0,4 - 0,8$;
- cilindri groși, cu $S > 0,8$.

Tabelul I.1. Clasificarea laminoarelor după destinație.

Grupa de laminoare	Denumirea laminorului	Caracteristica laminorului	Destinația laminorului	Exemple de laminoare din România	
Laminare degrositoare	Bluminguri	ϕ 800 + 1450 mm	Laminarea lingourilor în blumuri*	Bluming ϕ 1300mm și ϕ 1000mm la S.C.Siderurgica S.A. Hunedoara	
	De semifabricate	Slebinguri	ϕ 1100 ÷ 1200 mm	Laminarea lingourilor în sleburi**	Slebing 1150mm la Laminorul ISPAT Sidex Galați,
		Laminare continue cu un singur tren	ϕ 700 mm	Laminarea blumurilor în țagle***	-
			Idem, cu două trenuri de laminare	ϕ 550/450 mm ϕ 750/550 mm	Laminarea blumurilor în țagle pentru țevi
Laminare de profile	Laminare continue pentru semifabricate de țevi	ϕ 750 ÷ 1000 mm	Laminarea blumurilor în țagle pentru țevi	-	
		Laminare universale de grinzi	ϕ 1100 ÷ 1350 mm	Laminarea blumurilor în profile grele	-
	Grave	Laminare în linie de șine și grinzi	ϕ 800 mm	Laminarea lingourilor și blumurilor în șine, grinzi și profile grele	Laminare ϕ 800 de la S.C.Siderurgica S.A. Hunedoara și C.S.Reșița
		Laminare trio în linie	ϕ 650 mm	Laminarea blumurilor în profile grele	Laminorul ϕ 650 Siderurgica Hid.
		Laminare în serie	ϕ 500 ÷ 750 mm	Idem	-
	Mijlocii	Laminare discontinue	ϕ 350 ÷ 500 mm	Laminarea țagelor în profile mijlocii	Laminorul ϕ 475 de la C.S.Reșița
		Laminare continue	ϕ 300 ÷ 350 mm	Laminarea	Laminorul ϕ 450 de la S.C.Siderurgica S.A. Hunedoara
	Ușoare și sârmă	Laminare discontinue	ϕ 300 ÷ 350 mm	Laminarea	Laminare ϕ 800 la C.S.Reșița, Oțelul Roșu, I.S.Cimpia Turzii
		Laminare semicontinue	ϕ 250 ÷ 300 mm	țagelor în profile ușoare și sârmă	Laminorul de sârmă de la Brăila
		Laminare continue	ϕ 250 ÷ 400 mm	Prod. profile prin îndoirea benzilor	Laminorul de profile S.C.Siderurgica S.A. Hunedoara, Laminorul de sârmă S.C.Siderurgica S.A. Hunedoara
Instalații pentru profile îndoite		-	Laminarea lingourilor în table foarte groase	La Uzina Metalurgică Iași	
Groase	Laminor de blindeje	Lung. tablei cilindricului 4000-5000mm	Laminarea	-	
	Laminor cu o caje cuarto	L = 3500 ÷ 4000mm	Laminarea	-	
	Laminor cu două caje cuarto	L = 2800 ÷ 3500mm	Laminarea	Laminorul 3300 ISPAT Sidex Galați	
	Laminor semicontinuu	L = 1700 ÷ 2800mm	tablelor groase din lingouri și sleburi	-	
	Laminor cu una sau două caje trio	L = 1200 ÷ 2500mm	Laminare	-	
Subțiri	Laminare în linie	L = 800 ÷ 1200mm	Laminarea tablelor subțiri din platine	Laminorul ISPAT Sidex Galați, Oțelul Roșu, Nădrag	
	Laminare continue	L = 1200 ÷ 2500mm	Laminarea sleburilor în benzi	Laminorul 1700mm de la ISPAT Sidex Galați	
	Laminare reversibile Steckel	L = 100 ÷ 1200mm	Laminarea platbenzilor în benzi subțiri	-	

Tabelul I.1. (continuare)

Grupa de laminoare	Denumirea laminorului	Caracteristica laminorului	Destinația laminorului	Exemple de laminoare din România
Laminoare de țevi	Laminoare de țevi fără sudură laminate la cald	Diametrul țevii D = 60 - 426 mm	Laminarea țevilor fără sudură din semifabricate rotunde sau pătrate	Laminorul ϕ 400 Roman 6" și 3" de la Intreprinderea "Republica"
	Laminoare de țevi laminate la rece	D \leq 150 mm	Laminarea țevilor la rece din țevi laminate la cald	Laminoarele Pilașer de la Intreprinderea "Republica"
	Laminoare de țevi sudate pe generatoare	D = 5 - 1200 mm	Formarea țevilor din benzi laminate la cald sau la rece și sudarea pe generatoare	Intreprinderea Metalurgică Iași
	Laminoare de țevi sudate elicoidal	D = 150 - 3000 mm	Idem cu sudură elicoidală	Intreprinderea de țevi sudate București
	Laminoare de roți pentru cale ferată		Laminează roți CF din calupuri debitate din lingouri	Intreprinderea din Balș
	Laminoare de roți și bandaje pentru căi ferate		Idem	Laminorul de la C.S. Reșița
Laminoare cu destinație specială	Laminorul de bile		Laminează bile din bare rotunde	-
	Laminor de roți dințate		Laminează roți dințate cilindrice sau conice din semifabricate forjate și laminate	-
	Laminoare de șuruburi		Laminează șuruburi din bare rotunde	-
	Laminoare de profile periodice		Laminează diferite piese din semifabricate	-

* *Blumurile* sunt semifabricate (produse intermediare obținute din laminarea lingourilor, destinate unei prelucrări ulterioare prin deformare plastică) cu secțiunea pătrată și lungimea minimă a laturii de 150 mm sau apropiată de aceasta (cu raport între laturi mai mic de 2);

** *Sleburile* sunt semifabricate cu secțiunea dreptunghiulară; au grosimea minimă de 80 mm, iar lățimea minimă 1800 mm;

*** *Țagălele* pot fi pătrate sau plate; *țagălele pătrate* sunt semifabricate cu secțiunea pătrată, cu dimensiunea de 140 x 140 până la 40 x 40, iar *țagălele plate* sunt semifabricate plate, destinate relaminării în bare și benzi, având lățimea minimă de 140 mm, maximă de 280 mm iar grosimea între 35...70 mm.

I.1.2.4. Clasificarea cilindrilor de laminare, în funcție de tehnologia de turnare

În vederea obținerii caracteristicilor mecanice dorite, pentru turnarea cilindrilor de laminare se adoptă diverse metode și tehnologii de turnare. Tehnologia de turnare este subordonată scopului de utilizare a cilindrilor, care trebuie să fie în concordanță cu compoziția chimică și proprietățile de turnare ale aliajelor. Ea urmărește realizarea formei și dimensiunilor, asigurând caracteristicile structurale și proprietățile impuse părților componente ale cilindrilor. Ținând-se cont de aceste aspecte, criteriile de clasificare a cilindrilor de laminare, din punctul de vedere al metodelor și tehnologiilor de turnare, au în vedere echipamentele utilizate la formare, modul de alimentare cu aliaj lichid a formelor precum și tehnologia propriu-zisă de turnare, acestea fiind prezentate în continuare.

Astfel:

- în funcție de echipamentele utilizate la formare, turnarea cilindrilor de laminare se poate executa:
 - în forme clasice, executate din amestec de formare (fig.I.5)
 - în forme de turnare combinate (fig.I.6), compuse din:
 - forme metalice (cochile) - pentru partea de lucru a cilindrilor (tăblie)
 - forme obișnuite (din amestec de formare) - pentru fusuri și masele

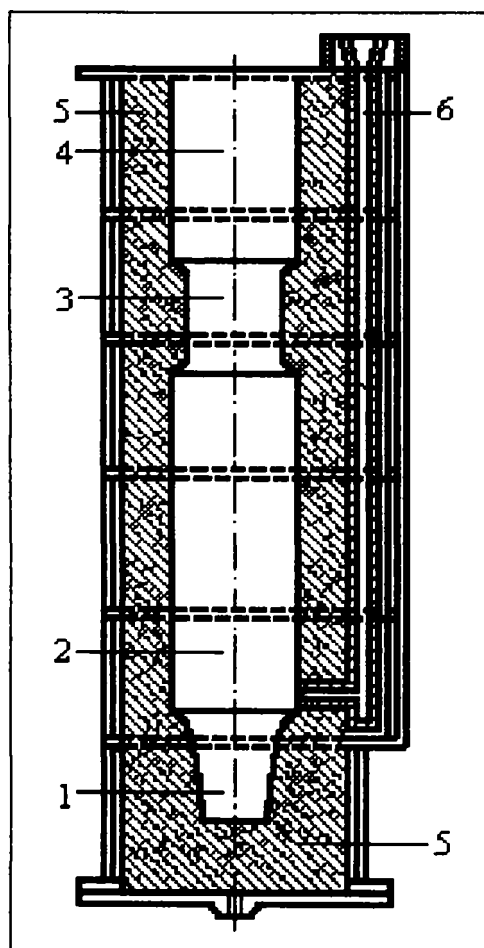


Figura I.5. Formă clasică (executată din amestec de formare) pentru turnarea cilindrilor de laminare:
 1-fus inferior; 2-tăblie; 3-fus superior;
 4-maselotă; 5-amestec de formare;
 6-rețea de turnare

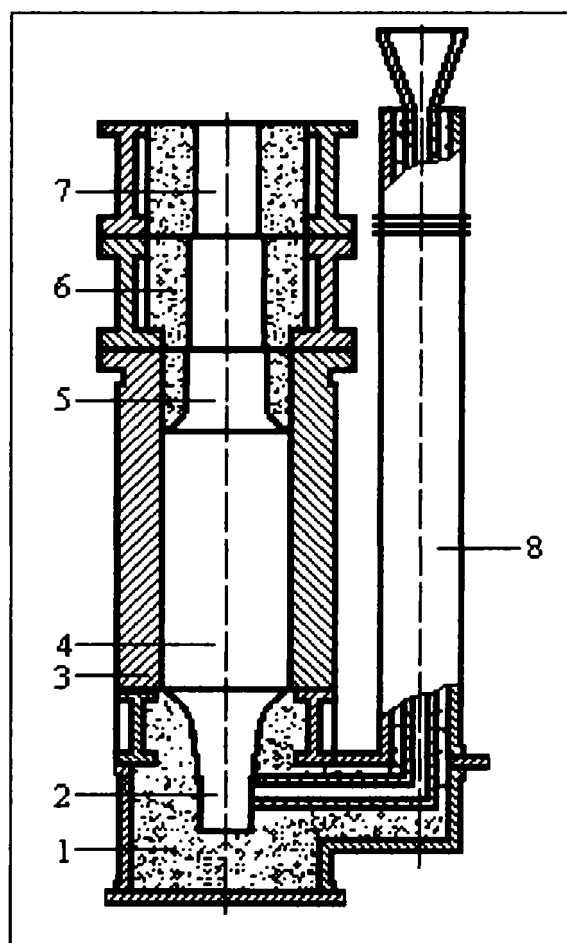


Figura I.6. Formă combinată pentru turnarea cilindrilor de laminare:
 1-ramă de formare, pentru fusul inferior; 2-fus inferior;
 3-cochilă (formă metalică); 4-tăblie; 5-fus superior;
 6-ramă de formare, pentru fusul superior; 7-maselotă;
 8-rețea de turnare

- în funcție de modul de alimentare cu aliaj lichid, cilindrii de laminare se pot obține prin:
 - *turnare indirectă* (atac tangențial, la baza fusului inferior), situație prezentată în fig.I.7.

De regulă, rețelele de turnare tangențiale asigură obținerea unor suprafețe de bună calitate ale pieselor turnate, lipsite de incluziuni nemetalice [6],[99].

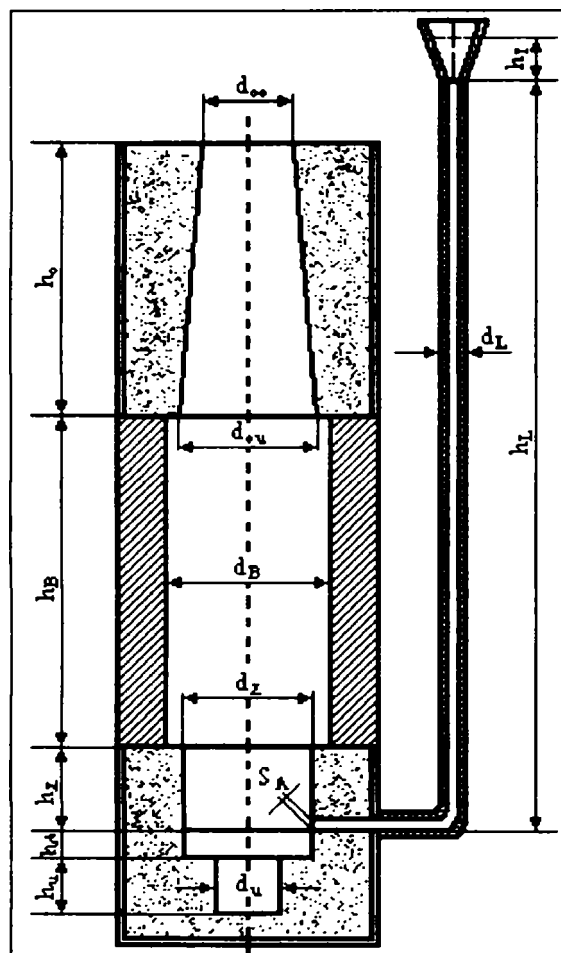


Figura I.7. Formă pentru turnarea indirectă a cilindrilor de laminare:

- h_o - lungimea fusului superior
- h_B - lungimea tăbliei cilindricului
- h_z - înălțimea fusului de la canalul de alimentare până la capătul inferior al tăbliei
- h_u - înălțimea fusului de la treflă până la canalul de alimentare
- h_u - înălțimea treflei inferioare
- d_o - diametrul la capătul superior al fusului superior
- d_{ou} - diametrul la capătul inferior al fusului superior
- d_B - diametrul tăbliei
- d_z - diametrul fusului
- S_A - secțiunea canalului de alimentare
- d_u - diametrul treflei
- h_T - înălțimea de umplere în pâlnia de turnare
- d_L - diametrul canalului de alimentare
- h_L - înălțimea canalului de turnare de la ieșirea din pâlnie până la canalul de alimentare

- *turnare directă* (prin maselotă), situație prezentată în fig.I.8. (turnarea aliajului se execută pe la partea superioară a ansamblului de turnare, prin intermediul unei pâlnii de turnare).

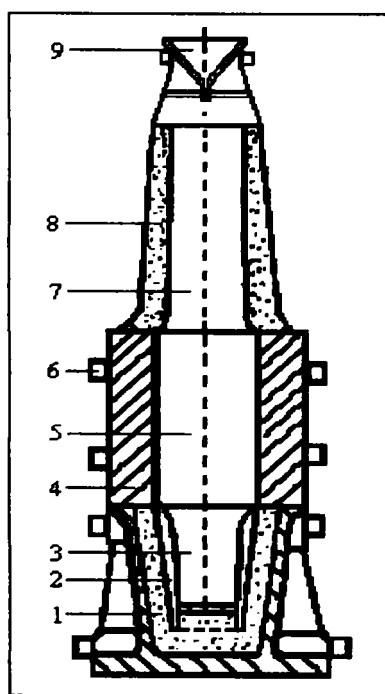


Figura I.8. Formă pentru turnarea directă a cilindrilor de laminare:

- 1 - forma fusului inferior
- 2 - cochila fusului inferior
- 3 - fus inferior
- 4 - forma metalică (cochilă)
- 5 - tăblia cilindricului
- 6 - urechi de prindere
- 7 - fus superior
- 8 - forma fusului superior
- 9 - pâlnie de turnare

➤ *în funcție de tehnologia de turnare*

Schematic, tehnologiile de turnare, sunt prezentate în fig.I.9,[69]:

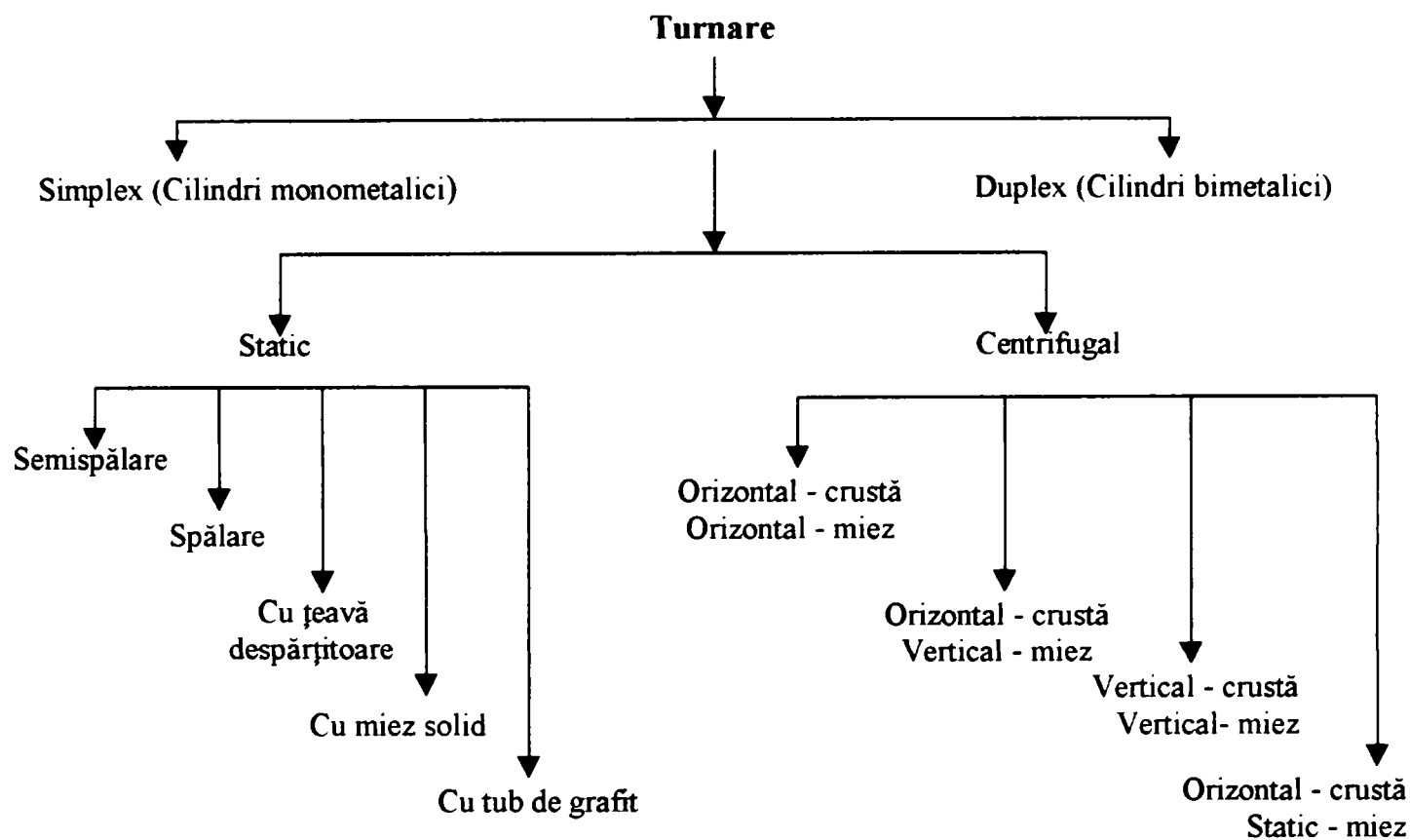


Figura I.9. Clasificarea tehnologiilor de turnare a cilindrilor de laminare.

Ținându-se cont de schema prezentată mai sus, cilindri de laminare, în funcție de tehnologia de turnare folosită (statică sau centrifugală), pot fi:

- cilindri de laminare turnați static, simplex (cu un singur tip de aliaj), numiți cilindri monometalici;
- cilindri de laminare turnați static, duplex (cu două tipuri de aliaj), numiți cilindri bimetalici; acest tip de turnare se mai numește turnare compound;
- cilindri de laminare turnați centrifugal, duplex.

Metodele de turnare simplex, duplex și centrifugal a cilindrilor de laminare vor fi prezentate în cele ce urmează.

Procedeul simplex de turnare a cilindrilor de laminare - constă în turnarea cilindrilor dintr-o singură calitate de aliaj, cea mai utilizată metodă fiind turnarea prin sifon. Procesul de turnare se desfășoară în trei perioade, prezentate în fig.I.10.

Procedeul duplex de turnare a cilindrilor de laminare - constă în turnarea cilindrilor din două calități de aliaj (de exemplu, fonta primară, aliată, pentru crustă și fonta secundară, nealiată, pentru miez sau oțel Adamit, pentru crustă și fontă cenușie aliată sau fontă cu grafit nodular, pentru miez). Prin acest procedeu (fig.I.11) se pot obține durități mari pe tăblie, fapt care nu duce la creșterea durității fusurilor, deoarece acestea sunt turnate din fontă slab aliată sau nealiată.

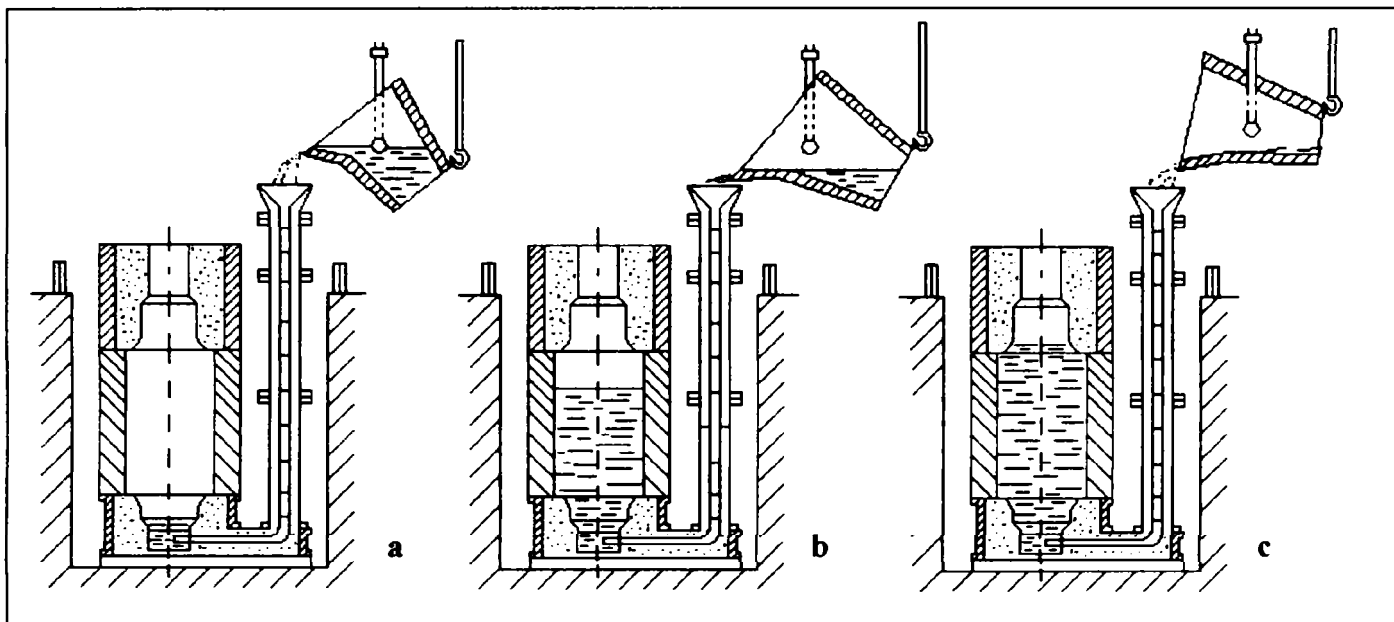


Figura I.10. Schema de turnare simplă a cilindrilor de laminare: *a* - perioada I - acoperirea secțiunii alimentatorului (cu viteză mică); *b* - perioada II - umplerea cu metal a formei fusului inferior, a tăbliei și a fusului superior (cu viteză mare); *c* - perioada III - umplerea maselotei cilindricului (cu viteză redusă).

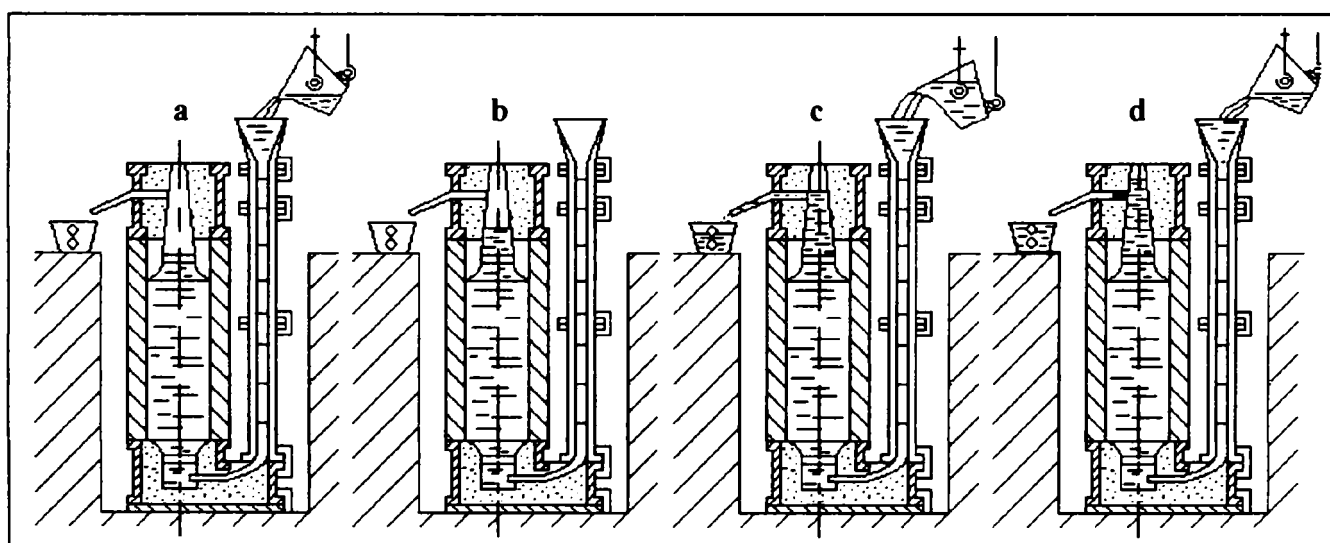


Figura I.11. Schema procedurii duplex de turnare a cilindrilor de laminare: *a* - turnarea aliajului primar; *b* - menținerea aliajului primar în vederea solidificării crustei; *c* - turnarea aliajului secundar (spălarea fusurilor și miezului); *d* - astuparea orificiului de scurgere și continuarea umplerii maselotei cu aliaj secundar.

Turnarea centrifugală a cilindrilor de laminare

Cilindri turnați centrifugal, în comparație cu cei turnați prin metodele statice, posedă o înaltă rezistență la uzare, rezistență ridicată la temperaturile de lucru, precum și o mare rezistență la rupere. Aceste avantaje sunt determinate de o structură fină, densă și stabilă a crustei, precum și de folosirea în miez a unor fonte de înaltă rezistență (Fgn) sau oțeluri.

Dintre mașinile de turnare centrifugale, cea mai largă răspândire o au acelea cu axul orizontal de rotație. Mașina cu ax orizontal, prezentată în fig.I.12, este destinată turnării cilindrilor de laminare cu diametre de 200 - 450mm și lungimea totală de 400-2000mm [6], iar forma pentru turnarea centrifugală a cilindrilor este prezentată în fig.I.13.

În cazul turnării centrifugale a cilindrilor bimetalici, inițial se toarnă metalul lichid ce asigură obținerea crustei dure, de o grosime determinată.

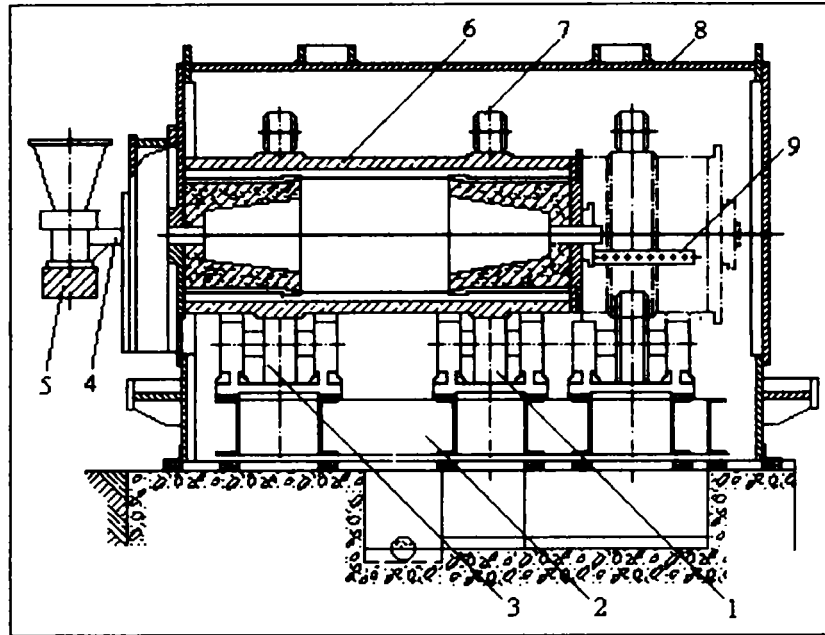


Figura I.12. Mașina pentru turnarea centrifugală a cilindrilor pentru laminoarele de profile mici și a rotelor pentru țevi: 1-perechi de role din oțel pentru susținerea cochilei; 2-ramă turnată din oțel, sau sudată; 3-rolă motoare; 4-sistem de turnare; 5-consolă pivotată; 6-cochilă turnată din oțel sau fontă; 7-rolă de presare; 8-manta metalică; 9-țevă dotată pe generatoare cu orificii care asigură răcirea cu apă a cochilei în timpul și după turnarea cilindrilor.

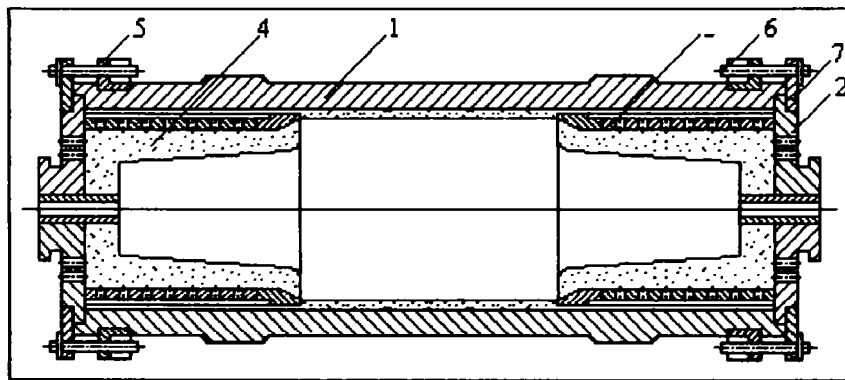


Figura I.13. Formă pentru turnarea centrifugală a cilindrilor de laminare.

- 1-plățile frontale ale oțelului;
- 2-capace de închidere a cochilei;
- 3-cochile pentru obținerea fusurilor;
- 4-forma fusurilor;
- 5-inel de prindere;
- 6-bolțuri de fixare;
- 7-inelele exterioare de prindere.

Între turnarea stratului de lucru (cruste) și începutul turnării aliajului pentru miez se face o întrerupere, pentru a permite solidificarea parțială a metalului. Durata întreruperii depinde de grosimea stratului termoizolant, masa și grosimea crustei, de carbonul echivalent, gradul de supraîncălzire a aliajului. Temperatura aliajului destinat turnării miezului cilindrilor trebuie să fie cu 30-40°C mai scăzută decât temperatura aliajului destinat obținerii tăbliei. Dacă temperatura aliajului din care se toarnă miezul este prea înaltă atunci, la întreruperea prea scurtă a turnării, are loc spălarea crustei, urmată de pătrunderea elementelor de aliere în miezul cilindrilor, iar dacă temperatura este prea joasă sau întreruperea turnării prea lungă, atunci crusta nu se sudează cu miezul cilindrilor.

I.2. COMPOZIȚIA CHIMICĂ ȘI TRATAMENTUL TERMIC APLICAT CILINDRILOR DE LAMINARE

Condițiile tehnice impuse cilindrilor de laminare sunt foarte diferite și, adesea, contradictorii. Astfel, duritatea ridicată a crustei corelată cu rezistențele mecanice și la temperatură înaltă ridicate, precum și adesea cu reziliențe mai ridicate ale metalului din miez, fusuri și trefle sunt destul de dificil de obținut. De aceea, trebuie acordată o deosebită atenție compoziției chimice, aceasta având un rol determinant în obținerea

642. 449
369 E¹⁷

structurii dorite. Din aceleași motive, asimilarea de noi sortimente de cilindri și de aliaje cu proprietăți ridicate în exploatare a determinat aplicarea, pe scară largă, a tratamentelor termice.

1.2.1. Compoziția chimică a cilindrilor de laminare

Compoziția chimică a aliajului din care se toarnă cilindri de laminare este unul din factorii principali care contribuie la obținerea proprietăților de utilizare. Aceasta determină macro și microstructura, după o eventuală prelucrare în stare lichidă, modificare în condiții dirijate de solidificare și răcire și, în unele cazuri, după tratament termic. În cilindrii turnați din fonte și oțeluri, în afară de fier și elementele obișnuite (carbon, siliciu, mangan, fosfor, sulf) se mai găsesc: crom, nichel, molibden, precum și combinații (compuși) ai ceriului, calciului, aluminiului, borului, titanului.

În condiții de răcire rapidă, *carbonul* din aliajele Fe-C formează carbura de fier (cementita), iar în condițiile unei răciri lente se separă sub formă de carbon liber (grafit). În mod similar, manganul, cromul, sulful, molibdenul provoacă separarea cementitei, iar nichelul, aluminiul și, în special, siliciul determină formarea grafitului (este un grafitizant puternic, atât în condiții lente de răcire, cât și în condiții rapide de răcire).

Influența *manganului* în aliajele utilizate la turnarea cilindrilor de laminare se manifestă, în primul rând, prin acțiunile sale de desulfurare și dezoxidare. Ca element carburigen, manganul formează, în aliajele Fe-C, carburi stabile la temperaturi înalte, de tipul $(Fe,Mn)_3C$.

Dintre elementele comune, *sulful* și *fosforul*, sunt limitate la conținuturi cât mai mici posibil, în funcție de materiile prime disponibile, sau tipul fontelor folosite (Fgn). Numai în cazul Fgl, nealiate, se mai utilizează, din ce în ce mai rar, mărirea procentului de P până la 0,5%, în scopul evitării crăpăturilor și pentru obținerea unei suprafețe curate a tăbliei [6].

Molibdenul aparține grupei elementelor carburigene, aproape toți cilindri fiind aliați cu Mo, în proporție de 0,3 - 0,5% [74].

Turnarea cilindrilor cu conținuturi de molibden sub 0,25% nu este rațională, deoarece nu conduce la îmbunătățirea vizibilă a structurii acestora [6].

În cazul turnării cilindrilor de laminare, *nichelul*, având o solubilitate nelimitată în fonte, permite mărirea rezistenței feritei din perlită și mărește rezistența mecanică și la uzare a fontelor [2]. *Cromul*, în aliajele destinate turnării cilindrilor, formează carburi stabile, mărește duritatea și adâncimea crustei dure în condițiile favorizării dezvoltării și a adâncimii zonei de trecere, micșorând, prin aceasta, caracteristicile mecanice și rezistența la șoc termic a cilindrilor [6]. Conținuturile de nichel și crom, se încadrează în limitele fontelor slab și mediu aliate. Prin mărirea acestor conținuturi crește și duritatea cilindrilor.

În tab.I.2 sunt prezentate câteva compoziții chimice orientative ale cilindrilor de laminare [96].

1.2.2. Tratamente termice aplicate cilindrilor de laminare

În funcție de materialul din care sunt confecționați, cilindrilor de laminare li se aplică următoarele tratamente termice [6],[70]:

- cilindrii turnați din oțel:
 - tratamente termice fără schimbări structurale (tratamente termice de detensionare);
 - tratamente termice cu schimbări structurale (recoaceri, normalizări, căliri etc.)
- cilindrii turnați din fontă:
 - detensionare naturală;
 - detensionare sau îmbătrânire artificială (recoacere la temperatură joasă);
 - maleabilizare (se aplică la cilindrii turnați din fontă albă).

Tabelul I.2. Compoziții chimice orientative ale cilindrilor de laminare, [%]

Nr crt	Tipul aliajului	Simbolizare după		Duritate HSC	Compoziția chimică [%]								Observații
		aliaj	duritate		C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Ni	Mo	
1	Fontă nealiată cu grafit lamelar	F	S D	45-60 60-70	2,5-3,0 2,8-3,0	1,2-1,6 0,4-0,7	0,4-0,8 0,4-0,8	0,5 0,5	0,05 0,05	sub 0,4 sub 0,4	sub 0,5 sub 0,5	- -	T simplex
2	Fontă aliată cu grafit lamelar	FA	S D E	45-60 60-80 80-95	2,8-3,2 3,2-3,5 3,2-3,7	0,8-1,0 0,3-0,7 0,3-0,7	0,7-1,0 0,4-0,6 0,4-0,6	0,1 0,1 0,1	0,05 0,05 0,05	0,5-1,0 0,7-1,2 0,8-1,6	0,3-0,6 1,2-1,6 3,0-5,0	0,3-0,5 0,3-0,5 0,3-0,5	T simplex Se recom. tumare duplex Tumare duplex + TT
3	Fontă cu structură indefinită	FI	S D E	55-60 60-80 80-95	3,1-3,4 3,1-3,4 3,1-3,4	1,0-1,3 0,8-1,1 0,6-0,9	0,2-0,6 0,3-0,8 0,3-0,6	0,1 0,1 0,1	0,05 0,05 0,05	0,6-1,0 0,8-1,2 1,4-2,0	2,5-3,0 3,0-4,0 4,5-5,0	0,3-0,5 0,3-0,5 0,3-0,5	Se recom. tumare duplex Se recom. tumare duplex T simplex
4	Fontă cu grafit nodular	Fgn	S D	45-60 60-80	3,3-3,5 3,3-3,5	1,5-2,5 1,2-1,5	0,5-0,7 0,5-0,8	0,1 0,1	0,02 0,02	sub 0,5 sub 0,5	sub 0,3 sub 0,3	- -	T simplex Se recom. tumare duplex
5	Fontă cu grafit nodular	FgnA	S D E	45-60 60-80 80-95	3,3-3,5 3,3-3,5 3,3-3,5	1,8-2,2 1,2-1,8 1,0-1,5	0,5-0,8 0,5-0,8 0,5-0,8	0,1 0,1 0,1	0,02 0,02 0,02	max 0,5 0,4-0,8 0,6-1,6	1,8-2,2 2,0-3,0 3,6-4,4	0,3-0,5 0,3-0,5 0,3-0,5	T simplex Se recom. tumare duplex Tumare duplex + TT
6	Oțel grafitat (hipereutectoid, nealiat-tip Adamit)	Og	S	30-50	1,2-1,8	1,2-1,5	0,7-1,0	0,04	0,02	max 0,5	max 0,2	0,3-0,5	Tumare duplex (se recomandă TT)
7	Oțel grafitat (hipereutectoid, aliat - tip Adamit)	S ₁ S ₂ D	S ₁ S ₂ D	45-50 50-60 60-70	1,6-2,0 1,6-2,0 1,6-2,0	0,6-0,9	0,6-0,9	0,04	0,02	0,8-1,2 0,6-1,2 0,8-1,2	0,5-0,8 1,5-1,8 2,5-2,8	0,3-0,5 0,3-0,5 0,3-0,5	T simplex. Se execută TT T simplex. Se execută TT T simplex. Se execută TT

În continuare, lucrarea de doctorat se va axa pe analiza cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid tip Adamit, deoarece utilizarea acestora pentru laminarea la cald a profilelor fasonate a luat o tot mai mare amploare, aceștia putând înlocui, cu succes, cilindri din oțel forjat sau cei turnați din fontă cu grafit nodular.

I.3. CONSIDERAȚII PRIVIND TEHNOLOGIA ACTUALĂ DE FABRICAȚIE A CILINDRILOR DE LAMINARE TURNAȚI DIN OȚEL HIPEREUTECTOID, TIP ADAMIT

O importanță deosebită în ceea ce privește comportarea în exploatare a cilindrilor de laminare o are materialul din care aceștia sunt turnați. Astfel, la alegerea materialului din care sunt turnați cilindrii de laminare se ține cont de următoarele aspecte:

- materialul și starea materialului de laminat;
- tipul laminorului unde se utilizează;
- dimensiunile cilindrului (în special, diametrul);
- vitezele de laminare, respectiv cazele din trenul de laminare pentru care sunt destinați;
- temperatura de lucru a tăbliei în procesul de laminare, precum și modul de răcire în timpul lucrului;
- mărimea calibrului.

Funcție de acești factori depinde nu numai materialul ci și tehnologia de fabricație a cilindrilor, care poate să asigure caracteristicile impuse de condițiile de exploatare.

I.3.1. Definirea aliajelor turnate tip ADAMIT

Cercetările în domeniul producției cilindrilor de laminare sunt orientate în două direcții: perfecționarea materialelor existente pentru cilindrii de laminare și a tehnologiei lor de fabricație în uzinele de turnare a acestora, precum și elaborarea proceselor tehnologice de perspectivă, care să îmbunătățească substanțial calitatea cilindrilor, să permită mecanizarea și automatizarea operațiilor în producția de turnare a cilindrilor și, totodată, să îmbunătățească condițiile de lucru [92].

La o abordare mai complexă privind realizarea și exploatarea cilindrilor, s-au rezolvat o serie de probleme tehnice de perspectivă, legate de elaborarea unor materiale noi, de însușirea tehnologiei de producere a cilindrilor cu rezistență mare și de stabilire a caracteristicilor de exploatare a cilindrilor de diferite tipuri. În urma acestor cercetări, s-au elaborat compoziții noi de aliaje pentru cilindri: oțeluri aliate hipereutectoide, oțeluri grafitizate aliate și nealiate, fonte crom-nichel, aliate cu cupru și vanadiu, fontă puternic silicioasă și altele [92].

Statele cu o industrie avansată folosesc cu succes pentru producția cilindrilor turnați un aliaj de fier cu un conținut de carbon de 1,3 până la 2,3%C. În combinatul din Magnitogoros se utilizează, pentru laminoarele de finalizare pe linia de profil, cilindri turnați din oțel, cu un conținut de carbon de 1,4 până la 1,6%, crom 0,9 până la 1,25%, nichel 0,9 până la 1,25% și molibden 0,1 până la 0,3% [42].

În 1967, Japonia lansează pe piața internațională cilindri mari de laminare (pentru profile, benzi și tablă) turnați dintr-un aliaj fier-carbon special, cu 1,4-2,3%C mediu aliat cu Cr, Ni și Mo - numit *oțel tip ADAMIT* [12].

Între 1955-1960, în URSS - G.N.Ghirșovici denușește această grupă de materiale turnate *fonte sălbatice* dar, se renunță la producerea lor la scară industrială [12], datorită proprietăților nesatisfăcătoare de turnare și anume:

- contracție ridicată și volum mare de retasură;
- tensiuni termice mari, care provocau crăparea transversală instantanee în zona tăbliei, chiar și la cilindri mari cu diametre între 700 și 1600 mm;
- segregării accentuate ale fosforului, sulfului și carbonului;
- conținut ridicat de gaze și numeroase sufluri în zona fusurilor;
- pelicule superficiale de micropori în zona tăbliei.

În Franța, firma AKERS produce cilindrii de laminare din oțel hipereutectoid, cu 1,5...2%C, 0,5...1,5%Si, 0,5...1,5%Mn, 0,9...1,5%Cr, 0,5...2%Ni, < 0,5%Mo. Aceștia sunt notați H-SB ("steel base") și H-GS ("graphitic steel") [125].

Firma KAOTAI MACHINERY COMPANY LTD., din Taiwan, produce cilindri din oțel Adamit, cu conținutul de carbon cuprins între 1,3% și 2,7%, într-o gamă destul de largă, cu următoarea simbolizare [42]:

- TL (sunt aliați cu crom și au duritatea 30...45HSD)
- TM (mediu aliați cu Cr-Mo, cu duritatea 35...60HSD)
- TH (înalt aliați cu Cr-Mo, cu duritatea 38...60HSD)
- TB (aliați cu Cr-Ni-Mo, cu duritatea 45...70HSD)
- TA (turnați duplex, cu duritatea 53...70HSD).

În Anglia sunt turnați cilindri din oțel hipereutectoid, notați cu GB1, cu dimensiunile tăbliei 500x900 mm, cu următoarea compoziție chimică medie: 2,02%C, 0,76%Mn, 0,66%Si, 0,064%P, 0,058%S, 1,05%Cr, 1,41%Ni, 0,53%Mo, iar în Austria, cilindrii turnați din oțel Adamit, au indicativul Au1, iar compoziția chimică medie este: 1,82%C, 0,90%Mn, 0,63%Si, 0,057%P, 0,043%S, 1,35%Cr, 1,46%Ni, 0,48%Mo [77].

În Cehia sunt utilizați cilindri turnați din oțel hipereutectoid, a căror compoziție chimică este: (1,5...2,0)%C, (0,3...0,6)%Si, (0,4...1,0)%Mn, 0,05%P, 0,05%S, (1,5...2,5)%Cr, (1,5...2,0)%Ni, (0,25...0,3)%Mo [70].

În România, cilindri din oțel Adamit sunt utilizați la Laminoarele de sârmă de la Ductil Buzău, Laminorul Focșani, I.S. Câmpia Turzii, C.O.S. Târgoviște, S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara.

La I.S. Câmpia Turzii s-au obținut cilindri turnați din oțel Adamit, cu următoarea compoziție chimică: (1,75..2,00)%C, (0,35...0,45)%Si, (0,60...0,80)%Mn, max.0,017...0,025%P,

max.0,014%S, (0,90...1,20)%Cr, max.40%Ni, (0,30...0,45)%Mo, max.0,14%Cu, și duritatea tăbliei 350...380HB.

Cilindrii din oțel turnat, cu conținut de carbon ridicat, utilizați la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara sunt aliați cu Cr, Ni, Mo. Aceștia au câștigat o mare răspândire la laminoarele de profile mijlocii și mici, la laminoarele de sârmă.

Ca urmare a unei rezistențe la rupere acceptabilă și a unei mari rezistențe la uzare se folosesc la laminoarele finisoare în pregătitor și, în special, la laminarea profilelor fasonate U și I [103]. Acest oțel hipereutectoid, cu structură ledeburitică, are compoziția chimică redată în tab. I.3.

Tabelul I.3. Compoziția chimică și duritățile oțelurilor hipereutectoide OTA1, OTA2, OTA3 [115], [121].

Oțel marca	Compoziție chimică, %									Duritate*, HB	
	C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Ni _{max}	Mo	Cu _{max}	Tăblie	Fus
OTA1	1,8-2,0	0,3-0,6	0,6-0,8	0,04	0,01	1,0-1,2	0,5	0,3-0,5	0,2	320-360	255-270
OTA2	1,8-2,0	0,7-0,9	0,6-0,8	0,04	0,02	0,8-1,2	0,5	0,3-0,5	0,2	300-330	240-260
OTA3	1,8-2,0	0,6-0,8	0,7-0,9	0,04	0,02	1,0-1,2	1,6-2	0,3-0,5	0,2	380-430	315-350

* cădere de duritate admisă max.50HB/100 mm.

La S.C. "Siderurgica" S.A Hunedoara, cilindri de laminor turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit (OTA), pot fi utilizați la următoarele laminoare:

- laminor sârmă nr.3 (LS-3) (OTA1)
 - trenul pregătitor: - K 1, ϕ 450 x 1050;
 - K 2, ϕ 420 x 1050
 - K 3-4, ϕ 380 x 1050
- laminor profile ușoare (LPU) (OTA1)
 - trenul pregătitor: - K 1-4, ϕ 450 x 1130
- laminor profile mijlocii (LPM) (OTA3)
 - trenul intermediar II - K 9-14, ϕ 450÷570 x 900
 - trenul finisor IV - K12, 13,14, ϕ 450÷570 x 900

În cadrul laminoarelor sârmă nr.3 (LS3) și LPU, cilindri din oțel Adamit lucrează la cajele trenurilor pregătitoare, deci acești cilindri trebuie să aibe calitățile cilindrilor din oțel forjat, adică rezistență la rupere ridicată.

În cadrul laminorului de profile mijlocii, cilindri lucrează la cajele trenurilor III și IV (intermediar II și finisor), deci trebuie să aibe calitățile cilindrilor turnați din fontă, adică rezistență la uzare ridicată, pentru o finisare bună a suprafeței laminatului.

Cilindri utilizați pentru laminarea profilului I (caja 14) sunt prezentați în fig. I.14.

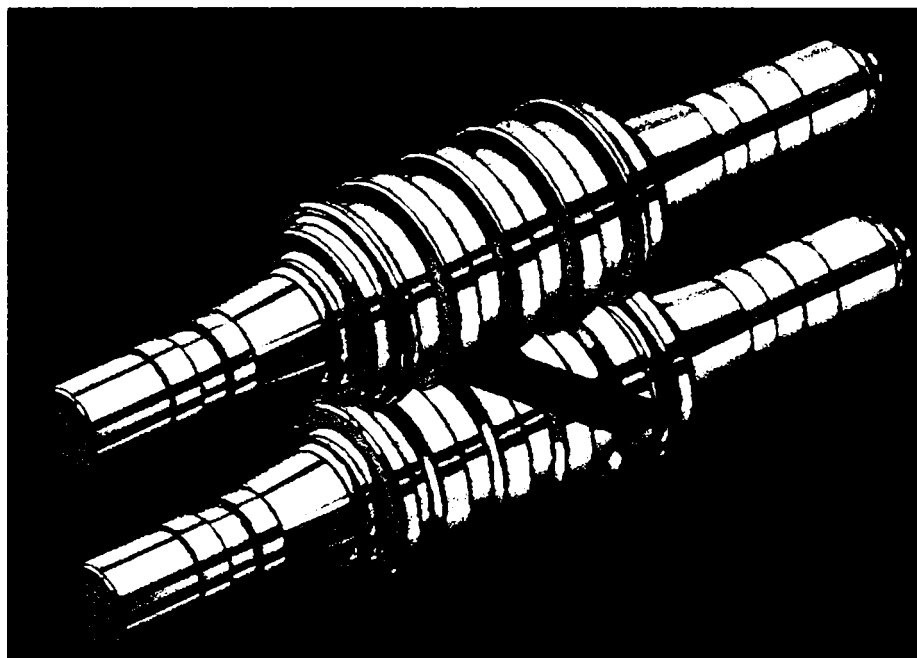


Figura I.14. Laminarea profilului I.

Deosebirile dintre mărcile de oțel tip Adamit sunt date de compoziția chimică și duritatea diferită, prezentate anterior. Cilindrii utilizați la LS3 (*Laminorul de Sârmă*), LPU (*Laminorul de Profile Ușoare*) și LPM (*Laminorul de Profile Mijlocii*) au caracteristicile prezentate în tab.I.4 [103].

Tabelul I.4. Caracteristicile cilindrilor utilizați la LS3, LPU și LPM.

Laminorul	Marca oțelului	Caja de lucru	Dimensiuni, [mm]			Masa, [kg/buc]	
			D*	l**	L***	finiț	eboșat
LPU	OTA1	1...4	450	1130	2678	1940	2200
LS 3		1...4	450	1050	2330	1790	2100
			420	1050	2330	1600	1800
			380	1050	2240	1292	1500
LPM	OTA3	9...14	450	900	2480	1600	1800
			460	900	2480	1700	1900
			470	900	2480	1750	1950
			480	900	2480	1800	2000
			500	900	2480	1900	2060
			510	900	2480	1950	2120
			520	900	2480	2050	2300
			530	900	2480	2100	2240
			540	900	2480	2150	2300
			550	900	2480	2250	2360
			560	900	2480	2300	2430
570	900	2480	2350	2500			

* D - reprezintă diametrul tăbliei cilindului, în mm; ** l - reprezintă lungimea tăbliei, în mm; ***L-reprezintă lungimea totală a cilindului, în mm.

Compoziția chimică a unor astfel de oțeluri hipereutectoide este prezentată în tab. I.5 [96].

Tabelul I.5. Compoziția chimică a oțelurilor tip Adamit, [%], după [96].

Nr. crt.	Proveniența	Compoziția chimică, [%]									
		C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Ni	Mo		
1.	OTA 1 Siderurgica	1,8 2,0	0,3 0,6	0,6 0,8	0,04	0,02	1,0 1,2	max 0,5	0,3 0,5		
2.	OTA 2 Siderurgica	1,8 2,0	0,7 0,9	0,5 0,9	0,04	0,02	0,8 1,2	max 0,5	0,3 0,5		
3.	OTA 3 Siderurgica	1,8 2,0	0,6 0,8	0,7 0,9	0,04	0,02	1,0 1,2	1,60 2,0	0,3 0,5		
4.	Japonia, import 1966	1,8 2,0	0,8	0,6	0,05	0,02	0,95	1,40 1,60	0,35		
5.	U 18 SHNM URSS 1970	1,8 2,0	0,8 1,0	0,6 0,8	0,05	0,05	0,9 1,0	0,8 1,0	0,25		
6.	GS 190 CrNi 4,3	1,80 1,90	0,60 0,70	0,60 0,70	0,05	0,05	0,90 1,0	0,70 0,80	-		
7.	GS 165 CrNiMo 4	1,90 1,80	0,50	0,50	0,05	0,05	1,0 1,25	1,00 1,25	0,25		
8.	GS 165 CrNiMo 4	1,90 2,20	0,50	0,50	0,05	0,05	1,0 1,25	1,00 1,25	0,25		

I.3.2. Fluxul tehnologic de fabricație a cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, la S.C. "SIDERURGICA" S.A. Hunedoara

În ultimii ani, în România, s-a pus problema eliminării importului cilindrilor turnați din oțel hipereutectoid tip Adamit, precum și asimilarea acestui tip de aliaj și a tehnologiei de turnare și tratament termic a acestor cilindri de laminare (pentru profile, benzi și tablă).

Astfel, în cadrul S.C. Siderurgica S.A Hunedoara, tehnologia de fabricație a cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid tratează următoarele probleme:

- executarea formelor
- elaborarea oțelului, turnarea și respectiv dezbateră cilindrilor
- curățirea și controlul calității
- eboșarea și tratamentul termic aplicat cilindrilor
- finisarea și recepția finală a cilindrilor

I.3.2.1. Executarea formelor

Deosebiriile dintre proprietățile fizico-mecanice ale crustei, miezului și fusurilor cilindrului de laminare se asigură, nu numai prin schimbări ale compoziției chimice, ci și prin utilizarea formelor cu conductibilități termice diferite în părțile componente ale formei [6].

În vederea executării formelor se vor utiliza amestecuri de formare a căror compoziție este următoarea [6], [98]:

- amestec recirculat - 70...80%;
- nisip Aghireș - 10...25%;
- argilă refractară - 5...10%;
- apă - 5%.

a). Formarea fusului inferior – se realizează cu ajutorul modelului și a ramei de formare, în poziția de turnare. Forma fusului inferior este prezentată în fig.I.15.

După executarea operației de formare, are loc ajustarea acesteia și asigurarea planeității suprafeței de asamblare cu placa de bază și cochila, destinată turnării tăbliei cilindrului.

În prezent, pentru îndesarea amestecului de formare în formă se utilizează, din ce în ce mai des, mașinile cu cap aruncător, dar nu se poate elimina total munca manuală la efectuarea formării fusului inferior al cilindrului.

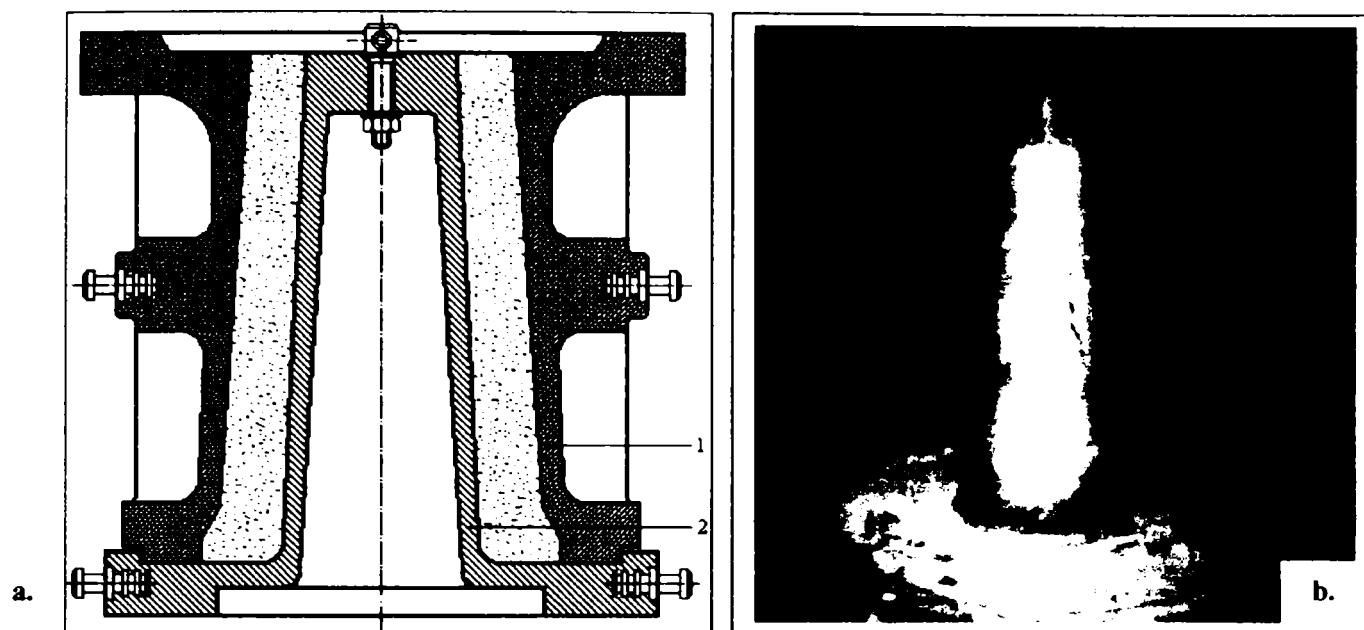


Figura I.15. Formarea fusului inferior: a). 1-ramă inferioară; 2-model; b). model fus inferior folosit la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara

b). Forma metalică (cochila)

Cochila reprezintă partea metalică a formei, destinată obținerii crustei de lucru de pe tăbia cilindrilor. Cochilele se realizează din fontă cenușie sau din oțeluri turnate, cu suprafețe profilate sau netede, în funcție de destinația lor. Cochilele cu suprafețe netede sunt destinate pentru turnarea cilindrilor folosiți la laminarea tablelor și profilelor la care calibrele se realizează prin prelucrare mecanică (fig. I.16).

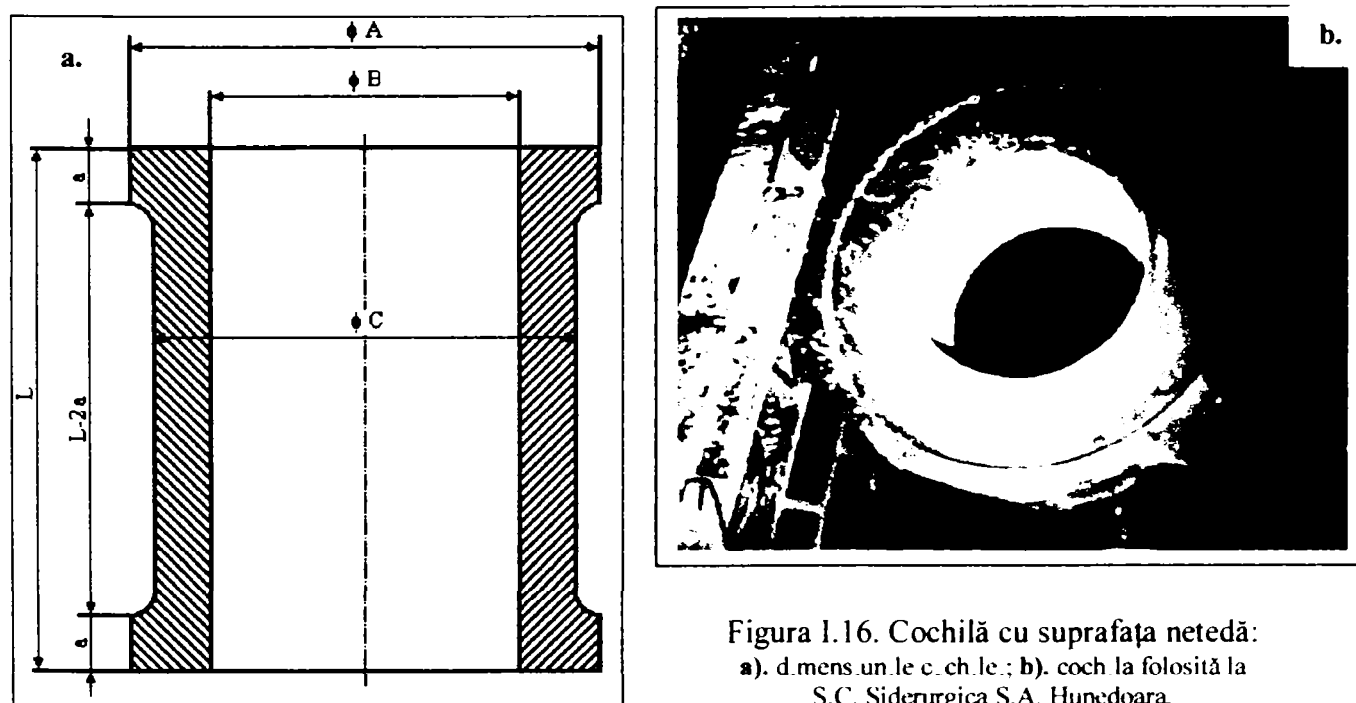


Figura I.16. Cochilă cu suprafața netedă: a). d. mens. un. le c. ch. le.; b). coch. la folosită la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara.

Calitatea și durabilitatea cochilelor sunt determinate de compoziția chimică și structura fontei, precum și de calitatea suprafeței interioare și precizia prelucrării mecanice a acestora. Rezistența termică a cochilei, la turnarea cilindrilor, se reglează cu ajutorul grosimii straturilor termoizolante, care se aplică pe suprafețele interioare ale acestora. În practică, nu se execută straturi termoizolante cu grosimi mai mari de 18 mm deoarece, în aceste cazuri, apar defecte structurale (porozități și grăunți măriți). Cel mai adesea se aplică straturi termoizolante cu grosimi de 12-16mm [47].

c). **Formarea fusului superior și a maselotei** în rame de formare, se execută la fel ca formarea fusului inferior (fig.I.17.) și, parțial, în partea superioară a cochilei (fig.I.18). Fusul superior se formează în rama de formare, utilizându-se un utilaj numit "pieptene", care se montează împreună cu rama de formare pentru asigurarea unei dezbateri corecte. Partea din cochilă se execută cu cochila în poziție de turnare, în prealabil cochila curățindu-se în zona formei pentru tăblie, astfel încât să fie pregătită pentru vopsire.

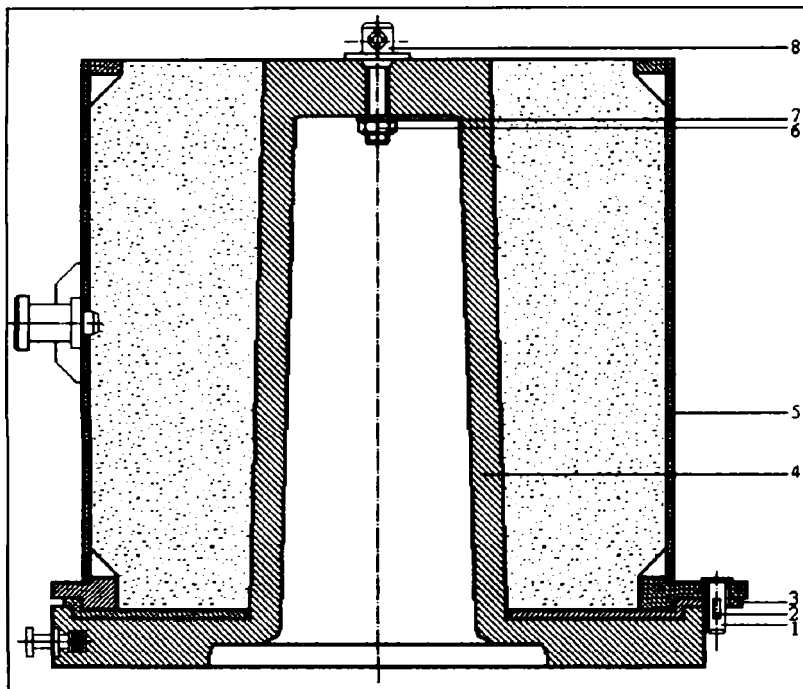


Figura I.17. Formarea fusului superior în ramă de formare:

- 1-bolț;
- 2-pană;
- 3-pieptene;
- 4-modelul fusului superior;
- 5-ramă de formare;
- 6-piuliță M48;
- 7-șaiță;
- 8-bulon de ridicare.

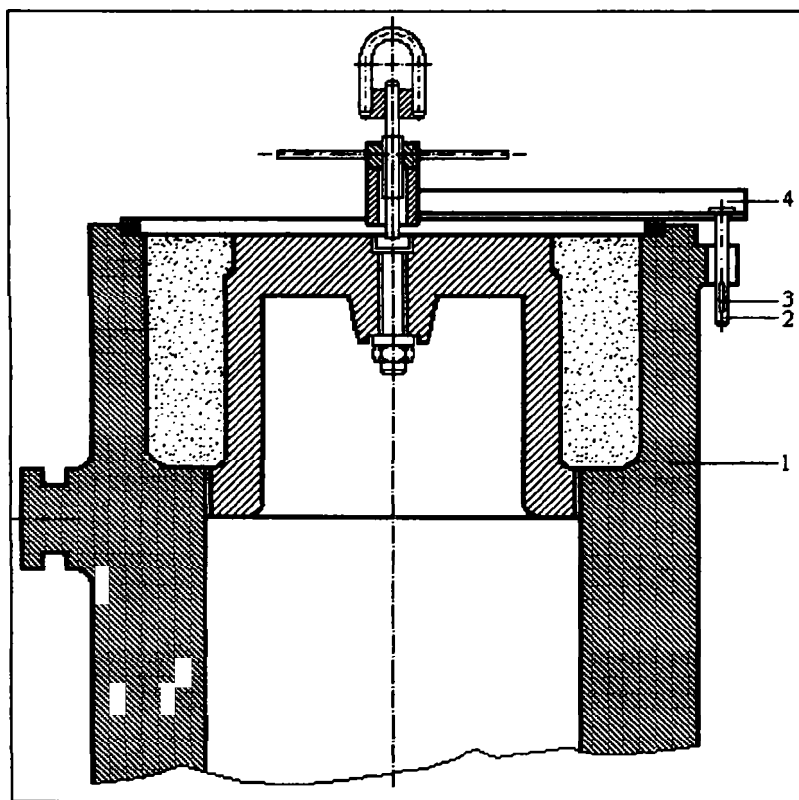


Figura I.18. Formarea parțială a fusului superior în cochila metalică:

- 1-cochila metalică;
- 2-bolț;
- 3-pană;
- 4-dispozitiv de prindere.

În fig.I.19 sunt prezentate modelul fusului superior, respectiv rama superioară utilizate la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara.

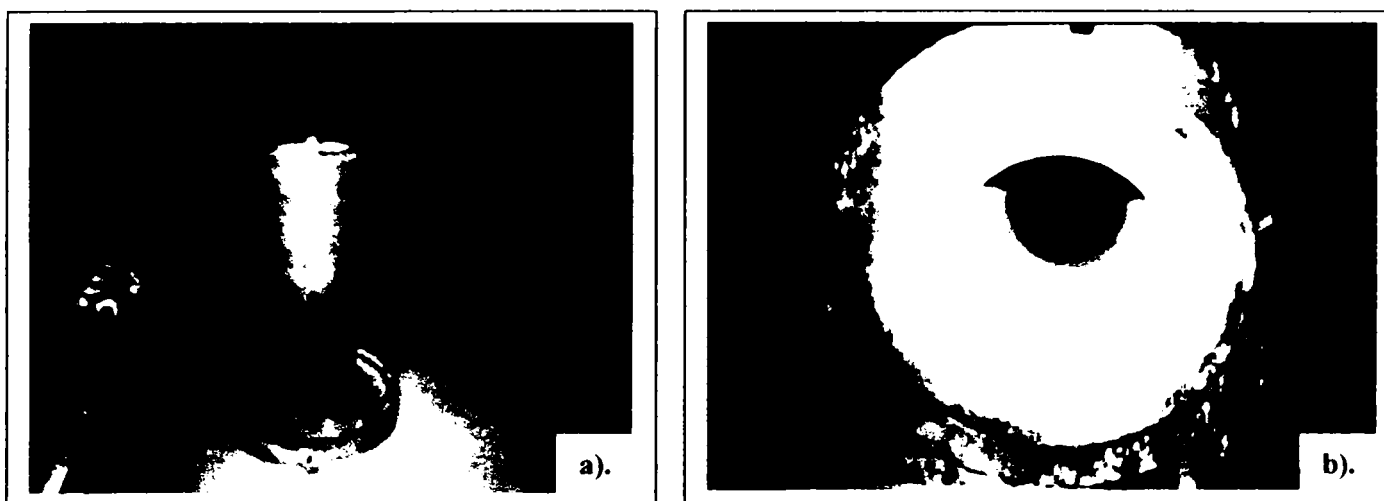


Figura I.19. Formarea fusului superior: a). modelul fusului superior; b). ramă superioară.

După îndesarea amestecului de formare se execută canale pentru evacuarea gazelor, iar asigurarea planeității suprafeței de asamblare cu rama superioară este obligatorie.

Modelul se dezbracă prin ridicarea ramei superioare, iar după formare trebuie asigurată planeitatea suprafeței de asamblare cu forma fusului superior.

d). Formarea pâlniei de turnare

Pâlniile de turnare folosite la turnarea aliajului pot fi conice (care sunt cele mai răspândite) și piramidale (cu un perete vertical și alți trei înclinați) și sunt utilizate în funcție de mărimea cilindrilor turnați. În general, acestea se realizează din tablă de oțel cu grosimi de 3...8mm, căptușite cu cărămizi de șamotă, iar la partea inferioară se căptușesc cu amestec de formare, compus din 75% nisip fin și 25% argilă refractară [6].

În vederea îmbunătățirii tehnologiei de turnare, la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara se utilizează o pâlnie specială, prezentată în fig. I.20, la care se montează, în locașul pâlniei, un orificiu de scurgere obișnuit pentru oala de turnare (se recomandă orificiul cu $\phi 45 \div 50$ mm, conform STAS 1580-65). După montarea piesei de scurgere se ștampează un strat cu grosime egală cu înălțimea orificiului [98].

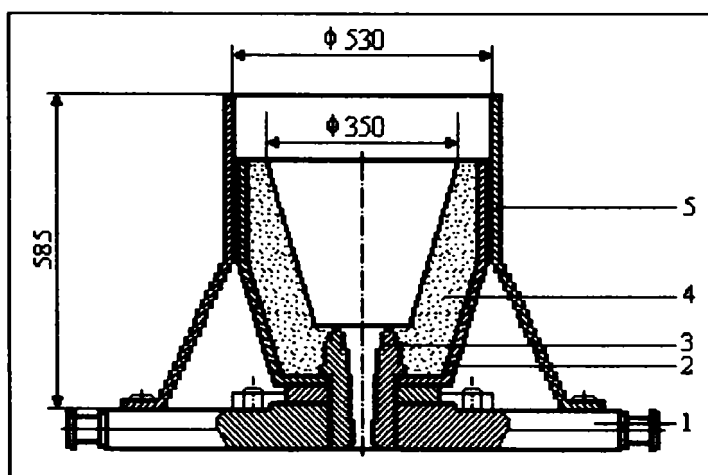


Figura I.20.
Pâlnie de turnare:
1-placă de formare;
2-manta metalică;
3-piesă de scurgere;
4-amestec de formare;
5-ramă sprijin.

După pregătirea pâlniei, aceasta se vopsește cu vopsea refractară identică cu cea utilizată la vopsirea formei [98], iar apoi are loc uscarea, conform diagramei din fig. I.21. După uscare, pâlnia se montează împreună cu celelalte elemente componente ale formei.

e). Vopsirea formelor

Formele pentru fusul inferior, fusul superior (respectiv partea din cochilă a fusului superior) și pâlnia de turnare se vopsesc, în stare crudă, cu vopsea refractară pe bază de grafit, cu următoarea compoziție [98]: grafit-20kg; emulsie bazică-10kg; apă-5... 8 l (grosimea stratului de vopsea va fi de $0,3 \div 0,5$ mm). După uscare, formele se vopsesc calde, la temperatură de $120 \div 150^{\circ}\text{C}$, cu un nou strat de vopsea. Operația se repetă până se obține un strat de $2,5 \div 3$ mm.

Forma metalică pentru tăblie se vopsește la cald, la temperatura de $80 \div 100^{\circ}\text{C}$, cu un strat uniform de $0,2 \div 0,4$ mm. După uscarea primului strat, operația se repetă până la obținerea unui strat de vopsea de $1,2 \div 1,5$ mm. Vopseaua pentru tăblie are următoarea compoziție [98]: grafit amorf-50...53%; grafit fulgi-30%; molifan-3%; dextrină-3%; apă-10...15%, până la obținerea unei densități $\rho = 1,2 \dots 1,3 \text{g/cm}^3$.

f). Uscarea formelor

Uscarea cochilei se face conform diagramei prezentată în fig. I.21, iar pentru uscarea formelor pentru fusuri și pâlnie, este utilizată diagrama prezentată în fig. I.22.

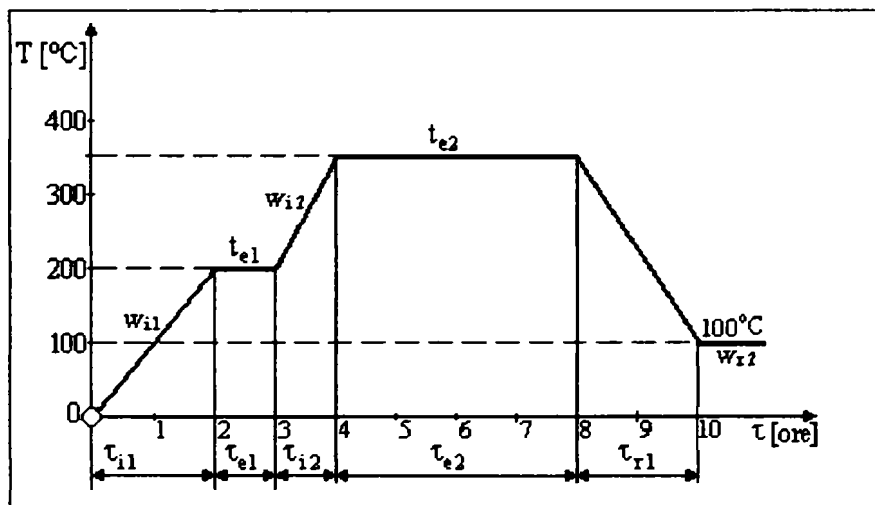


Figura I.21. Diagrama de uscare a cochilei: W_i – viteză de încălzire, $^{\circ}\text{C/h}$ ($W_{i1} = 100^{\circ}\text{C/h}$; $W_{i2} = 100^{\circ}\text{C/h}$); W_r – viteză de răcire, $^{\circ}\text{C/h}$ (W_{r2} – răcire în aer); t_e – temperatura de menținere, $^{\circ}\text{C}$ ($t_{e1} = 200^{\circ}\text{C/h}$; $t_{e2} = 300^{\circ}\text{C/h}$); τ_i – durata de încălzire, h ($\tau_{i1} = 2\text{h}$; $\tau_{i2} = 1\text{h}$); τ_e – durata de menținere, h ($\tau_{e1} = 1\text{h}$; $\tau_{e2} = 4\text{h}$); τ_r – durata răcirii, h ($\tau_{r2} = 2\text{h}$).

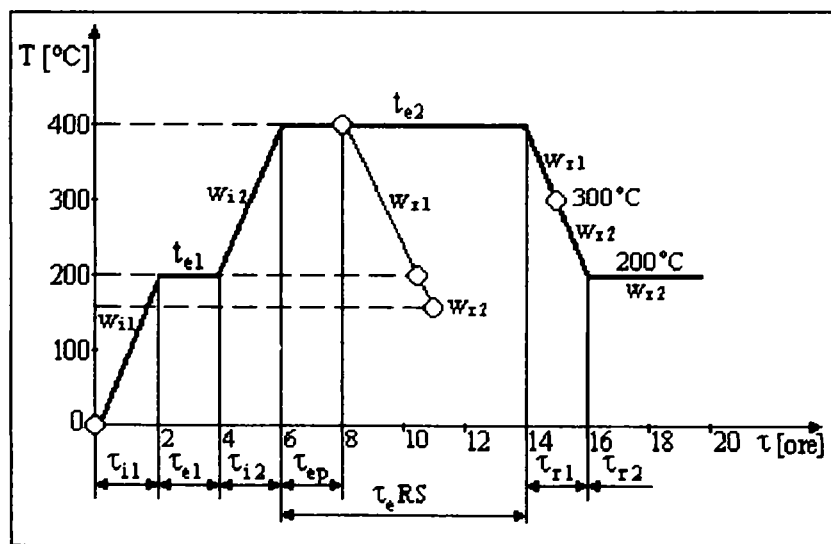


Figura I.22. Diagrama de uscare a formelor și a pâlniei: $W_{i1} = 100^{\circ}\text{C/h}$; $W_{i2} = 100^{\circ}\text{C/h}$; $W_{r1} = 100^{\circ}\text{C/h}$; W_{r2} – răcire în aer; $t_{e1} = 200^{\circ}\text{C/h}$; $t_{e2} = 400^{\circ}\text{C/h}$; $\tau_{i1} = 2\text{h}$; $\tau_{i2} = 2\text{h}$; $\tau_{e1} = 2\text{h}$; $\tau_{ep} = 2\text{h}$; $\tau_{eRS} = 8\text{h}$; $\tau_{r1} = 8\text{h}$

După terminarea ciclului de uscare w_{r2} , pâlnia se scoate din cuptor, se revopsește și se protejează cu flacăra, în vederea asigurării temperaturii tehnologice de asamblare. După terminarea ciclului de uscare, ramele și cochila se scot din cuptor la 200°C pentru remedieri și revopsiri, apoi se introduc în gropile de turnare și se mențin la temperatura de 300°C , în vederea asigurării temperaturii tehnologice de asamblare.

g). Asamblarea formelor

Pregătirea pentru asamblarea formelor constă din: remedierea defectelor; revopsirea formelor și asigurarea temperaturii tehnologice de turnare. În fig. 1.23 sunt prezentate elementele componente și dimensiunile formei asamblate pentru turnarea cilindului de laminare.

Asamblarea formelor în vederea turnării se execută, în următoarea ordine:

- a). se montează rama inferioară pe placa de bază și se consolidează
- b). se montează cochila pe rama inferioară
- c). se montează rama superioară și se consolidează
- e). se montează pâlnia de turnare.

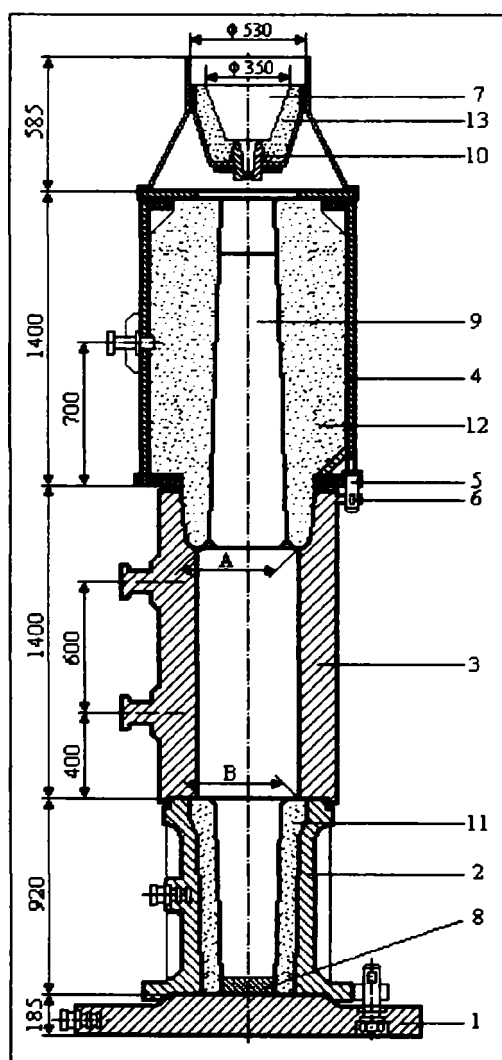


Figura I.23.
Montarea formei pentru turnarea
cilindului:

- 1-placă de bază;
- 2-ramă de formare inferioară;
- 3- cochilă metalică;
- 4-ramă de formare superioară;
- 5-bolț;
- 6-pană;
- 7-pâlnie de turnare;
- 8-placă de protecție;
- 9-cilindru brut turnat;
- 10-piesă de scurgere tip A ($\phi 40$);
- 11-amestec de formare (cromit);
- 12-amestec de formare clasic;
- 13-masă ștampată.

Forma asamblată în vederea turnării trebuie să aibe o poziție perfect verticală, iar ansamblul să fie stabil. Temperaturile tehnologice la începutul turnării sunt următoarele (verificarea temperaturilor se realizează cu ajutorul unui termocuplu de contact) [98]: placa de bază - $20...30^{\circ}\text{C}$; rama inferioară - $80...100^{\circ}\text{C}$; forma metalică (cochila)- $80...100^{\circ}\text{C}$; rama superioară - $200...250^{\circ}\text{C}$; pâlnia de turnare - $100...150^{\circ}\text{C}$.

O astfel de formă, asamblată în groapa de turnare din solul turnătoriei de la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, este prezentată în fig. 1.24.

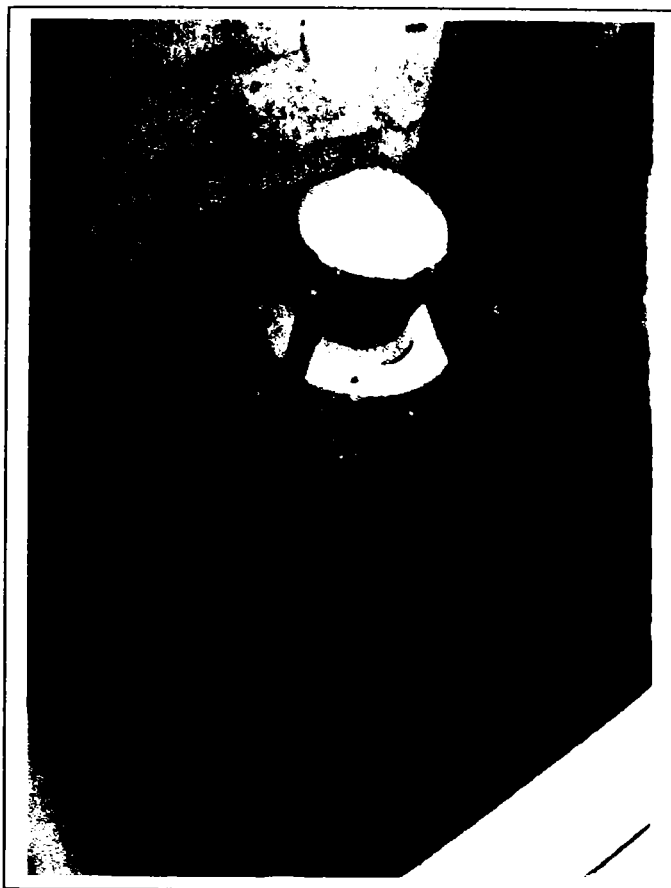


Figura 1.24. Groapa de turnare cu forma asamblată pregătită pentru turnarea unui cilindru de laminare din oțel tip ADAMIT, cu diametrul de 450 mm și lungimea tăbliei de 900 mm.

1.3.2.2. Elaborarea oțelului hipereutectoid

a). Starea cuptorului

Elaborarea oțelului se face în cuptorul electric cu arc, cu căptușeală bazică, de 20,0 tone capacitate, din secția OE1, din cadrul S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara. Pentru desfășurarea în bune condiții a procesului de elaborare, cuptorul trebuie să fie în perfectă stare de funcționare, fără a necesita reparații mari înainte de încărcarea șarjei în vederea elaborării oțelului hipereutectoid, tip Adamit.

b). Încărcătura metalică

Încărcătura metalică destinată elaborării oțelului hipereutectoid, tip Adamit, trebuie să fie de bună calitate (de compoziție chimică cunoscută, recomandându-se utilizarea deșeurilor proprii rezultate de pe fluxul de elaborare-turnare-laminare) și trebuie să se țină cont ca, la topire, conținutul de carbon să fie minim 2,5% [96], [98], [121].

Încărcătura metalică în vederea elaborării oțelului poate consta din [98], [121]:

b1). deșeuri de cilindri din oțel hipereutectoid (Adamit) – 100%;

b2). șutaje din oțel RUL2, fontă de turnătorie FK3 și așchii rezultate de la cojirea barelor de rulmenți: - șutaje din oțel RUL2 – 80%;
- fontă de turnătorie FK3 – 20%;
- așchii, rezultate de la cojirea barelor de rulmenți (se așează pe vatra cuptorului, pentru amortizarea șocurilor mecanice) – cca. 1500 kg.

În ambele cazuri, pentru carburarea băii se folosesc spărturi de electrozi, care trebuie să aibă o granulație cuprinsă între 50...150mm [98], [121].

c). Topirea și afinarea

În cazul utilizării în încărcătură a deșeurilor de cilindri din oțel hipereutectoid, se face o topire fără oxidare, iar în cazul utilizării șutajelor din oțel RUL 2, fontei FK3 și așchiilor se face o topire cu oxidare parțială. La sfârșitul etapei de topire se iau două probe din care se determină compoziția chimică completă.

Afinarea se face prin introducerea în baia lichidă a minereului de fier de calitate superioară cu granulația 50..100mm. În timpul fierberii trebuie adăugat var și minereu pentru reducerea conținutului de fosfor sub 0,04%. La sfârșitul fierberii conținutul de carbon trebuie să se încadreze în limitele prescrise (max.2%C), în acest scop se prelevându-se o probă pentru verificarea acestuia [67]. În timpul fierberii, după obținerea rezultatelor analizei la probele prelevate după topire, se face corecția finală de Ni și Mo.

După îndepărtarea zgurei, baia metalică trebuie să aibe o temperatură de 1460...1480°C [98].

d). Dezoxidarea și alierea

În vederea dezoxidării se formează o nouă zgură cu var și fluorură de calciu (6:1), în cantitate de 2...2,3% din încărcătură. Această zgură va fi transformată (prin adăugare de ferosiliciu măcinat) în zgură albă, în scopul realizării unei desulfurări avansate a oțelului. După formarea zgurei albe, se prelevează probe pentru analiza chimică, după care se fac corecțiile de Cr, Mn și Si.

Evacuarea din cuptorul electric (fig.I.25) se face la aprox. 1500°C iar temperatura oțelului lichid din oală se măsoară cu ajutorul unui termocuplu de imersie. Oala de turnare trebuie să fie preîncălzită la o temperatură de aprox. 800°C [98].



Figura I.25.Evacuarea oțelului din agregatul de elaborare.

I.3.2.3. Turnarea și dezbaterea cilindrilor

Deoarece, procesul de turnare determină, în mare măsură, calitatea cilindrilor, este necesară respectarea strictă a unor parametri ca: temperatura și durata turnării. Stabilirea temperaturii optime de turnare constituie un moment esențial în stabilirea unui proces tehnologic rațional [60], [82]. Cu toate că, pe suprafața cochilei, se aplică diferite pelicule termoizolante, la temperaturi prea ridicate ale aliajului turnat poate avea loc sudarea cilindrilor de cochilă, apariția mai rapidă a arsurilor și crăpăturilor pe suprafața activă a cochilei, ceea ce provoacă reducerea durabilității în exploatare a

acesteia. De aceea, temperatura de turnare trebuie corelată cu temperatura începutului de cristalizare (t_{ic}). Aceasta depinde de compoziția chimică a aliajului și ea poate fi determinată cu relația [6]:

$$t_{ic} = 1669 - 124(C + P/2 + Si/4), \text{ unde: } C, P \text{ și } Si \text{ sunt conținuturile elementelor, în \%}.$$

Literatura de specialitate indică faptul că pentru determinarea t_{ic} se poate utiliza nomograma din fig.I.26 [6]. Se mai poate menționa că temperatura de turnare se poate determina cu relația [60]:

$$T_t = t_{ic} + (50 \dots 100)^\circ\text{C}.$$

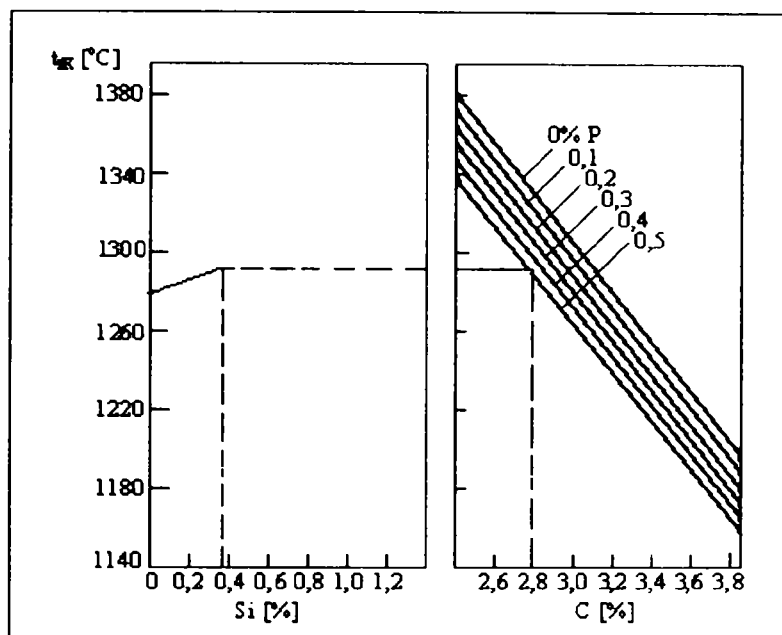


Figura I.26. Nomogramă pentru determinarea temperaturii începutului de cristalizării (t_{ic}) în funcție de C, Si, P din aliajele pentru turnarea cilindrilor.

Temperatura de supraîncălzire, peste temperatura începutului de cristalizării, se determină pe cale practică, ținând seama că aceasta depinde, în principal, de masa și tipul cilindrilor, de construcția formelor, aliajul ce se toarnă etc.

Turnarea cilindrilor se face direct, aducând oala de turnare deasupra pâlniei de turnare (fig.I.27). În general, la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, dintr-o șarjă elaborată, se toarnă patru cilindri (în patru gropi de turnare diferite), unul după altul, turnarea începând cu cilindrul cu diametrul cel mai mare. Temperatura oțelului la începutul turnării va fi cuprinsă între 1420...1430°C [96], [98].



Figura I.27. Turnarea cilindrilor în gropi de turnare:
a). turnarea primului cilindru; b). turnarea celui următor.

După terminarea turnării primului cilindru se vor preleva două probe finale pentru analiza chimică. Oțelul din maselotă se acoperă cu 2...3kg/t praf termoizolant [98].

După terminarea turnării se înlătură pâlnia de turnare, iar groapa de turnare se acoperă cu un capac, pentru realizarea unei răcirii controlate. În groapă, cilindrii turnați sunt lăsați să se răcească, până la temperatura de max.80°C pe tăblie (durata de răcire este de aprox. 72...78 ore) [98]. Forma unui cilindru turnat aflat în groapa de turnare, înainte de dezbatere, este prezentată în fig.I.28.

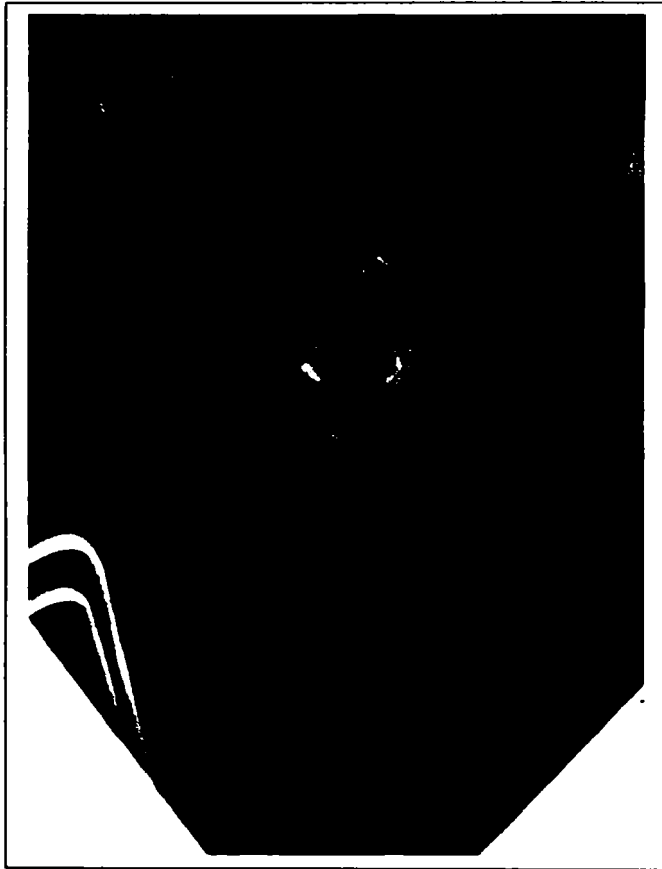


Figura I.28. Forma de turnare, înainte de dezbatere.

Dezbaterea cilindrilor se execută în ordinea inversă montării ramelor de formare (fig.I.29) iar, după dezbatere, cilindrii se vor depozita într-un loc ferit de curenți de aer rece, șocuri și umiditate.

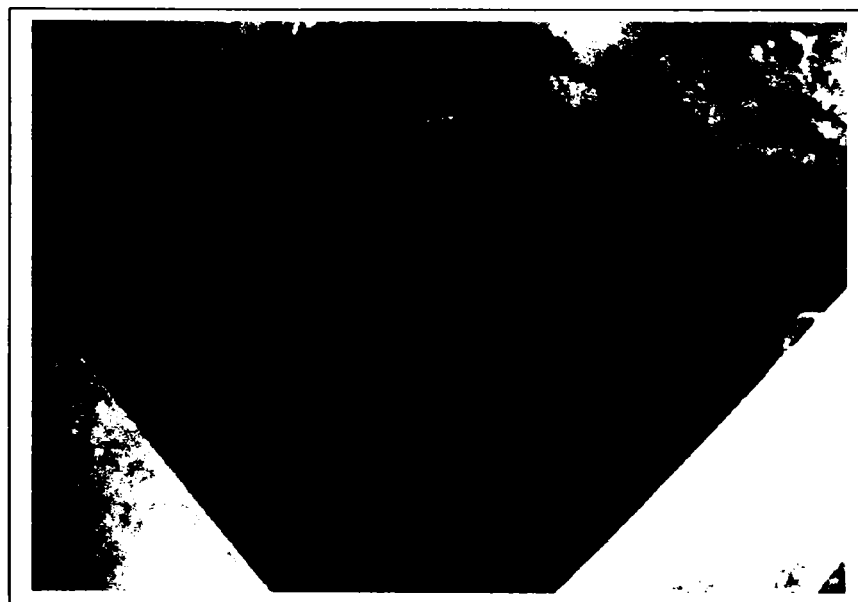


Figura I.29.
Dezbaterea
cilindrilor turnați.

Dimensiunile unui cilindru brut turnat sunt prezentate în fig. I.30, dimensiunile A și B alegându-se în funcție de destinația cilindrului (caja de laminare), respectiv diametrul tăbliei (de

exp., pentru un cilindru cu diametrul de 450 mm și lungimea tăbliei de 1050 mm, valorile lui A și B sunt 470, respectiv 480mm) [98].

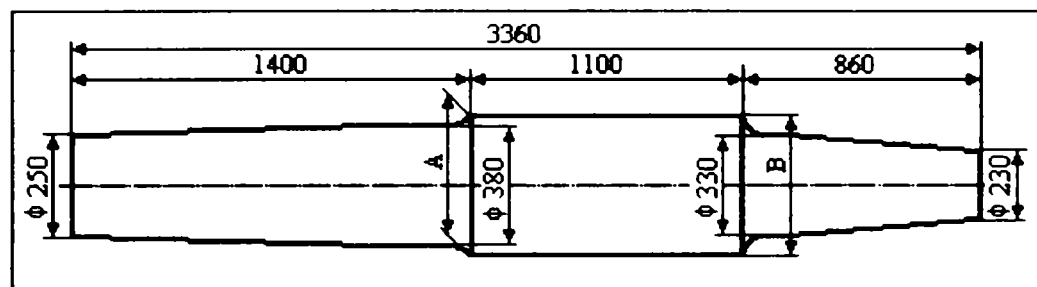


Figura I.30. Cilindru brut turnat.

Un set de patru cilindri turnați la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara sunt prezentați în fig.I.31.



Figura I.31. Cilindri de laminare brut turnați.

I.3.2.4. Curățirea și controlul calității

Curățirea și controlul calității constau în următoarele operații:

- se îndepărtează, fără șocuri mecanice, eventualele bavuri;
- se figurează pe fusul inferior datele pentru identificarea cilindrului (numărul de șarjă, numărul cilindrului);
- se verifică vizual întreaga suprafață a cilindrului, iar în cazul în care se încadrează în marca prescrisă și nu prezintă fisuri sau crăpături, cilindrul se recepționează și se expediază, pentru prelucrare, la secția Strungăria de Cilindri.

I.3.2.5. Eboșarea cilindrilor

Pentru efectuarea eboșării, se pornește de la dimensiunile cilindrului brut turnat. Astfel, cilindrii vor fi demaselotați și degroșați, operație ce constă în îndepărtarea maseletei și prelucrarea fusului superior la o formă cilindrică, cu diametrul cât al fusului inferior (în stare brut turnată) la racordul cu tăblia. După eboșare se execută controlul ultrasonic, în vederea stabilirii gradului de compactitate.

Se vor executa racordări cu raza de minim 40 mm [123]. În fig. I.32, este prezentat desenul cilindrului brut turnat, din care se obține, ulterior, prin prelucrare mecanică, cilindrul eboșat, desen executat cu ajutorul programului AutoCAD 2D, 3D [105],[106],[107],[108].

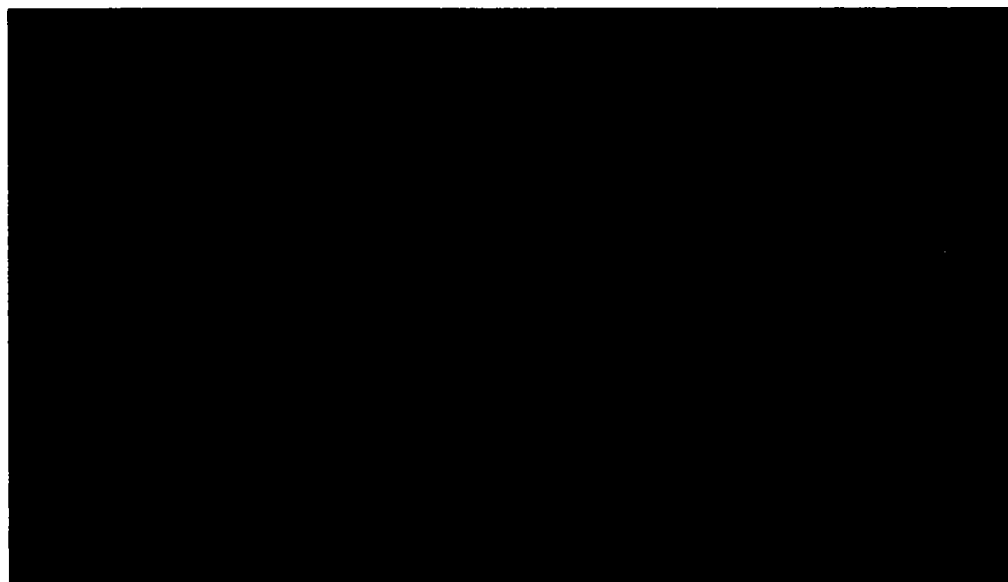


Figura I.32. Schița cilindului brut turnat și a cilindului eboșat ce urmează a se obține.

Schița unui cilindru eboșat, destinat Laminorului de Profile Mijlocii, este prezentată în fig. I.33.

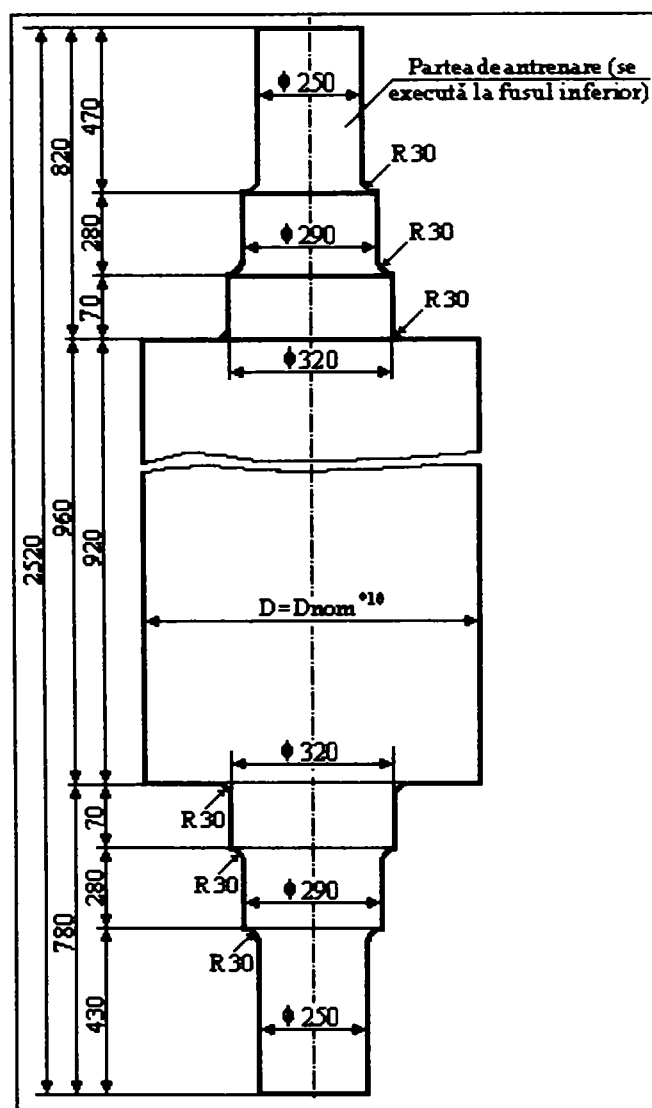


Figura I.33. Schița cilindului eboșat (Laminor profile mijlocii, cilindru de lucru $\phi 450 \dots 570 \times 900$, oțel Adamit):
 - Razele necotate: R10;
 - Muchiile se teșesc: $2 \times 45^\circ$;
 - Toleranțe de execuție conform STAS 2300-88 pentru execuție mijlocie

I.3.2.6. Tratamentul termic

O problemă deosebită o constituie stabilirea unui tratament termic corespunzător, care să asigure atât posibilitatea prelucrării, cât și obținerea unor durități finale la valori ridicate, capabile să ducă la o bună rezistență la uzare.

În stare brut turnată, cilindrii de laminare tip Adamit, au o duritate ridicată (392-399 HB) și, de aceea, sunt supuși unui tratament termic preliminar, de înmuiere, în urma căruia duritatea este micșorată la 260-285 HB, astfel încât aceștia vor putea fi supuși prelucrării mecanice prin așchiere. Diagrama tratamentului termic primar este prezentată în fig. I.34 [98].

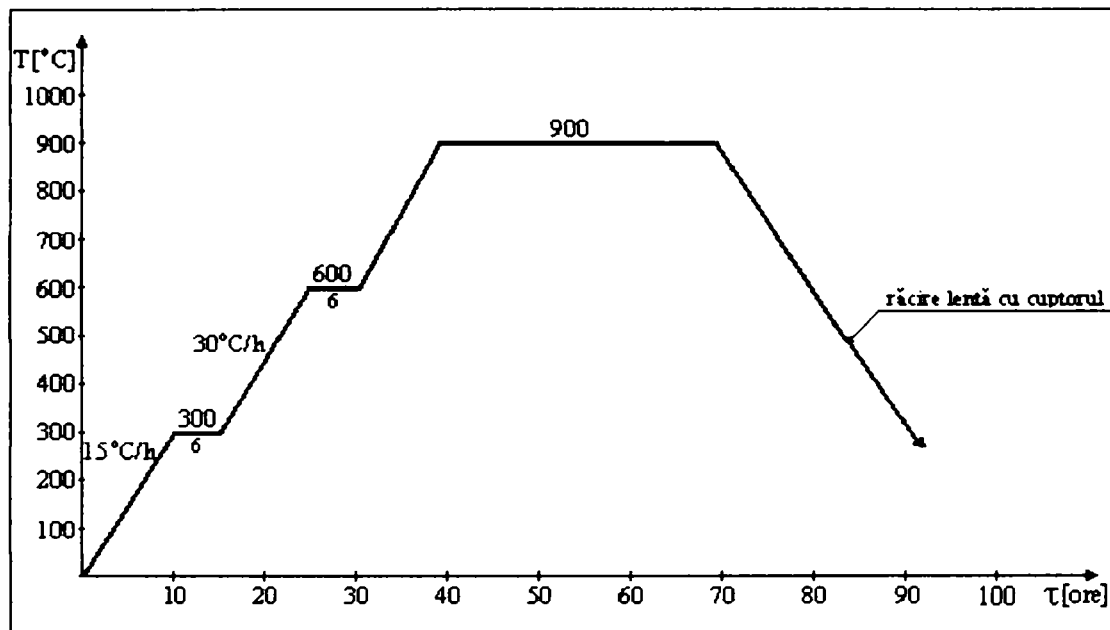


Figura I.34. Tratamentul termic primar pentru cilindrii de laminor turnați din oțel Adamit (recoacere de detensionare și înmuiere).

După prelucrarea mecanică, cilindrilor li se aplică un tratament termic secundar (călire), în urma căruia duritatea crește la valori de 380-440 HB pe tăblie și 290-310 HB pe fus [68]. Diagrama tratamentului termic secundar este prezentată în fig. I.35 [98].

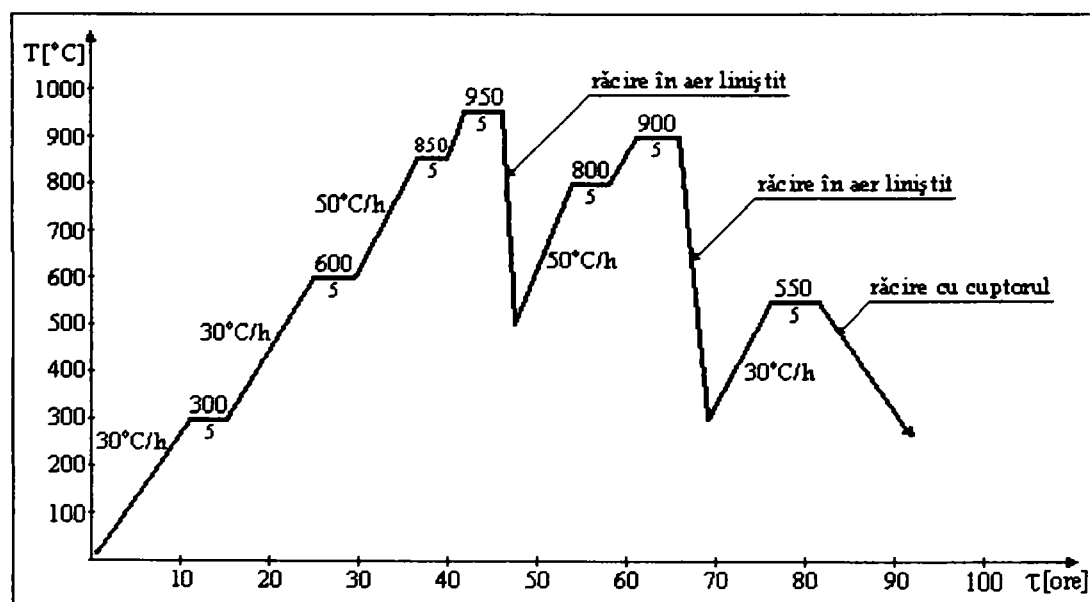


Figura I.35. Tratamentul termic secundar pentru cilindrii de laminor turnați din oțel Adamit.

Tratamentul termic aplicat cilindrilor turnați din oțeluri hipereutectoide, de compoziție chimică cunoscută, asigură finisarea granulației, însă uzura acestora rămâne totuși ridicată. Pentru mărirea rezistenței la uzare și a rezistenței mecanice a cilindrilor se recurge la alierea oțelului cu

crom, nichel și molibden. Elementele de aliere formează cu ferita și cementita soluții solide, mult mai tenace și dure, determinând și obținerea structurilor cu granulație fină.

Asemenea cilindri se folosesc în locurile foarte grele de muncă, ca de exemplu la laminarea sleburilor mari, în cajele reductoare și degrositoare care lucrează la presiuni înalte. În aceste cazuri, cilindrii se aliază cu 0,5 ÷ 1,2% crom și 0,3 ÷ 0,5% molibden. Rezistența la rupere a acestor cilindri la conținuturi de carbon de 0,6% este de 540 ÷ 680 N/mm² pe adâncimea de 75 mm de la suprafața tăbliei cilindrului [6].

După efectuarea tratamentului termic, cilindrii sunt curățați de stratul de var și oxizi, după care li se determină duritatea (pe tăbliei trebuie să fie cuprinsă între 380...430HB, iar pe fusuri 310...350HB). Verificarea durității tăbliei se face în trei puncte echidistante și pe trei generatoare la 120°, iar pe fusuri în două puncte situate la 180° unul față de altul, după care se face media aritmetică [96]. Pregătirea suprafețelor pentru determinarea durității se face prin polizare manuală îngrijită, iar determinarea se face cu durometrul Poldy.

I.3.2.7. Finisarea cilindrilor și recepția finală

În urma operațiilor prezentate anterior sunt executate, în cadrul secției Strungăria de Cilindri, calibrele pe suprafața tăbliei. Astfel, un cilindru de laminor, turnat din oțel hipereutectoid, tip Adamit, utilizat pentru laminarea profilului I, este prezentat în fig. I.36.

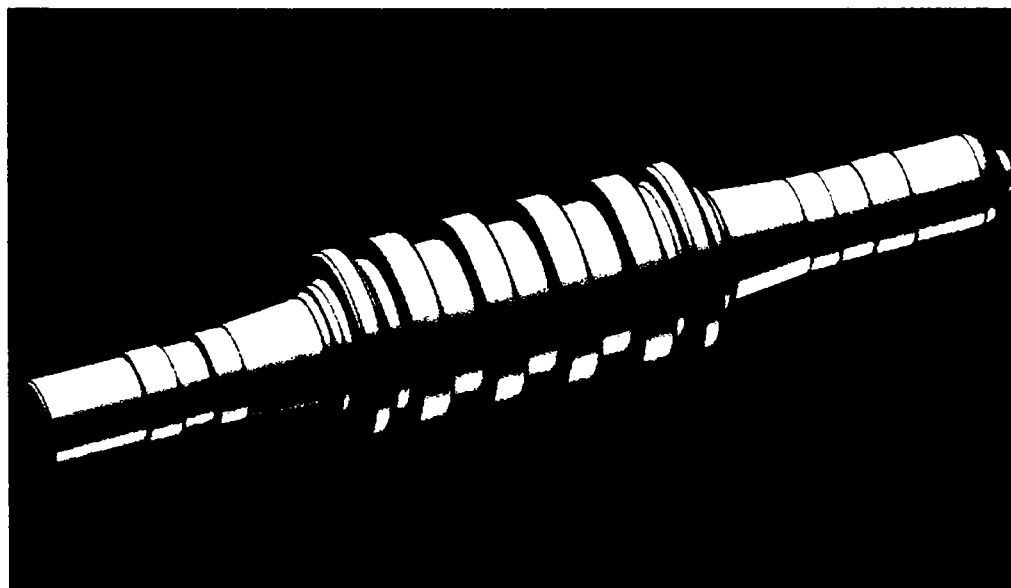


Figura I.36. Cilindru utilizat pentru laminarea profilului I.

I.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

În cadrul acestui capitol a fost efectuată:

- evidențierea sistematică a criteriilor de clasificare generală a cilindrilor de laminare, în funcție de: materialul din care se execută, domeniul de utilizare, duritatea suprafeței de lucru, dimensiuni, tehnologia de turnare, compoziția chimică, tratamentul termic
- punctarea factorilor de care depinde comportarea în exploatare a cilindrilor de laminare și care impun, astfel, alegerea materialului cilindrilor și a tehnologiei de fabricație a acestora

Ca și contribuții persoanele pot fi amintite:

- prezentarea, pe faze de execuție, a fluxului tehnologic de fabricație a cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid tip Adomit, la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara
- analiza condițiilor reale de turnare a cilindrilor de laminare

CAPITOLUL II

DETERMINAREA CARACTERISTICILOR DE MATERIAL PENTRU OȚELUL HIPEREUCTOID, TIP ADAMIT, DESTINAT TURNĂRII CILINDRILOR DE LAMINARE. ÎNCERCĂRI PRACTICE

Cilindrii de laminare reprezintă unul din cele mai importante componente (scule) utilizate în domeniul laminării materialelor metalice. Eficiența economică a producției de laminate depinde, în mare măsură, de calitatea cilindrilor de laminare, a căror durabilitate în exploatare este determinată de:

- caracteristicile materialului din care sunt fabricați
- condițiile de exploatare
- caracteristicile și starea materialelor ce se laminează.

II.1. CARACTERISTICILE OȚELURILOR HIPEREUCTOIDE UTILIZATE LA TURNAREA CILINDRILOR DE LAMINARE

Pe plan național, experimentările în direcția asimilării și definirii caracteristicilor structurale și fizico-mecanice ale oțelurilor hipereuctoide cu conținut ridicat de carbon au început în anul 1970 [68]. La S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, asimilarea tehnologiei de fabricație a cilindrilor tip Adamit a început în anul 1988, dar turnarea acestora a luat o amploare tot mai mare începând cu anul 1993 [96]. Aceste oțeluri au particularități care au condus la utilizarea lor pe scară largă la fabricarea cilindrilor pentru laminoare. Dintre aceste particularități, cele mai importante sunt [47]:

- rezistență mare la uzare;
- permit obținerea unei structuri omogene în toată masa cilindrului;
- duritatea ridicată se realizează pe seama unor constituenți stabili care se obțin din turnare;
- permit corelarea adecvată a caracteristicilor fizico-mecanice, în vederea asigurării unei bune comportări în exploatare.

Cilindrii de laminare lucrează în condiții de frecare uscată, de regulă la temperaturi ridicate, sub acțiunea mecanică a laminatului. Ținându-se cont de solicitările și fenomenele de uzare ce apar în exploatare, rezultă principalele caracteristici impuse materialelor destinate fabricării cilindrilor de laminare: rezistență mare la uzare, rezistență la șoc termic, tenacitate, rezistență de rupere la tracțiune, duritate mare a suprafeței de lucru, refractaritate, conductibilitate termică ridicată, stabilitate structurală la temperatură înaltă, stabilitate față de decarburare și față de oxidarea superficială. Astfel, calitatea și alegerea optimă a materialului din care sunt produși cilindrii de

laminare, constituie o premisă pentru realizarea cu succes a sarcinilor în secțiunile de laminoare [6], [12], [47],[88].

Obținerea prin turnare a unor cilindri de laminare cu durabilitate ridicată în exploatare a constituit o preocupare permanentă a specialiștilor din țară și din străinătate. Astfel, literatura de specialitate [79], prezintă o clasificare a aliajelor Fe - C, în funcție de duritate și rezistența la tracțiune a acestora (fig. II.1).

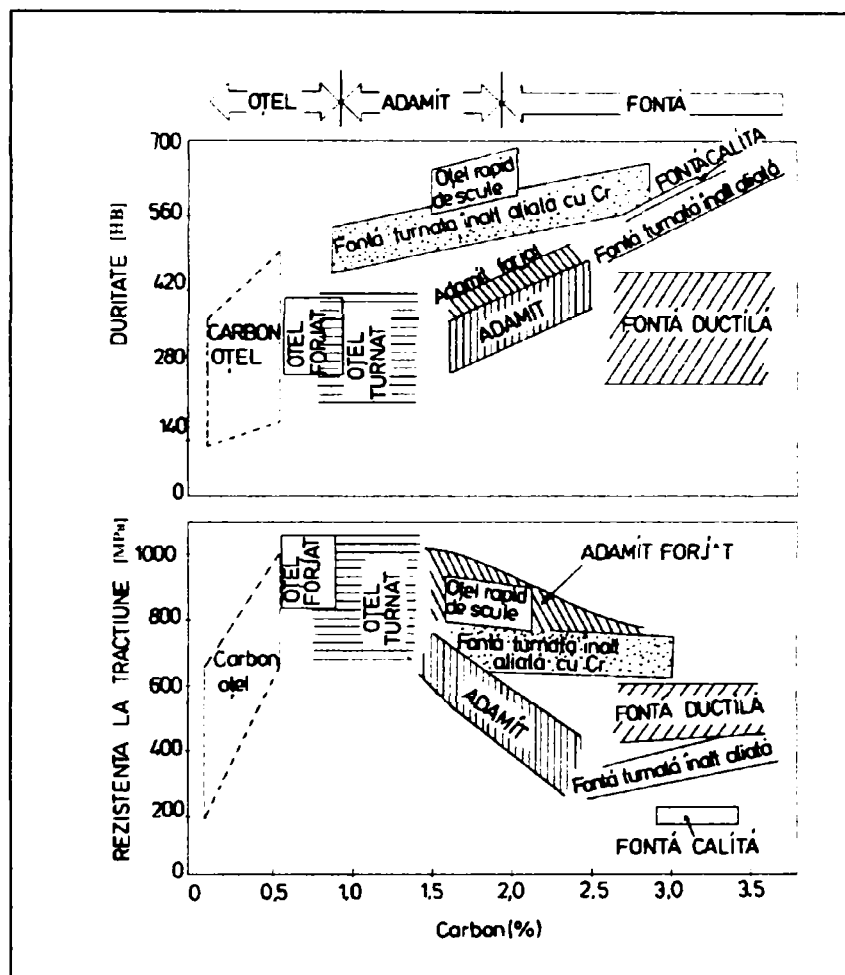


Figura II.1. Clasificarea aliajelor Fe-C, în funcție de duritatea și rezistența acestora.

Rezistența și duritatea cilindrilor turnați din oțel sunt determinate, ca și în cazul celor din fontă, de conținutul de carbon (fig. II.1). Creșterea conținutului de carbon în gama de structuri, se traduce prin scăderea rezistenței mecanice și alungirii, respectiv prin creșterea durității, deci a rezistenței la uzare și prin micșorarea susceptibilității de ardere a materialului [6].

Cilindrii din oțel (în comparație cu cei din fontă) posedă rezistențe și reziliențe ridicate și, de aceea, se folosesc la laminoarele care lucrează cu sarcini mari și reduceri apreciable. Cilindrii din oțel hipereutectoid, au durități ridicate și valori ridicate ale rezistenței la uzare și se utilizează pe acele linii de laminare unde sunt necesare rezistențe ridicate la uzare și rezistențe mecanice suficiente (de regulă, în cazele prefinisoare ale laminoarelor de profile) [96]. Compoziția chimică, care a condus la cele mai bune rezultate în ceea ce privește caracteristicile fizico-mecanice și de exploatare a cilindrilor, s-a dovedit a fi: 1,7-2,2%C; 0,6-1,5%Si; 0,7-0,9%Mn; 1,0-2,0%Ni; 0,7-1,5%Cr; 0,3-0,5%Mo; max. 0,04%P; max.0,02%S [68].

Dependența proprietăților mecanice ale cilindrilor nealiați turnați din oțel și din fontă cu crustă dură, în funcție de carbon, este prezentată în fig. II.2 [6].

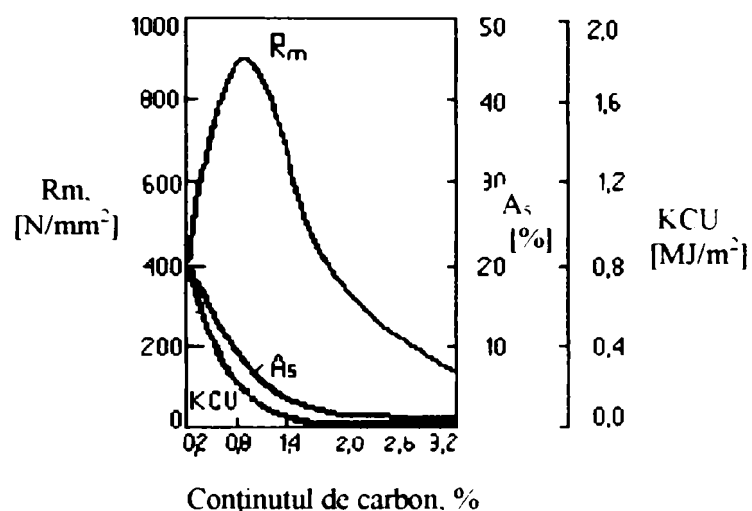


Figura II.2. Influența conținutului în carbon asupra caracteristicilor mecanice ale aliaului din care s-au turnat cilindri.

Din diagrama din fig. II.2 se observă scăderea continuă a rezistenței la rupere pe măsura creșterii conținutului de carbon, începând de la 0,8%, continuându-se și în domeniul oțelului hipereutectoid și al fontelor albe. Acest lucru se datorește creșterii suplimentare a cantității de carburi. Tratamentul termic aplicat cilindrilor turnați din oțel permite reglarea durității și rezistenței acestora.

Spre deosebire de cilindri din fontă cu grafit nodular, cei din oțel Adamit se caracterizează printr-o uniformitate mai mare a structurii și a proprietăților (fig. II.3), de la suprafață spre axă [70].

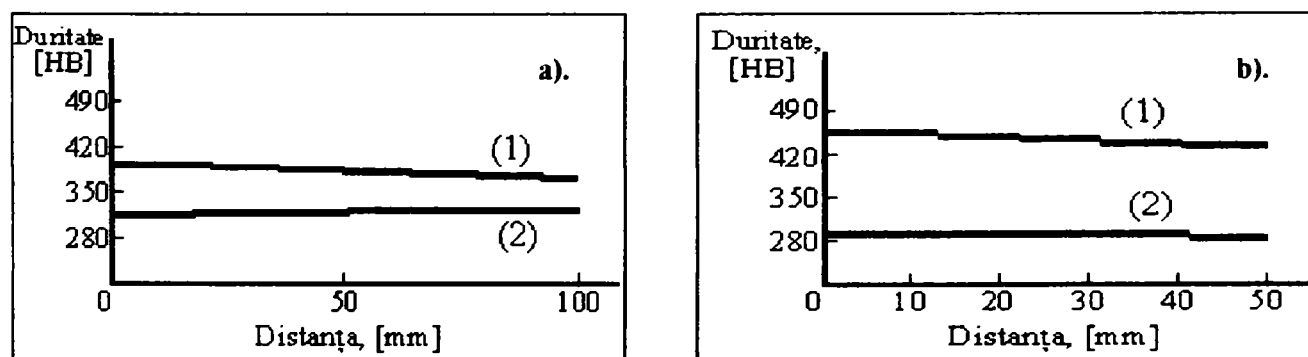


Figura II.3. Variația durității cu adâncimea: a): *curba 1* – cilindru din fontă cu grafit nodular (955x1750mm), utilizat la laminarea profilelor I; *curba 2* – cilindru din oțel Adamit (815x1750mm), utilizat la laminarea profilelor I; b): *curba 1* – cilindru din fontă cu grafit nodular (620x1100mm), utilizat la laminarea profilelor I; *curba 2* – cilindru din oțel Adamit (602 x 1300mm), utilizat la laminarea țagelilor.

II.2. DETERMINAREA, PE PROBE, A CARACTERISTICILOR MECANICE ALE OȚELULUI HIPEREUTECTOID, TIP ADAMIT (OT-A3), TURNAT LA S.C. SIDERURGICA S.A. HUNEDOARA

În vederea determinării caracteristicilor mecanice ale oțelului din care sunt turnați cilindrii de laminare, respectiv OT-A3, la turnare au fost prelevate probe, de formă cilindrică (prezentate în fig. II.4), cu următoarele dimensiuni: diametrul $d = 60$ mm și lungimea $L = 300$ mm. Probele au fost turnate în cochile vopsite cu vopsea refractară. Datorită proprietăților termiozolatoare ale vopselelor refractare s-a dirijat în mod voit, schimbul de transfer termic spre exterior, prin

micșorarea considerabilă a vitezei de răcire. Probele au fost prelevate din trei șarje, din care s-au turnat seturi de câte patru cilindri, cu dimensiuni diferite (tab. II.1).

Tabelul II.1. Compoziția chimică a șarjelor din care au fost turnate probele în vederea determinării caracteristicilor mecanice.

Nr crt	Nr. cil / Nr. șarjă	Dimensiuni, Dxl, [mm] / Greutate, [t]	Compoziția chimică, [%] (conform Buletin Analiză 49/26.03.2003)										Nr. probei turnate
			C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	
1	0936/03728	550x900/5,4	1,86	0,73	0,73	0,005	0,021	1,05	1,62	0,2	0,32	0,04	1,2,3,4,5
2	0937/03728	530x900/5,1											
3	0938/03728	460x900/4,2											
4	0939/03728	450x900/4,0											
			Compoziția chimică, [%] (conform Buletin Analiză 56/07.04.2003)										
			C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	
5	0940/03734	550x900/5,4	1,93	0,83	0,68	0,008	0,029	1,03	1,66	0,16	0,30	0,04	6,7,8
6	0941/03734	530x900/5,1											
7	0942/03734	480x900/4,5											
8	0943/03734	450x900/4,0											
			Compoziția chimică, [%] (conform Buletin Analiză 65/18.04.2003)										
			C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	
9	0952/03739	550x900/5,4	1,99	0,80	0,70	0,005	0,003	1,20	1,61	0,20	0,35	0,06	9,10,11,12
10	0953/03739	540x900/5,2											
11	0954/03739	460x900/4,2											
12	0955/03739	450x900/4,0											

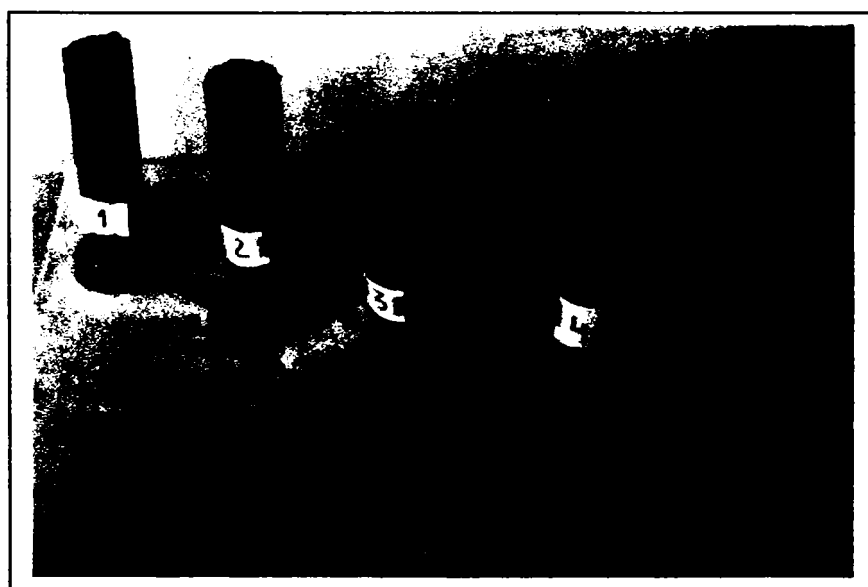


Figura. II.4. Probe turnate în vederea determinării caracteristicilor mecanice.

Probelor turnate li s-a determinat duritatea cu ajutorul Durometrului Rockwell, aflat în dotarea Laboratorului de Tratamente Termice, din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara. Duritățile s-au determinat în spirală, pe trei generatoare, situate la 120° între ele. Duritățile înregistrate, conform fig.II.5, sunt prezentate în tab. II.2 [6],[113].

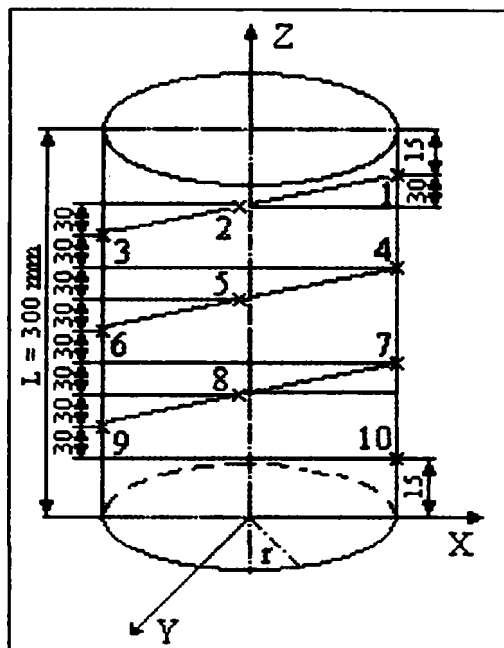


Figura II.5. Dimensiunile probei turnate și prezentarea punctelor în care s-au înregistrat duritățile:

r - raza probei ($r = 30\text{mm}$);
 1, 2... 10 - punctele în care sunt determinate duritățile, situate pe lungimea $L=300\text{mm}$ a probei.

Tabelul II.2. Valorile durităților înregistrate, conform fig. II.5, pentru probele turnate.

Numărul și poziția punctului pe probă	Durități înregistrate											
	Șarja 03728 - Număr probă					Șarja 03734 - Nr. probă			Șarja 03739 - Număr probă			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]
1 ($z_1=285\text{mm}$)	42 390	43 400	44 420	41 380	44 420	53 510	53 506	49 456	54 536	43 400	42 390	44 410
2 ($z_2=255\text{mm}$)	44 410	44 410	47 440	49 456	48 452	45 430	44 420	49 460	51 480	49 456	51 480	51 485
3 ($z_3=225\text{mm}$)	47 440	48 448	45 430	51 480	47 440	48 449	51 485	43 400	48 449	51 482	49 460	51 482
4 ($z_4=195\text{mm}$)	43 405	41 380	43 400	41 380	43 428	52 497	52 490	49 465	51 480	50 470	49 460	46 437
5 ($z_5=165\text{mm}$)	48 452	49 450	49 460	48 448	49 450	49 456	45 435	49 450	45 430	52 490	52 490	50 473
6 ($z_6=135\text{mm}$)	48 449	51 480	47 440	51 481	47 440	47 440	46 436	49 463	49 450	43 428	52 497	49 460
7 ($z_7=105\text{mm}$)	49 456	42 390	44 410	43 427	48 450	51 480	49 460	51 480	49 456	52 490	51 481	52 490
8 ($z_8=75\text{mm}$)	49 454	49 458	51 485	46 437	49 456	44 420	43 400	45 435	44 420	52 500	48 448	49 456
9 ($z_9=45\text{mm}$)	49 450	52 490	49 450	50 473	46 437	42 393	44 422	43 405	49 457	50 473	49 460	48 448
10 ($z_{10}=15\text{mm}$)	46 438	43 428	45 427	46 437	47 442	47 440	49 460	52 495	51 480	47 440	49 456	51 481
Duritate medie	46,5 434,2	46,2 433,6	46,4 436	46,6 439,9	46,8 441,8	47,8 451,55	47,6 451,43	47,9 450,94	49,1 463,77	48,9 462,95	49,2 462	49,1 462,24
DURIT. MEDIE ȘARJĂ [HB]	437,1					451,3067			462,74			

Cu ajutorul datelor înregistrate în tab. II.2, au fost realizate o serie de corelații și dependențe. Astfel, în fig. II.6 este prezentată histograma durităților medii ale probelor turnate din șarja nr. 03728.

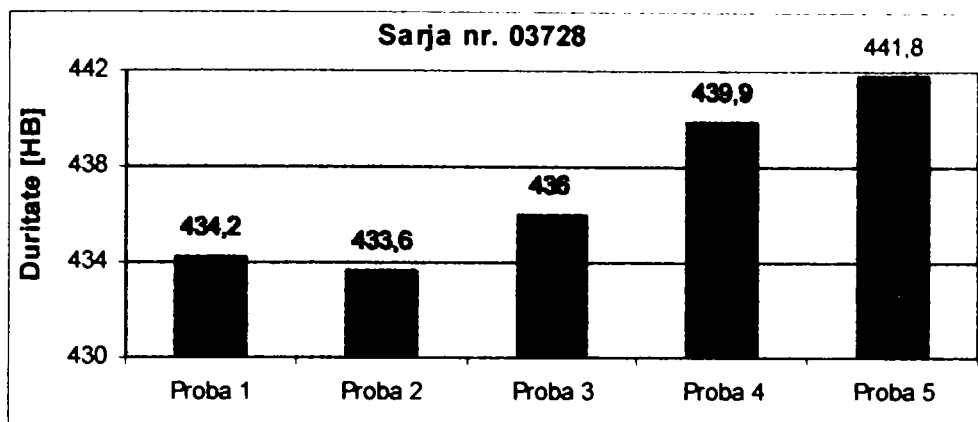


Figura II.6. Histograma durităților înregistrate pe probele turnate din șarja nr.03728.

Din fig.II.6 se observă faptul că duritățile se încadrează în intervalul 433,6...441,8 HB.

În fig.II.7, este prezentată variația durităților medii înregistrate pentru probele turnate din șarja nr.03734. Valoarea minimă a durităților înregistrate, în acest caz, $HB_{\min} = 450,9$ iar cea maximă $HB_{\max} = 451,5$.

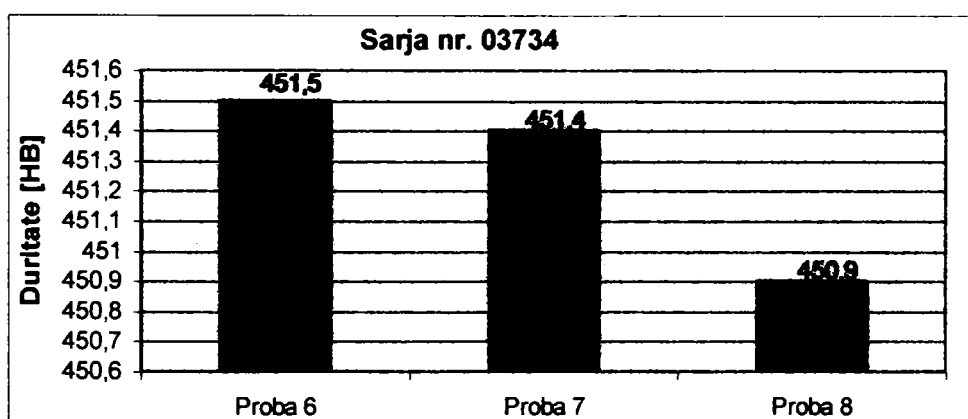


Figura II.7. Histograma durităților înregistrate pe probele turnate din șarja nr.03734.

Histograma durităților înregistrate pentru probele turnate din șarja nr.03739 este prezentată în fig.II.8. Valoarea maximă a durității, în acest caz, este 463,8HB, iar cea minimă 462,2HB.

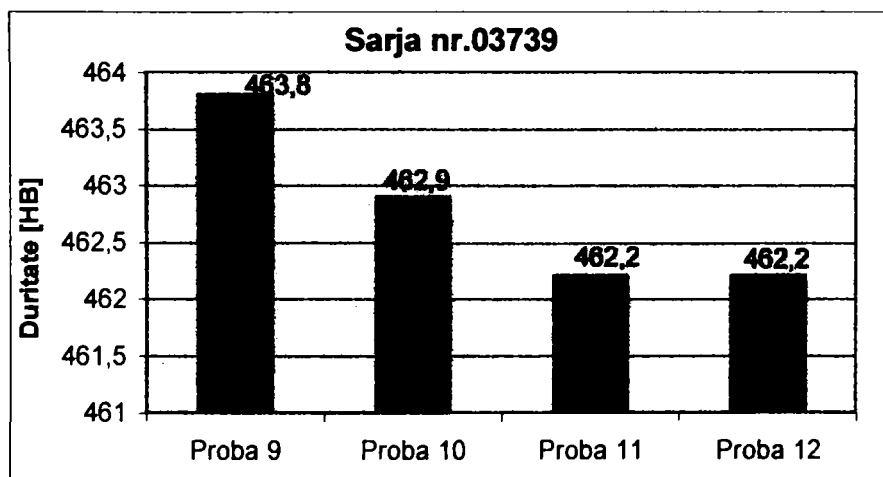


Figura II.8. Histograma durităților înregistrate pe probele turnate din șarja nr.03739.

Utilizând programul EXCEL pentru prelucrarea datelor experimentale am obținut ecuații de regresie simple liniare sau neliniare, respectiv polinomiale de gradul II, între parametrii dependenți (duritățile medii ale șarjelor elaborate) și parametrii independenți (conținuturile de C, Cr, Ni, Mo ale șarjelor), coeficienții de regresie, precum și reprezentările grafice.

Dacă se trasează curba de variație a durităților medii înregistrate pe șarje cu conținutul de carbon al șarjelor se obține curba din fig.II.9. Pe reprezentarea grafică este prezentată ecuația de regresie (polinomială, de gradul II) și coeficientul de corelație. Din diagrama prezentată în fig.II.9

se observă creșterea liniară a durității odată cu creșterea conținutului de carbon. În fig. II.10, II.11, II.12, sunt prezentate, similar, variațiile durităților medii cu conținutul elementelor de aliere Cr, Ni, Mo.

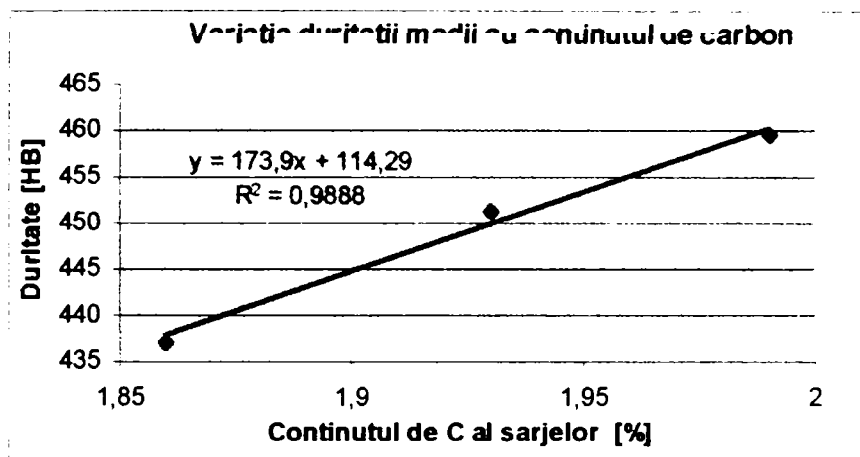


Figura II.9. Variația durităților medii, cu conținutul de carbon al celor trei șarje.

Figura II.10. Variația durităților medii, cu conținutul de crom al celor trei șarje.

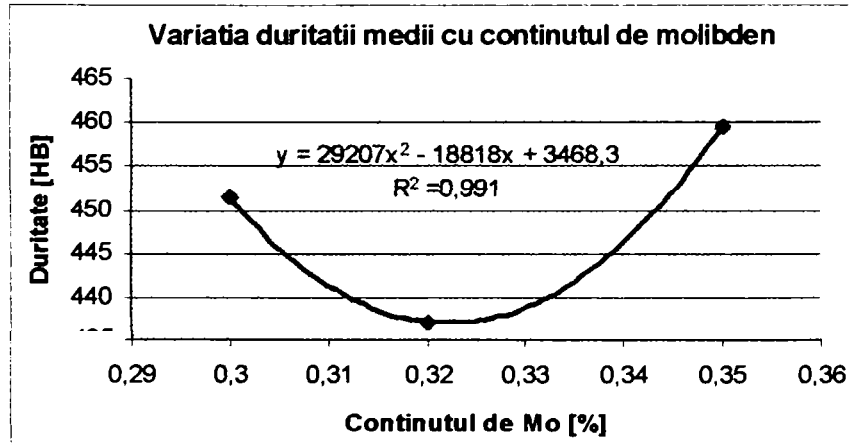
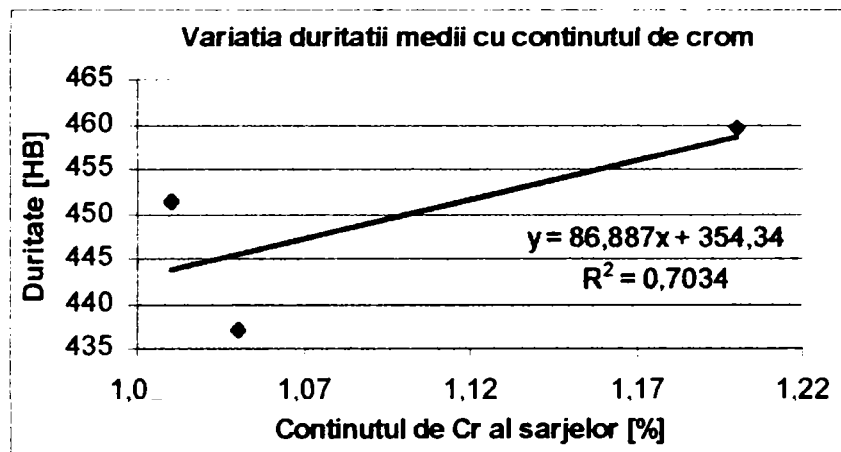
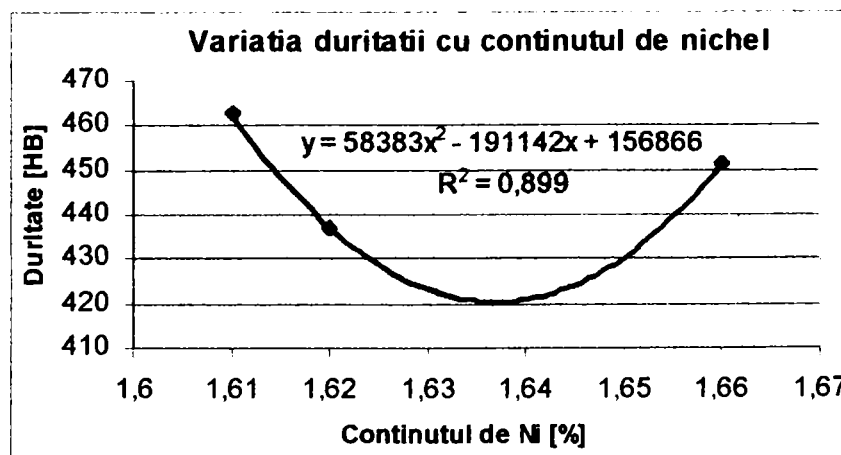


Figura II.11. Variația durităților medii, cu conținutul de molibden al celor trei șarje.

Figura II.12. Variația durităților medii, cu conținutul de nichel al celor trei șarje.



Cele 12 probe, turnate din trei șarje diferite, sunt supuse aceluiași tratament termic ca și cilindrii turnați. Astfel, respectându-se diagrama de tratament termic primar a cilindrilor, s-a întocmit diagrama pentru proba cilindrică [96]. Aceasta este prezentată în fig. II.13.

Tratamentul termic primar a fost executat într-un cuptor tip cameră, încălzit cu rezistență electrică, cu puterea de 32kW, din cadrul Facultății de Inginerie Hunedoara.

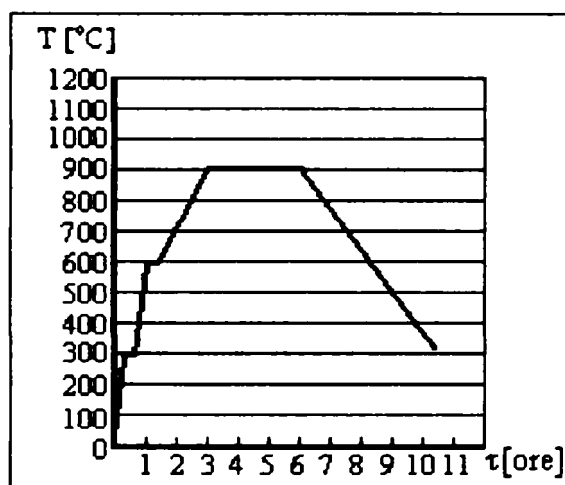


Figura II.13.
Diagrama de tratament termic primar aplicat probei cilindrice turnate:

- încălzire la 300°C;
- menținere 10 min. la 300°C;
- încălzire la 600°C;
- menținere 55 min. la 600°C;
- încălzire la 900°C;
- menținere 180 min. la 900°C;
- răcire cu cuptorul.

După efectuarea tratamentului termic primar, au fost determinate, din nou (pe același Durometru Rockwell), duritățile probelor ce urmează a fi supuse prelucrării prin așchiere, în vederea obținerii epruvetelor pentru determinarea rezistenței la tracțiune a materialului [6],[113].

Schema pentru înregistrarea durităților este prezentată în fig. II.14, iar valorile înregistrate sunt prezentate în tab.II.3.

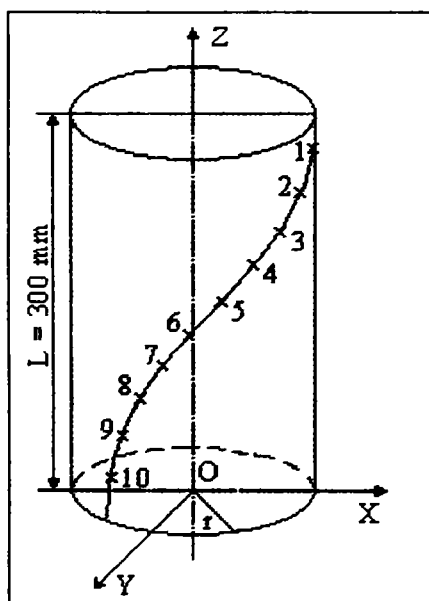


Figura II.14. Schema pentru înregistrarea durităților pe probele cilindrice, după efectuarea tratamentului termic primar. Punctele 1,2...10 sunt situate la înălțimile z_i , respectiv: $z_1=285\text{mm}$; $z_2=255\text{mm}$; $z_3=225\text{mm}$; $z_4=195\text{mm}$; $z_5=165\text{mm}$; $z_6=135\text{mm}$; $z_7=105\text{mm}$; $z_8=75\text{mm}$; $z_9=45\text{mm}$; $z_{10}=15\text{mm}$;

Tabelul II.3. Valorile durițărilor înregistrate, conform fig.II.14, pentru probele cilindrice, după efectuarea tratamentului termic primar.

Numărul și poziția punctului pe probă	Durițăți înregistrate											
	Sarja 03728 - Număr probă					Sarja 03734 - Nr. probă			Sarja 03739 - Număr probă			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]
1 ($z_1=285\text{mm}$)	30 290	30 290	29 285	31 300	34 320	27 264	31 296	32 308	33 312	36 342	37 348	35 333
2 ($z_2=255\text{mm}$)	30 290	32 310	32 306	31 305	29 280	28 278	29 285	33 312	35 335	36 338	39 356	35 335
3 ($z_3=225\text{mm}$)	29 285	34 320	32 310	30 293	31 302	35 330	27 273	36 336	38 348	36 342	35 330	38 349
4 ($z_4=195\text{mm}$)	31 300	31 302	33 312	29 280	30 290	33 319	31 300	32 310	38 350	38 349	39 360	36 339
5 ($z_5=165\text{mm}$)	32 310	31 294	30 290	32 310	28 275	31 300	34 326	30 292	39 361	35 336	38 352	39 363
6 ($z_6=135\text{mm}$)	32 308	28 275	28 275	32 307	27 273	39 361	36 340	35 330	36 337	34 325	38 350	36 337
7 ($z_7=105\text{mm}$)	30 290	29 282	30 290	33 318	31 300	37 345	39 366	35 328	37 345	36 343	37 345	37 345
8 ($z_8=75\text{mm}$)	29 286	30 296	30 295	30 290	35 332	36 338	38 354	34 320	38 350	36 340	35 336	34 320
9 ($z_9=45\text{mm}$)	31 300	31 300	32 310	28 275	33 312	38 348	35 330	34 314	38 352	38 350	34 320	36 342
10 ($z_{10}=15\text{mm}$)	34 319	32 310	32 310	30 290	31 304	36 340	34 320	37 343	36 341	38 352	32 310	36 340
Duritate medie	30,80 297,89	30,8 297,95	30,8 298,34	30,6 298,3	30,9 298,84	34,0 322,34	33,4 319,3	33,8 319,3	36,8 343,1	36,3 341,36	36,4 340,23	36,2 340,3
DURIT. MEDIE ȘARJĂ [HB]	298,264					320,213			341,247			

Similar cu graficele efectuate pentru probele turnate, s-au trasat histogramele durițărilor medii înregistrate în urma tratamentului termic primar. Acestea sunt prezentate în fig.II.15, II.16, II.17. Pentru o mai bună vizualizare a valorilor medii înregistrate pentru durițăți, în fiecare histogramă sunt indicate valorile durițărilor înregistrate.

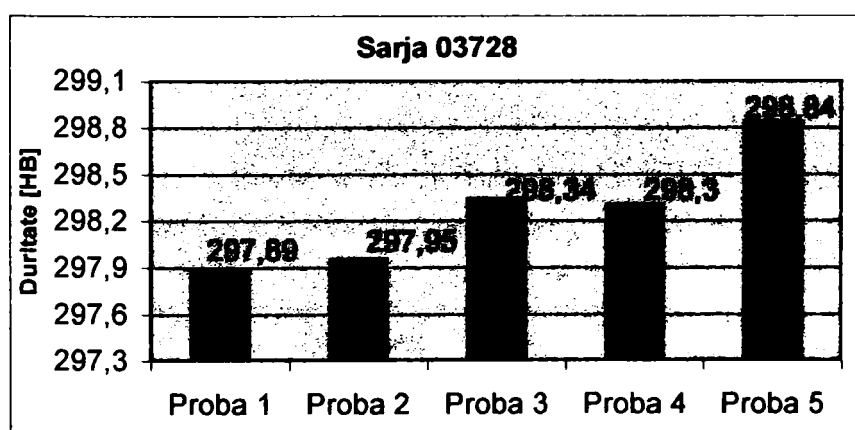


Figura II.15. Histograma durițărilor înregistrate în cazul șarjei 03728, după executarea tratamentului termic primar.

Figura II.16. Histograma duriților înregistrate în cazul șarjei 03734, după executarea tratamentului termic primar.

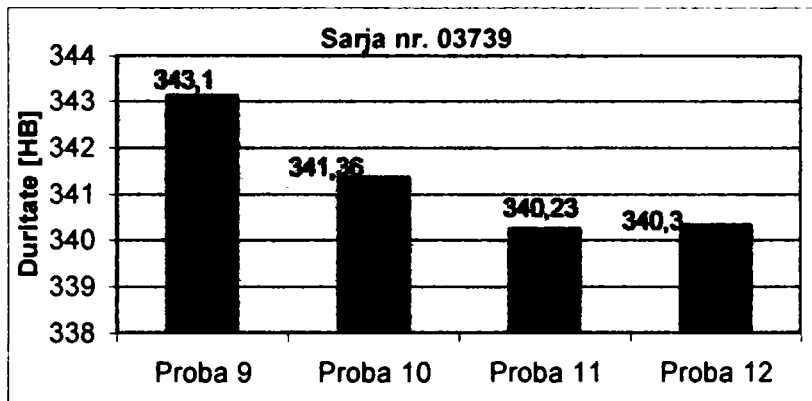
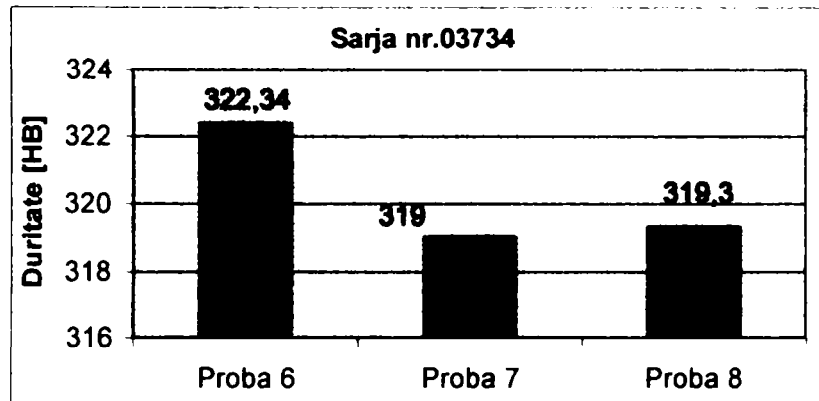


Figura II.17. Histograma duriților înregistrate în cazul șarjei 03739, după executarea tratamentului termic primar.

Din cele 12 probe cilindrice turnate au fost obținute 12 epruvete (fig. II.18), ale căror dimensiuni sunt prezentate în fig.II.19 [91], [98].

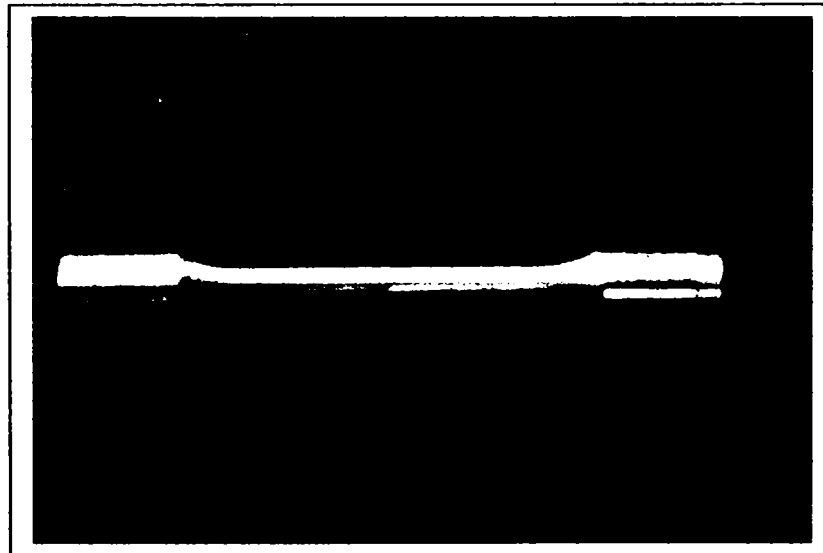


Figura II.18. Epruvetă obținută din proba cilindrică, turnată din oțel hipereutectoid.

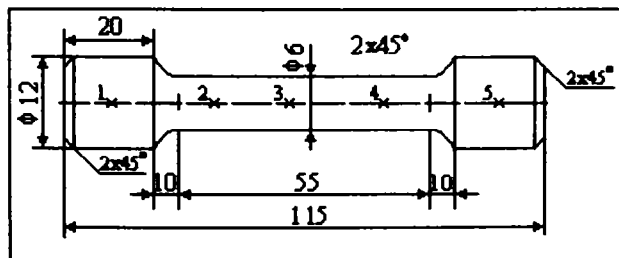


Figura II.19. Dimensiunile epruvetelor cilindrice, turnate din oțel hipereutectoid, tip OT-A3 și schițarea punctelor pentru determinarea duriții (punctele 1,2,3,4,5).

După confecționare, epruvetele au fost supuse tratamentului termic secundar, într-un cuptor tip cameră, cu bare de silită, aflat în cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara. Diagrama tratamentului termic secundar a fost stabilită ținându-se cont de diagrama de tratament termic secundar aplicat cilindrilor [96] și este prezentată în fig. II.20.

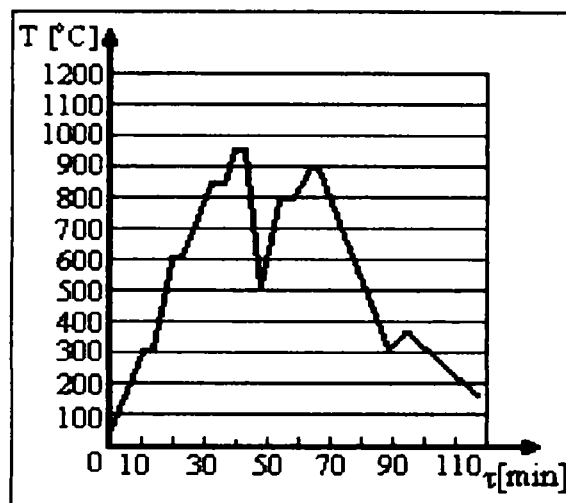


Figura II.20.

Diagrama de tratament termic secundar aplicat epruvetelor:

- încălzire la 300°C și menținere 3 min. la 300°C;
- încălzire la 600°C și menținere 3 min. la 600°C;
- încălzire la 850°C și menținere 3 min. la 850°C;
- încălzire la 950°C și menținere 3 min. la 950°C;
- răcire în aer, până la 500°C;
- încălzire la 800°C și menținere 3 min. la 800°C;
- încălzire la 900°C și menținere 3 min. la 900°C;
- răcire în aer, până la 300°C;
- încălzire la 350°C și menținere 3 min. la 300°C;
- răcire cu cuptorul.

Tabelul II.4 prezintă duritățile înregistrate pe epruvete (în punctele 1,2,3,4,5, schițate în fig.II.19), în urma aplicării tratamentului termic secundar. Duritățile au fost determinate cu același aparat respectiv, Durometrul Rockwell, din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara [6], [113].

Tabelul II.4. Duritățile înregistrate pe epruvete după tratamentul termic secundar.

Poziția punctului pe epruvetă	Durități înregistrate											
	Sarja 03728 - Număr epruvetă					Sarja 03734 - Nr. epruv			Sarja 03739 - Număr epruvetă			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]	[HRC] [HB]
Punctul 1	30 290	29 280	34 320	33 315	31 298	34 320	32 310	30 290	39 360	39 370	37 345	34 321
Punctul 2	39 360	39 371	33 314	41 380	31 300	32 310	42 391	38 351	36 343	37 345	36 340	36 340
Punctul 3	32 312	26 261	34 320	30 290	32 310	35 330	33 316	30 290	37 345	36 337	39 370	36 340
Punctul 4	37 345	39 370	36 334	34 322	41 380	39 371	38 352	42 391	39 360	39 360	38 352	39 370
Punctul 5	34 320	38 355	37 348	37 337	40 374	43 399	37 346	42 390	40 375	39 360	37 347	41 385
Duritate medie	34,4 325,5	34,2 327,3	34,8 327,3	35,0 328,8	35,0 332,5	36,6 346,0	36,4 343,0	36,4 342,4	38,2 356,5	38,0 354,4	37,4 350,7	37,2 351,2
DURIT. MEDIE ȘARJĂ [HB]	328,28					343,8233			353,2325			

Cele 12 epruvete au fost supuse încercării de rupere la tracțiune, la mașina aflată în dotarea Laboratorului de Rezistența Materialelor (fig.II.21), din cadrul Facultății de Inginerie din Hunedoara [98].

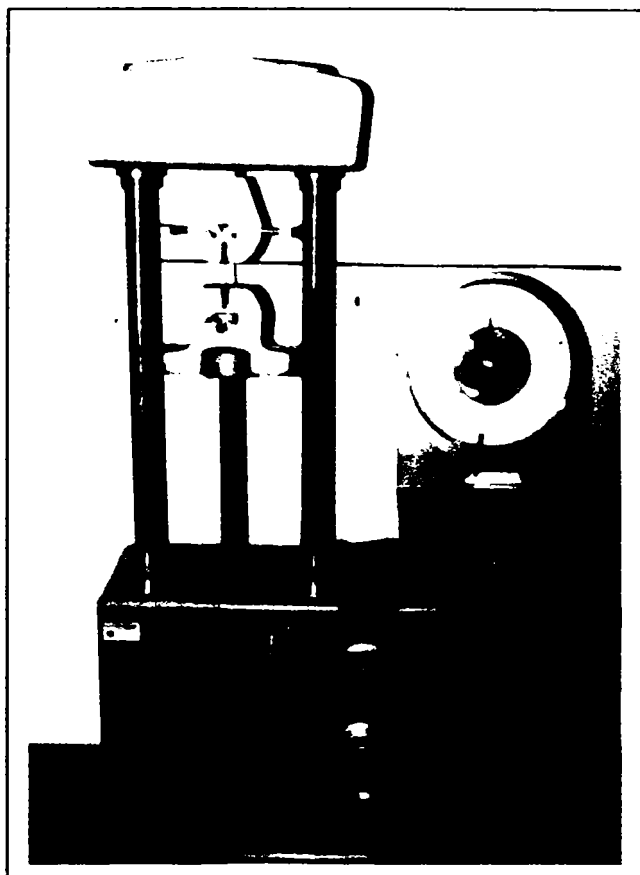


Figura II.21. Mașina de încercat la tracțiune, din cadrul Facultății de Inginerie Hunedoara.

În tab. II.5, sunt prezentate forțele de rupere pentru epruvetele supuse încercării de rupere prin tracțiune (F_r , în daN), diametrul epruvetelor (d_o , în mm) și sunt determinate secțiunea epruvetelor și rezistența mecanică medie.

Tabelul II.5. Caracteristicile mecanice înregistrate pentru epruvetele supuse încercării la rupere prin tracțiune.

	d_o , [mm]	$S_o = \frac{\pi \cdot d_o^2}{4}$, [mm ²]	F_r , [daN]	$R_m = \frac{F_r}{S_o}$, [daN/mm ²]	$R_{m \text{ mediu}}$, [daN/mm ²]
Epruveta 1	6	28,2743	930	32,89206	32,87791
Epruveta 2			910	32,1847	
Epruveta 3			930	32,89206	
Epruveta 4			938	33,175	
Epruveta 5			940	33,24574	
Epruveta 6			1020	36,07516	
Epruveta 7	6	28,2743	940	33,24574	34,66045
Epruveta 8			980	34,66045	
Epruveta 9			920	32,53838	
Epruveta 10	6	28,2743	910	32,1847	32,27312
Epruveta 11			900	31,83103	
Epruveta 12			920	32,53838	

Curbele tensiune - deformație ($\sigma - \epsilon$) pentru toate epruvetele încercate au aspectul prezentat în fig.II.22, deformarea plastică care precede ruperea este neînsemnată (materialul metalic fiind foarte fragil), alungirea, în medie, având valoarea de 0,86%. În fig.II.23 este prezentată epruveta ruptă în urma încercării de rupere la tracțiune.

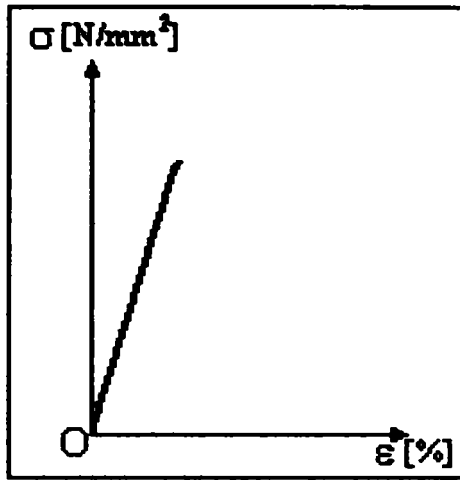


Figura II.22. Aspectul curbei tensiune-deformație, pentru oțelul hipereutectoid OT-A3.

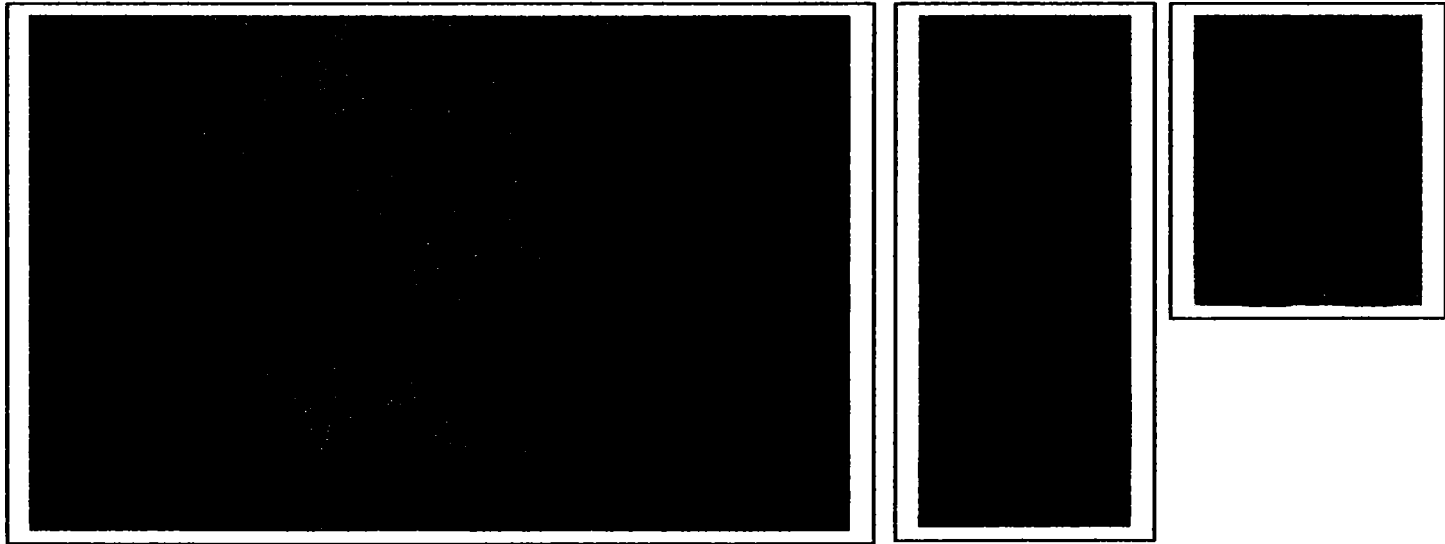


Figura II.23. Epruveta în urma efectuării încercării de rupere la tracțiune.

Literatura de specialitate [70], indică faptul că duritatea crește odată cu creșterea conținutului de carbon însă rezistența la tracțiune și alungirea se micșorează datorită creșterii proporției de cementită. Cu datele obținute în tab. II.5, se trasează diagrama rezistenței la rupere la tracțiune, prezentată în fig.II.24, din care se poate trage concluzia că, pentru probele turnate din oțel hipereutectoid, rezistența scade nesemnificativ, odată cu creșterea conținutului de carbon al șarjelor elaborate.

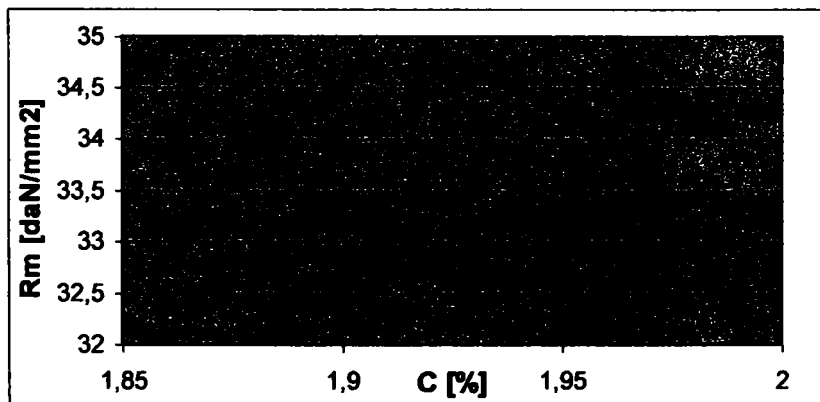


Figura II.24. Influența conținutului de carbon asupra rezistenței mecanice a oțelurilor hipereutectoide, din care s-au turnat probele.

Similar cu histogramele trasate pentru probele turnate, au fost întocmite și histogramele de variație a durităților înregistrate pe epruvete. Acestea sunt prezentate în fig.II.25, II.26, II.27.

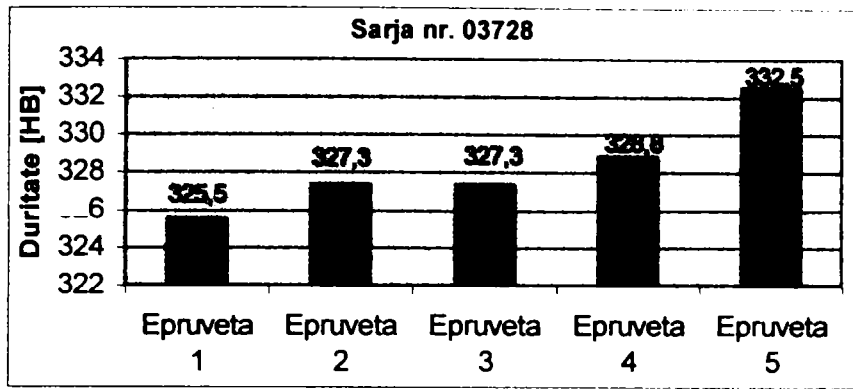


Figura II.25. Histograma duriților înregistrate pe epruvetele obținute din șarja 03728.

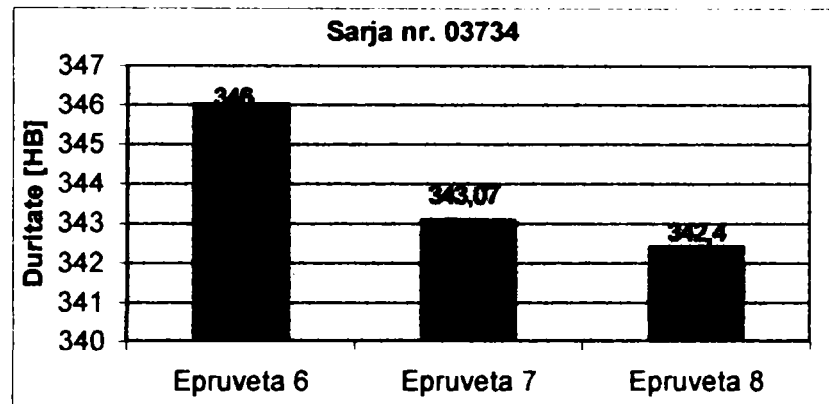


Figura II.26. Histograma duriților înregistrate pe epruvetele obținute din șarja 03734.

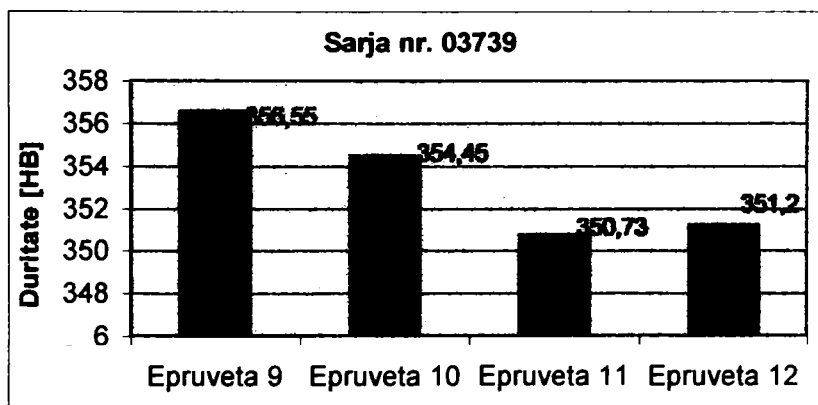


Figura II.27. Histograma duriților înregistrate pe epruvetele obținute din șarja 03739.

Pentru evidențierea diferențelor înregistrate pentru durițile înregistrate la turnare, după tratamentul termic primar și după tratamentul termic secundar a fost trasată histograma din fig.II.28, care sistematizează rezultatele înregistrate, pentru toate cele trei etape de determinare a duriților.

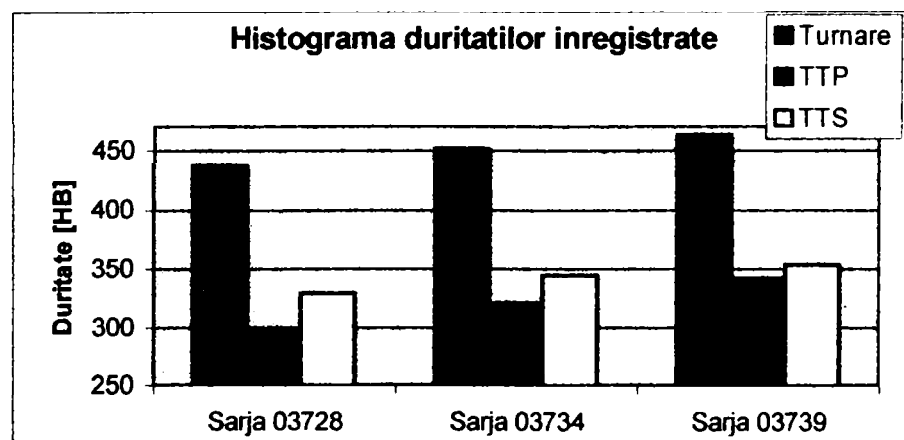


Figura II.28. Compararea duriților înregistrate (a turnare, după tratamentul termic primar și după tratamentul termic secundar), în cazul șarjelor 03728, 03734, 03739

II.3. DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE ȘI MICROSTRUCTURALE ALE OȚELULUI HIPEREUTECTOID, TIP ADAMIT, PE INELE PRELEVATE DIN CILINDRI TURNAȚI LA S.C. SIDERURGICA S.A. HUNEDOARA

II.3.1. Prelevarea probelor

După executarea tratamentului termic secundar, de pe cilindrii eboșați, se debitează inelele pentru determinarea durițăților pe secțiuni, a microstructurilor, a caracteristicilor mecanice etc. Debitarea inelelor-probă se execută prin strunjire, la Strungăria de Cilindri, din cadrul S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, în aceleași condiții în care se execută și calibrarea cilindrilor.

Schița pentru debitarea inelului este prezentată în fig. II.29.

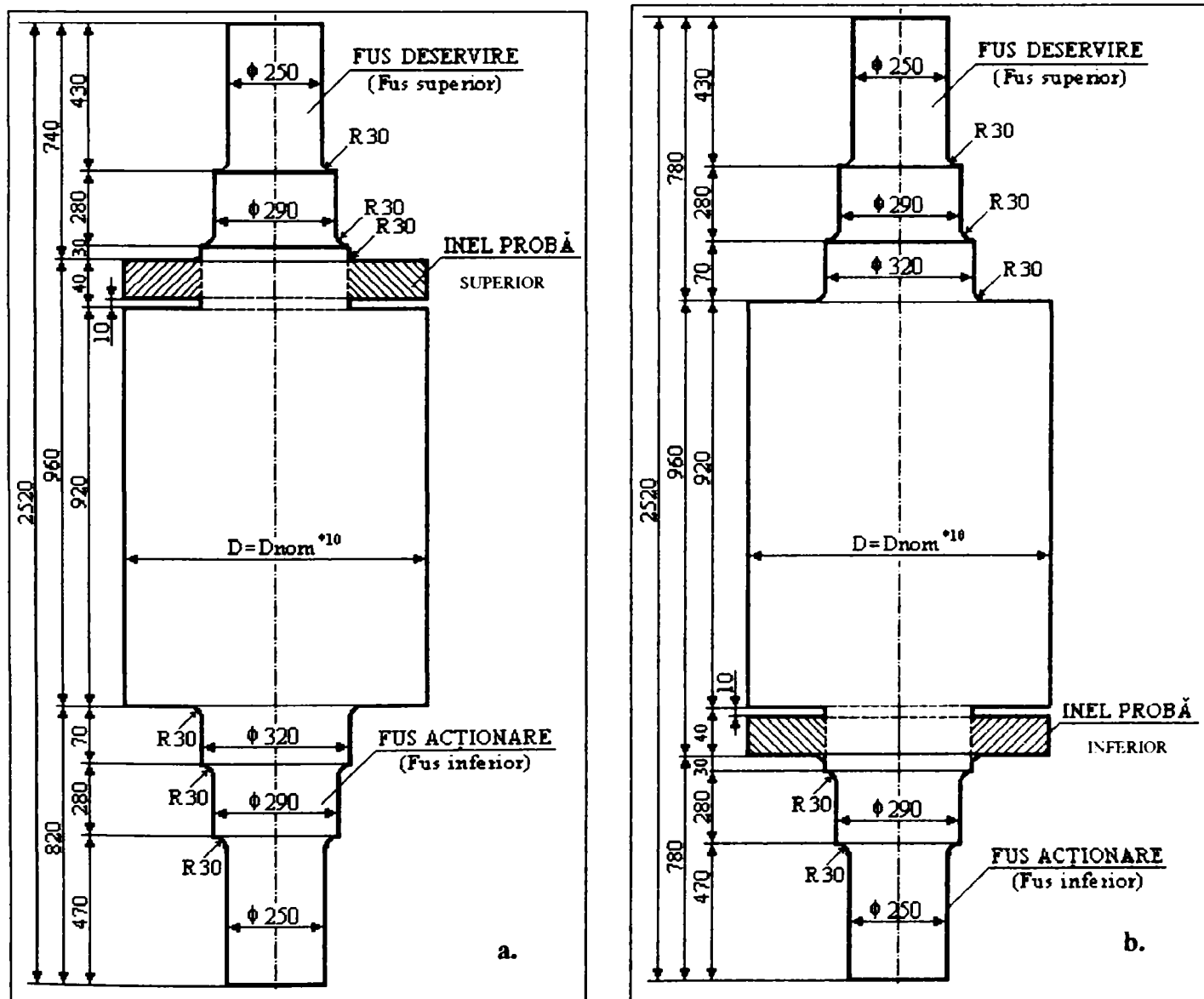


Figura II.29. Schiță pentru debitarea inelului probă: a). debitarea inelului de la partea fusului superior.
b).debitarea inelului de la partea fusului inferior.

Inelele-probă au fost debitate de pe un număr de 17 cilindri (pe fiecare inel s-a inscripționat numărul cilindrului din care a fost prelevat, conform fig. II.30), în vederea determinării

caracteristicilor mecanice a materialului din care sunt turnați cilindrii de laminare precum și pentru înregistrarea durității pe secțiune, din 15 în 15mm.

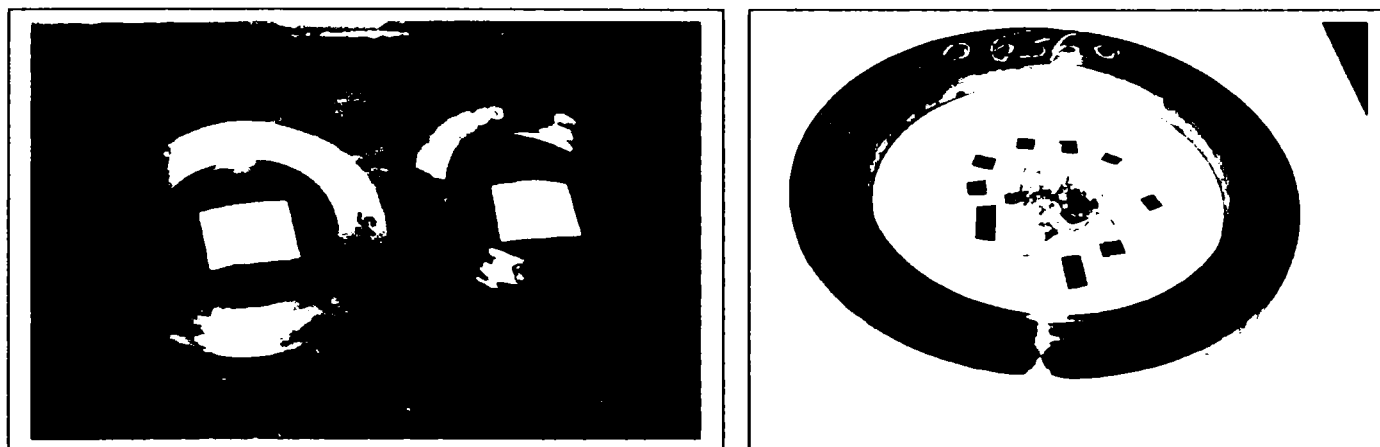


Figura II.30. Inele debitate de pe cilindrii de laminare ce urmează a intra în exploatare la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, în vederea determinării caracteristicilor mecanice.

Inelele probă au fost debitate atât de la partea superioară, respectiv partea fusului de deservire (fus superior) cât și de la cea inferioară, a fusului de acționare (fus inferior). Schița simplificată a acestora este prezentată în fig. II.31.

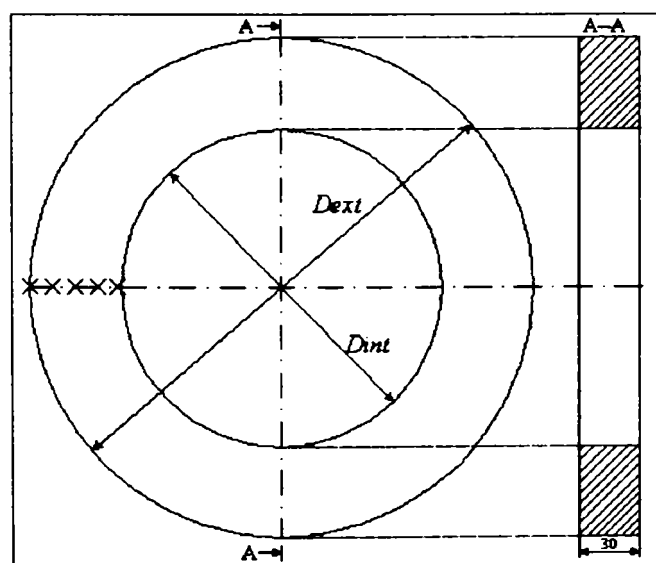


Figura II.31. Inel-probă, debitat din cilindrul de laminare, în vederea determinării variațiilor de duritate, a microstructurilor, a caracteristicilor mecanice:

D_{ext} - diametrul exterior, în mm;

D_{int} - diametrul interior, în mm

x - marcajul pentru determinarea durităților.

II.3.2. Determinarea durităților înregistrate pe secțiune

Cilindrii turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, tratați termic, utilizați la laminoarele de profile, intră în categoria cilindrilor semiduri, având duritatea cuprinsă în intervalul 320÷420HB [67], [96], [98].

În general, duritatea crustei cilindrilor se măsoară la adâncimi de 5...10 mm de la suprafața tăbliei. Probele cilindrilor de profile se măsoară în funcție de adâncimea calibrelor: pentru profile mari, la adâncimi de 50...75 și 100 mm de la suprafața cilindului, pentru profilele mijlocii la adâncimi de 20 și 50 mm, iar pentru profilele mici la adâncimi de 5 și 10 mm [6].

Duritățile înregistrate pe secțiune (din 15 în 15 mm), în cazul analizei celor 17 inele debitate de pe cilindri de laminare, sunt prezentate în tab.II.6. Aceste durități au fost înregistrate cu ajutorul unui durometru digital (tip EQUOTIP), sonda pentru determinarea durității având cap din diamant sintetic, sub formă de bilă, cu diametrul de 1,5mm; acest durometru are posibilitate de conectare la calculator și posibilitate de conversie automată a unităților de măsură.

Tabelul II.6. Variația durităților înregistrate pe secțiunea inelelor-probă.

Nr. crt.	Nr. cilindru	Diametru Inel [mm]		Distanța de la suprafață [mm]							Duritate medie [HB]
		Ext.	Int.	supraf.	15	30	45	60	75	90	
Inele-probă superioare											
1.	0944	532	323	350	345	348	340	342	320	314	337.00
2.	0945	522	332	363	363	358	350	342	340	320	348.00
3.	0946	460	330	320	348	335	330	324	312	300	324.14
4.	0947	453	333	340	355	360	345	336	321	318	339.29
5.	0948	471	333	341	335	338	321	310	300	290	319.29
6.	0949	522	327	363	352	358	334	320	318	320	337.86
7.	0954	475	338	407	410	398	392	387	371	368	390.43
8.	0955	463	335	420	417	406	390	394	386	382	399.29
9.	0958	465	328	313	369	343	336	320	310	300	327.29
10.	0961	532	323	375	380	375	360	343	332	330	356.43
11.	0962	479	344	334	345	350	338	334	320	307	332.57
12.	0965	531	335	338	332	332	330	315	300	290	319.57
Inele-probă inferioare											
13.	0951	462	335	309	337	340	336	330	322	318	327.43
14.	0952	558	333	352	355	353	349	354	348	345	350.86
15.	0957	470	323	368	366	365	365	366	361	363	364.86
16.	0959	460	323	342	370	368	364	359	359	354	359.43
17.	0960	545	360	336	345	345	339	340	340	340	340.71

Folosind datele prezentate în tab. II.6 s-au trasat diagramele de variație pe adâncime a durităților înregistrate pentru fiecare inel-probă. Acestea sunt prezentate în fig.II.32 și II.33. Literatura de specialitate [67], indică faptul că duritatea trebuie să fie cât mai uniformă de la periferie spre centrul cilindrului, neadmițându-se variații de duritate mai mari de 50HB/100mm.

Un studiu atent efectuat asupra tab.II.6. arată că există două tipuri de tendințe:

- de scădere a durității odată cu depărtarea de la periferie spre axa cilindrilor (fig.II.32), situație înregistrată la inelele-probă superioare;
- de variație neînsemnată a durităților pe secțiunea cilindrilor (fig.II.33), la inelele-probă inferioare.

Din graficele variațiilor de duritate prezentate în fig. II.32 se observă faptul că, scăderea de duritate pe secțiune este liniară, iar variația durităților pe secțiune, la cei mai mulți cilindri, nu depășește 50HB, excepție făcând doar cilindrul 0958, la care variația durității este mai mare de 50HB. Duritățile înregistrate pentru cilindrii 0951, 0952, 0957, 0959, 0960, de la care s-au prelevat

inele de la partea inferioară (fig.II.33), prezintă valori aproximativ constante (variația de duritate este foarte mică).

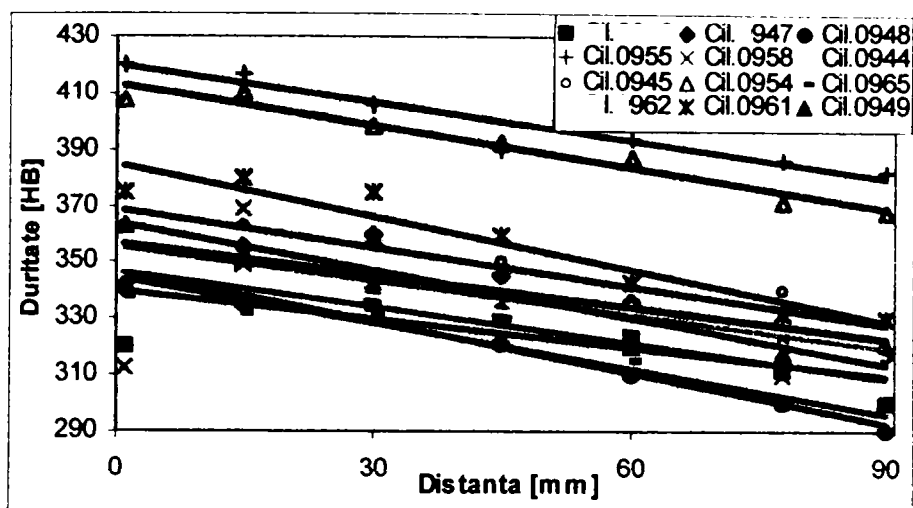
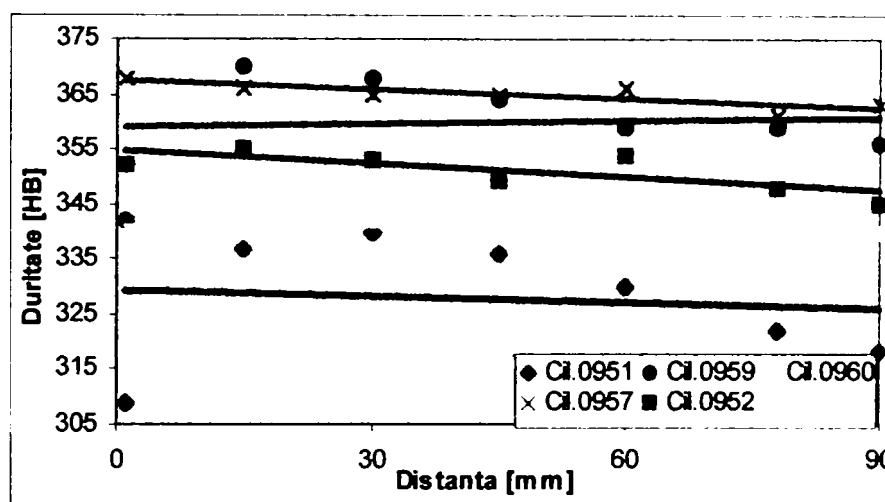


Figura.II.32. Variația durității înregistrată pe inelele-probă superioare, debitate de pe cilindrii: 0944, 0945, 0946, 0947, 0948, 0949, 0954, 0955, 0958, 0961, 0962, 096.

Figura II.33. Variația durității înregistrată pe inelele-probă inferioare, debitate de pe cilindrii: 0951, 0952, 0957, 0959, 0960.



II.3.4. Analiza compoziției chimice

În funcție de viteza de răcire a tăbliilor cilindrilor, pe secțiunea acestora, se poate prezenta o segregare pronunțată a elementelor de aliere (în special cele carburigene), cu atât mai mult cu cât diametrul tăbliilor cilindrilor a fost $\phi > 450$ mm și nu se pot asigura viteze mari de solidificare și răcire în timpul și după turnare.

Considerând vitezele de răcire aproximativ aceleași, pe seama grosimilor de perete mari (diametrul cilindrilor $\phi \geq 500$ mm), structurile cilindrilor se pot aprecia și după valorile medii ale sumelor elementelor carburigene, grafitizante și nocive [75].

Studiile efectuate, referitoare la variațiile compoziției chimice pe secțiunea cilindrilor tip Adamit, după ce au fost scoși din uz, arată că elementele de aliere carburigene Mo, Cr, Mn sunt cele care determină apariția carburilor (în special din ledeburită) care conduc la creșterea rezistenței la uzare în principal la laminarea la cald [73], [74]. De aceea, cât și datorită faptului că cilindrii tip Adamit, au o compoziție chimică asemănătoare, care îi plasează în domeniul hipereutectoid, se ține cont și de carbonul echivalent C_E , considerat după [7], [77]:

$$\%C_E = C + \left(\frac{S+P}{3} \right) \quad (II.1)$$

$$\%C_E = C + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mn}{6} + \frac{V}{14} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} \quad (II.2)$$

În tab.II.7 sunt redată compozițiile chimice și variațiile elementelor carburigene și grafitizante prin carbonul echivalent C_E [7], [77], conform formulelor:

$$\%C_{E_carb} = C + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mn}{6} \quad (II.3)$$

$$\%C_{E_graf} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} \quad (II.4)$$

Tabelul II.7. Compozițiile chimice, respectiv variațiile elementelor carburigene și grafitizante prin carbonul echivalent ale cilindrilor de laminare studiați.

Nr. crt.	Nr. cil.	Compoziție chimică [%]										Variațiile elementelor carburigene și grafitizante prin carbonul echivalent (C_{E_carb} , C_{E_graf}), determ. cu formulele:	
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	$\%C_{E_carb} = C + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mn}{6}$	$\%C_{E_graf} = C + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40}$
1	0952	1.99	0.8	0.7	0.005	0.003	1.2	1.61	0.2	0.35	0.06	2.4508333	2.0594167
2	0954	1.99	0.8	0.7	0.005	0.003	1.2	1.61	0.2	0.35	0.06	2.4508333	2.0594167
3	0955	1.99	0.8	0.7	0.005	0.003	1.2	1.61	0.2	0.35	0.06	2.4508333	2.0594167
4	0957	1.89	0.83	0.74	0.008	0.035	1.08	1.7	0.18	0.32	0.06	2.3243333	1.9633333
5	0958	1.89	0.83	0.74	0.008	0.035	1.08	1.7	0.18	0.32	0.06	2.3243333	1.9633333
6	0959	1.89	0.83	0.74	0.008	0.035	1.08	1.7	0.18	0.32	0.06	2.3243333	1.9633333
7	0946	1.86	0.83	0.68	0.008	0.029	1.03	1.66	0.16	0.3	0.04	2.2793333	1.9298333
8	0947	1.86	0.83	0.68	0.008	0.029	1.03	1.66	0.16	0.3	0.04	2.2793333	1.9298333
9	0961	1.85	0.83	0.67	0.005	0.039	1.05	1.6	0.17	0.3	0.03	2.2733333	1.9179167
10	0949	1.82	0.86	0.68	0.006	0.025	1.12	1.7	0.18	0.3	0.04	2.2623333	1.8908333
11	0951	1.82	0.86	0.68	0.006	0.025	1.12	1.7	0.18	0.3	0.04	2.2623333	1.8908333
12	0965	1.82	0.81	0.78	0.01	0.032	1.05	1.62	0.19	0.3	0.03	2.24	1.893
13	0944	1.86	0.83	0.68	0.008	0.029	1.03	1.66	0.16	0.3	0.04	2.2793333	1.9298333
14	0945	1.86	0.83	0.68	0.008	0.029	1.03	1.66	0.16	0.3	0.04	2.2793333	1.9298333
15	0960	1.85	0.83	0.67	0.005	0.039	1.05	1.6	0.17	0.3	0.03	2.2733333	1.9179167
16	0962	1.85	0.83	0.67	0.005	0.039	1.05	1.6	0.17	0.3	0.03	2.2733333	1.9179167
17	0948	1.82	0.86	0.68	0.006	0.025	1.12	1.7	0.18	0.3	0.04	2.2623333	1.8908333

Cu ajutorul datelor prezentate în tab. II.7 au fost trasate histogramele variațiilor elementelor carburigene și grafitizante determinate prin carbonul echivalent, cu ajutorul relațiilor (II.3), (II.4).

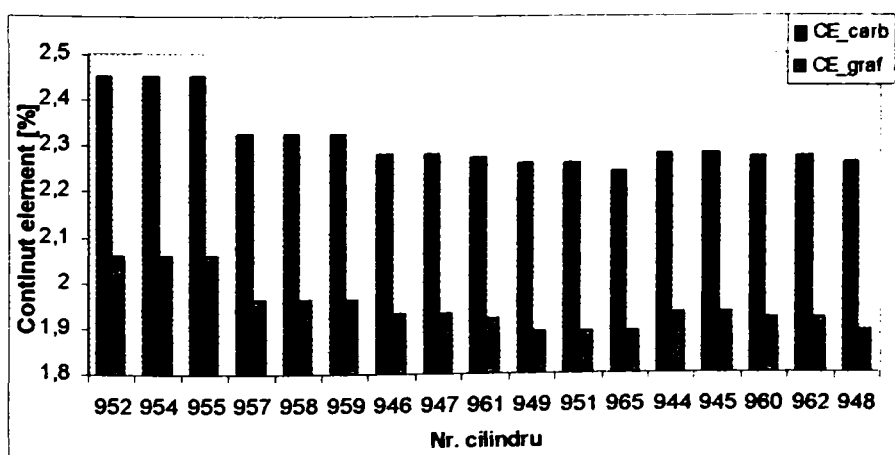


Figura II.34. Variațiile elementelor carburigene și grafitizante prin carbonul echivalent înregistrate pentru cei 17 cilindri.

O influență deosebită asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare o prezintă variația durităților pe înălțimea tăbliilor, fapt ce poate determina stabilirea locului calibrelor care sunt solicitate deosebit, funcție de profilul laminatului, numărul de treceri, viteza de laminare, gradul de reducere, temperatură etc. Pentru aceasta, pentru 6 cilindri (0952, 0959, 0947, 0962, 0951, 0965), au fost efectuate măsurători de duritate pe înălțimea tăbliei. Duritățile înregistrate sunt prezentate în tabelul II.8.

Tabelul II.8. Valoarea durităților, HB, înregistrate pe înălțimea tăbliilor.

Nr. cilindru	C _{E carb} [%]	Înălțimea tăbliilor de la fusul inferior [mm]					Diferența de duritate pe înălțime [HB]
		15	250	450	650	875	
0952	2.4508333	384	376	366	358	350	34
0959	2.3243333	376	368	364	357	346	30
0947	2.2793333	372	361	350	346	339	33
0962	2.2733333	370	356	342	331	328	42
0951	2.2623333	343	338	330	326	312	31
0965	2.24	376	362	358	346	335	41
Media		370.16	360.16	351.66	344.00	335.66	35.16

Din tab.II.8 rezultă faptul că diferențele de duritate înregistrate pe înălțimea tăbliei cilindrilor pentru cei șase cilindri luați în studiu se încadrează în intervalul 30...42 HB. Astfel, valorile maxime ale durității tăbliei cilindrilor sunt înregistrate la partea inferioară a acesteia, respectiv la partea dinspre fusul inferior, fapt explicabil prin aceea că, datorită turnării directe, incluziunile se acumulează la partea superioară a tăbliei.

În consecință, în exploatare este indicată poziționarea calibrelor cele mai solicitate la partea inferioară a tăbliei.

II.3.5. Determinarea rezistenței la tracțiune

Din inelele-probă au fost debitate, prin prelucrare mecanică, mai multe bucăți de material, în vederea obținerii epruvetelor pentru încercarea de rupere la tracțiune și pentru obținerea microstructurilor. Mai mult, în fig.II.35 se poate observa și structura de rupere. Analizând structura de rupere a inelului-probă prelevat din cilindru cu nr.0946 se observă aspectul cristalin strălucitor al acesteia, ceea ce denotă caracterul fragil al ruperii (fig.II.35).

Literatura de specialitate, [83], indică faptul că la oțelurile hipereutectoide, prezența cementitei secundare la limita grăunților de perlită le mărește fragilitatea. Rezistența, alungirea și gătuirea scad, pe măsura creșterii conținutului de carbon [83].

Pentru a compara rezistențele obținute la rupere la tracțiune pentru probele cilindrice (fig.II.4) și pentru inelele-probă s-au efectuat, în cadrul Atelierului Mecanic, din cadrul Facultății de Inginerie Hunedoara, 11 epruvete, prelevate din inelele-probă, cu dimensiunile prezentate în fig.II.19. Aceste epruvete (cu diametrul de 6 mm și secțiunea de 28,2743 mm²) au fost supuse încercării de rupere la tracțiune, pe aceeași mașină pe care au fost încercate și epruvetele obținute din probele cilindrice (fig.II.21) și s-au obținut rezultatele prezentate în tab.II.9.



Figura II.35. Inelul-probă cu nr.0946 și macrostructura acestuia.

Tabelul II.9. Caracteristicile mecanice înregistrate pentru epruvetele obținute din inelele-probă.

Nr. epruvetă	Nr.cilindru de pe care a fost prelevată epruveta	C [%]	F_r [daN]	$R_m = \frac{F_r}{S_o}$, [daN/mm ²]
Epruveta I	0961	1,85	1710	60,47895
Epruveta II	0962	1,85	1620	57,29585
Epruveta III	0944	1,86	1710	60,47895
Epruveta IV	0945	1,86	1690	59,77159
Epruveta V	0946	1,86	1735	61,36315
Epruveta VI	0947	1,86	1715	60,65579
Epruveta VII	0957	1,89	1675	59,24108
Epruveta VIII	0958	1,89	1700	60,12527
Epruveta IX	0959	1,89	1720	60,83263
Epruveta X	0954	1,99	1670	59,06424
Epruveta XI	0952	1,99	1700	60,12527

Dacă peste diagrama de variație a rezistenței la rupere cu conținutul de carbon din fig.II.24 (pentru probe cilindrice) se suprapune diagrama pentru inelele-probă se obține diagrama comparativă a încercărilor efectuate, prezentată în fig.II.36.

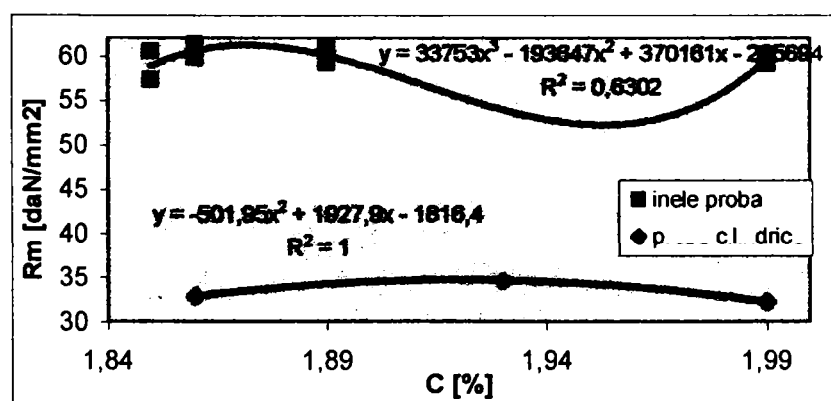
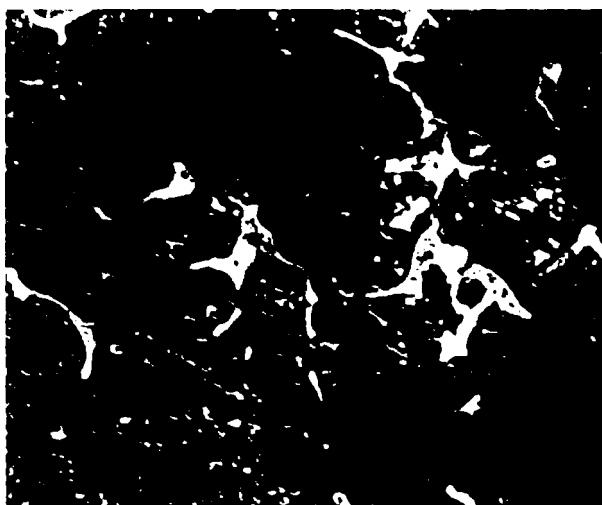


Fig. r. II.36. Influența conținutului de carbon asupra rezistenței mecanice a oțelurilor Admit, din care au fost turnate probele cilindrice și inelele-probă.

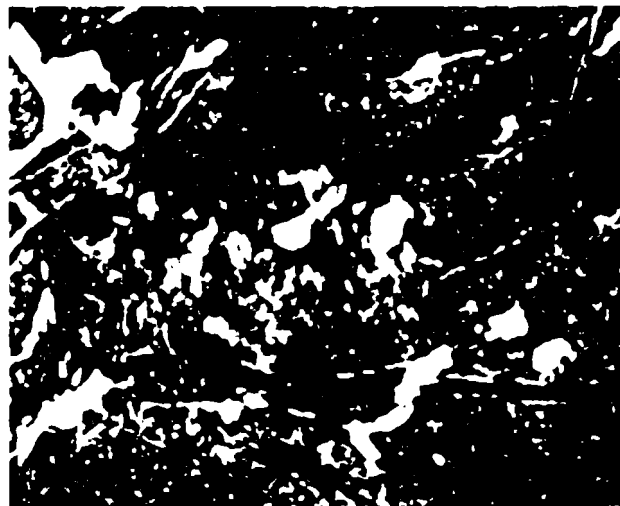
Diferența mare între valorile înregistrate pe probele cilindrice și inelele-probă se datorează condițiilor foarte diferite de răcire și, implicit, naturii și dispersiei constituenților structurali. Astfel, proba cilindrică (de dimensiuni mult mai mici comparativ cu cilindrul de laminare), răcită cu viteză foarte mare, prezintă cantități mari de cementită și carburi care conferă fragilitate mare materialului. Epruvetele obținute din inelele-probă debitate de pe cilindri turnați (răciți în condițiile tehnologiei de fabricație), cu viteză mult mai mică prezintă constituenți care conferă materialului fragilitate mai redusă, astfel încât rezistența la rupere este mai mare.

II.3.6. Analiza microstructurală

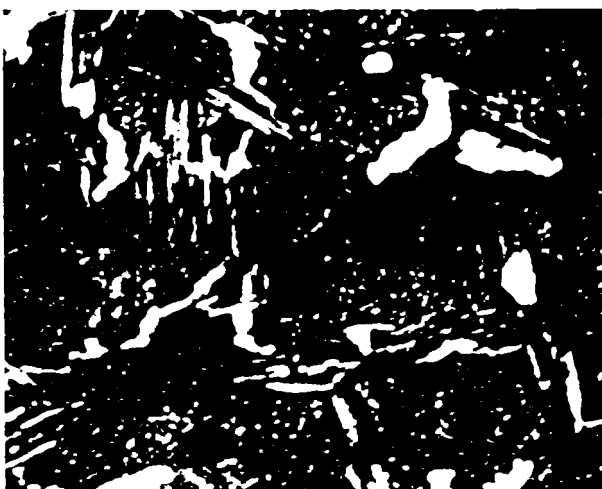
Microstructurile obținute pe cele 17 inele probă, la distanța de 20 mm de la suprafața cilindrului de laminare, după atac cu nital 2%, la mărirea 100:1, sunt prezentate în fig.II.37 și II.38. Din aceste microstructuri se observă faptul că structura este formată din perlită lamelară, cementită secundară și ledeburită în rețele discontinue.



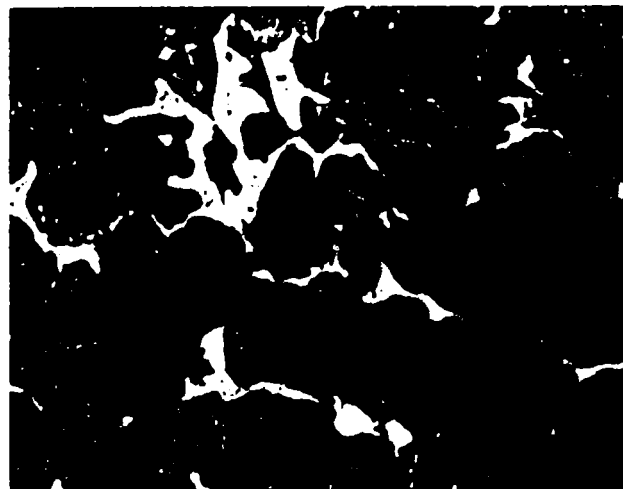
Cilindrul nr.1 (0944)



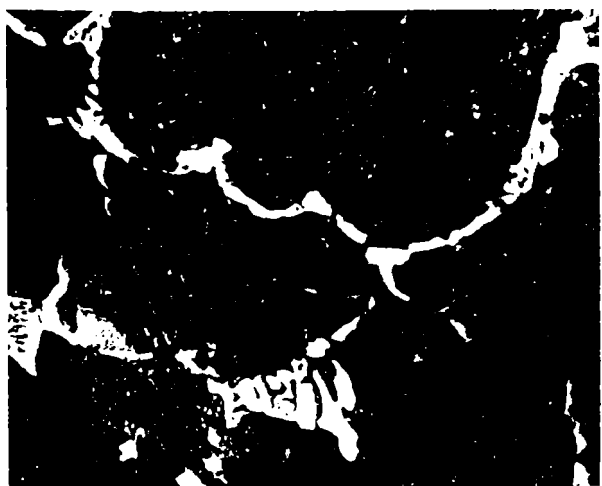
Cilindrul nr.2 (0945)



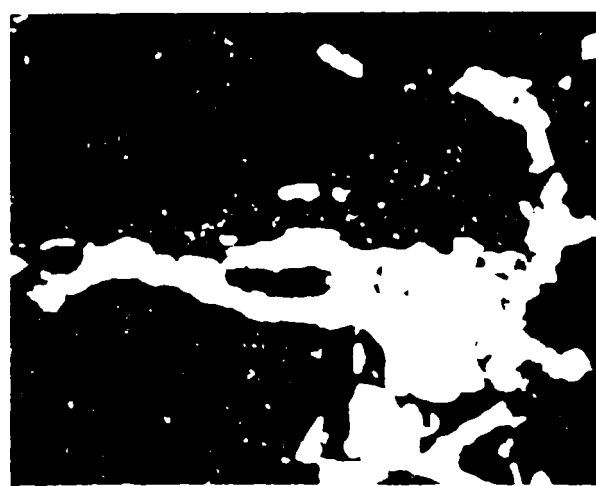
Cilindrul nr.3 (0946)



Cilindrul nr.4 (0947)



Cilindrul nr.5 (0948)

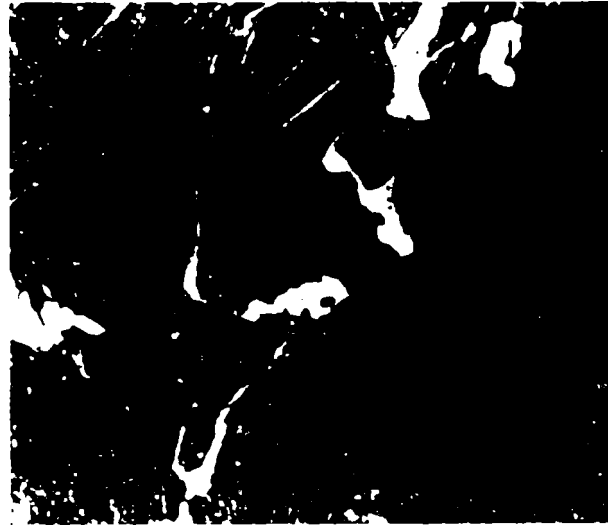


Cilindrul nr.6 (0949)

Figura II.37. Microstructurile probelor prelevate din inelele superioare (atac nital 2%, mărirea 100:1).



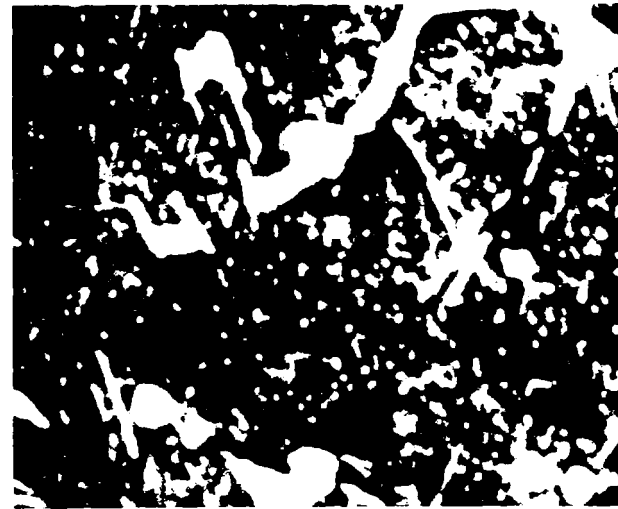
Cilindrul nr.7 (0954)



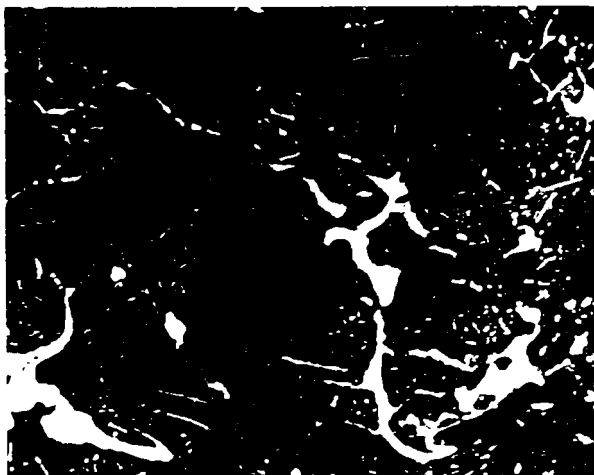
Cilindrul nr.8 (0955)



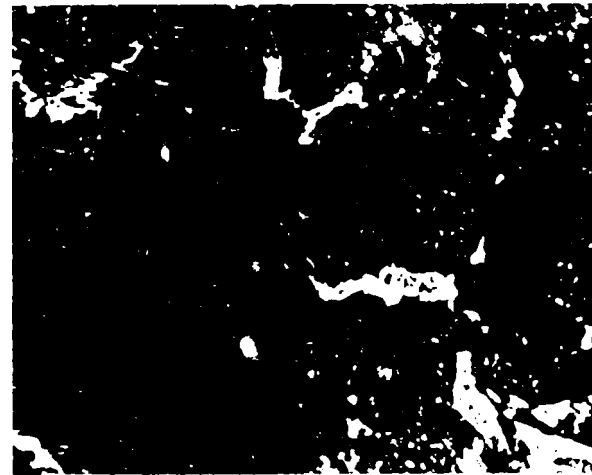
Cilindrul nr.9 (0958)



Cilindrul nr.10 (0961)

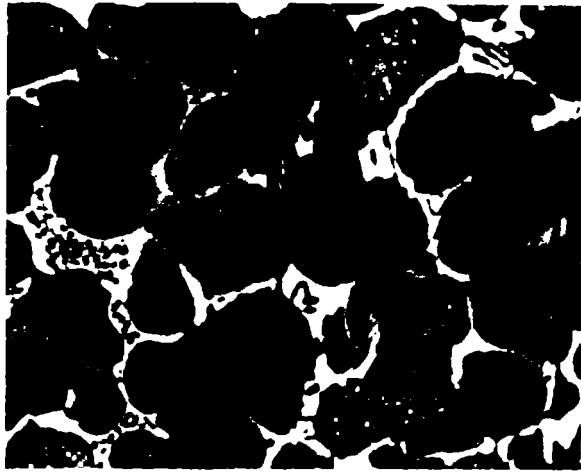


Cilindrul nr.11 (0962)

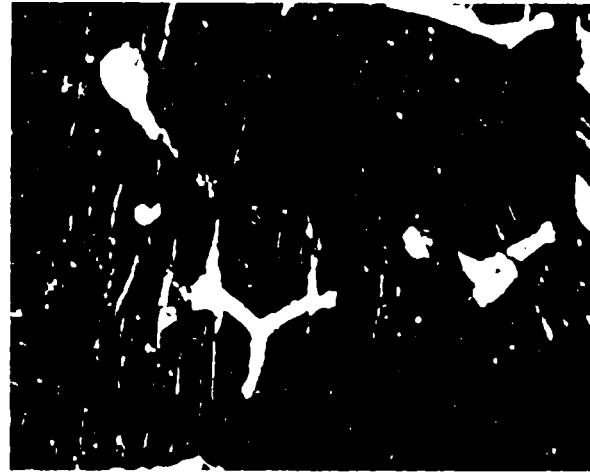


Cilindrul nr.12 (0965)

Figura II.37. Microstructurile probelor prelevate din inelele superioare (atac nital 2%, mărire 100:1).



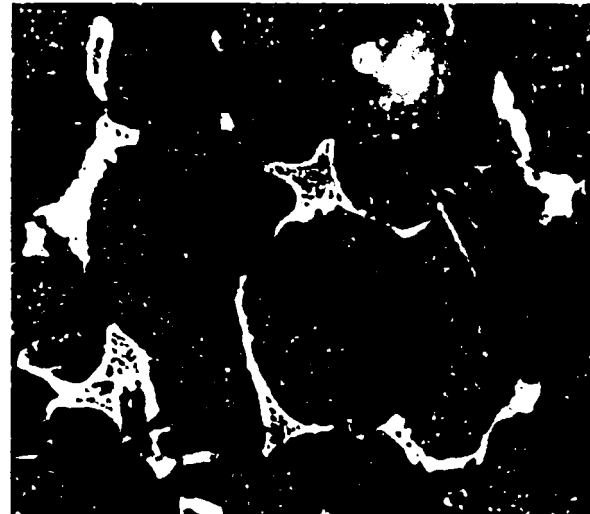
Cilindrul nr.13 (0951)



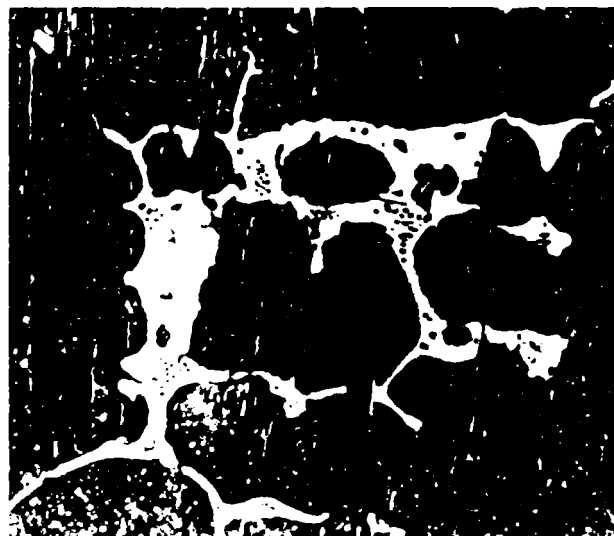
Cilindrul nr.14 (0952)



Cilindrul nr.15 (0957)



Cilindrul nr.16 (0959)



Cilindrul nr.17 (0960)

Figura II.38. Microstructurile probelor prelevate din inelele inferioare (atac nital 2%, mărire 100:1).

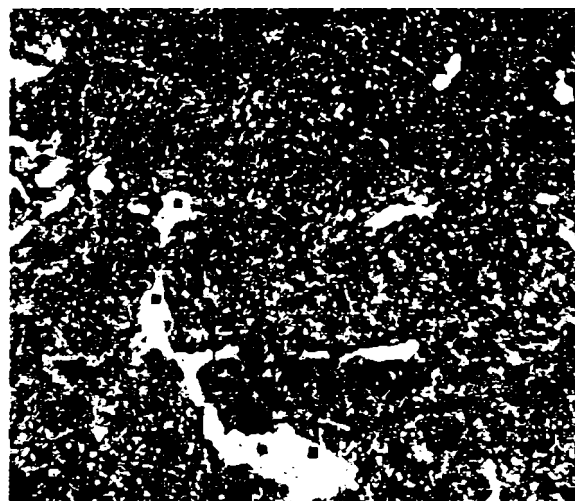
În urma studiului literaturii de specialitate [101] a fost efectuată o comparație a rezultatelor obținute pe cilindri din Adamit studiați de ICEM și pe cilindri cercetați în prezenta lucrare de doctorat.

Astfel, analiza cilindrilor de laminare tip Adamit, studiați de către ICEM [101], a căror compoziție chimică a fost: C=1,74...1,94%; Mn=0,67...0,87%; Si=0,76...0,91%; Cr=0,91...1,16%; Ni=1,41...1,75%; Mo=0,31...0,37%; P=0,05...0,06%; S=0,005...0,009%, a condus la următoarele concluzii:

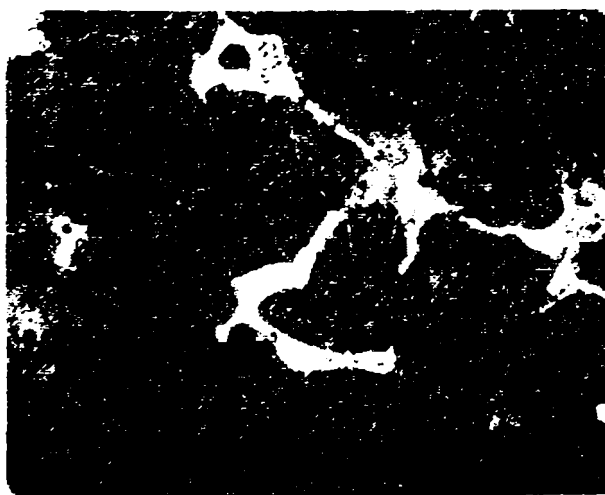
- cilindri turnați experimental la ICEM (fig.II.39), destinați laminoarelor de profile mijlocii și benzi de la C.S. Hunedoara (comparativ cu cilindrii din alte țări: Anglia, Austria, Japonia), au în structură perlită lamelară fină, cementită secundară neuniform repartizată (în rețea sau fragmentată) și cantități neînsemnate de ledeburită;
- valorile medii de duritate pentru cilindrii din import a fost 29...45 HRC (mai redusă la cei din Anglia și mai ridicată la cilindri din Austria), iar la cei din România de 30...35HRC;
- comparând rezultatele obținute de către ICEM, pe cilindrii experimentali 4,5,6, a căror microstructuri sunt prezentate în fig.II.39, turnați în România, cu cele obținute în studiul prezentei lucrări de doctorat se poate afirma că există o bună compatibilitate între proprietăți, cu deosebirea că cilindri studiați în lucrarea de doctorat prezintă o cantitate mai ridicată de ledeburită care va asigura o mai mare durabilitate, așa cum se recomandă și în studiul efectuat de ICEM [101].



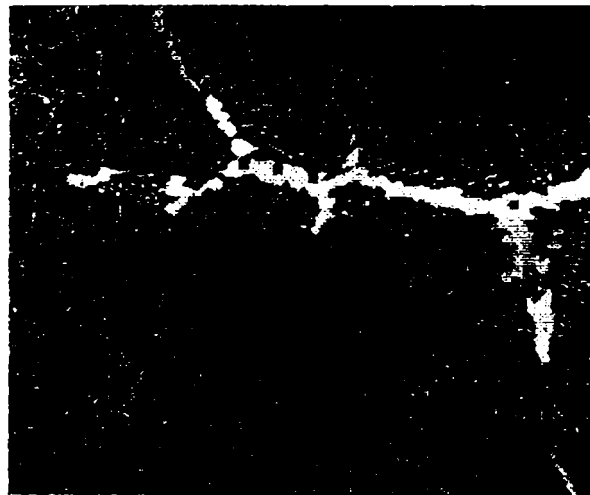
Cilindrul nr. 1



Cilindrul nr. 4



Cilindrul nr. 2



Cilindrul nr. 5

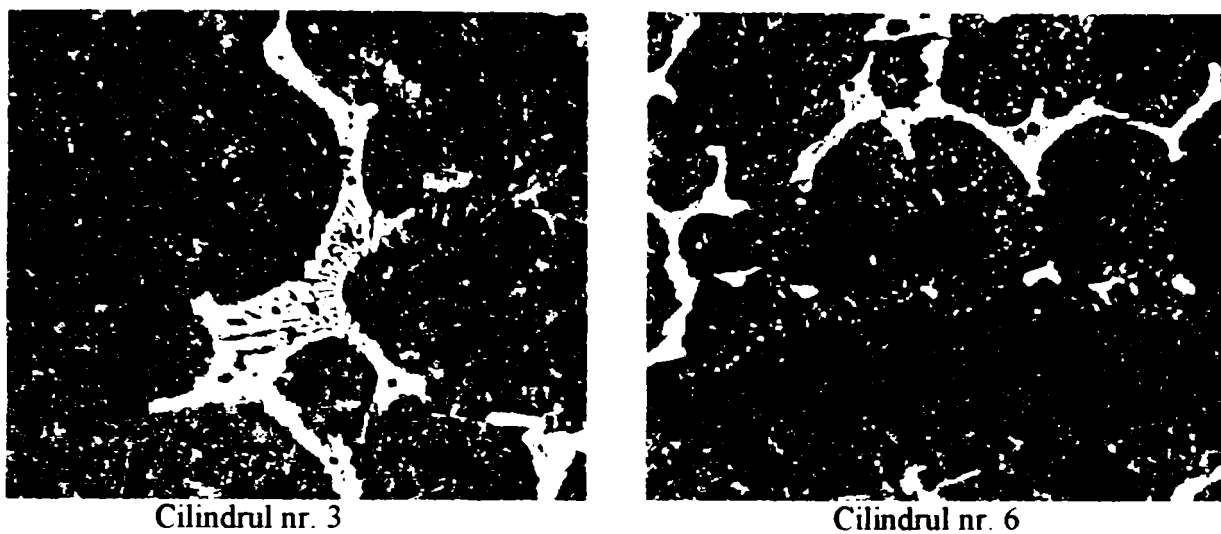


Figura II.39. Microstructurile cilindrilor studiați de ICEM (mărire 100:1; atac nital 2%):
1-Anglia; 2-Austria; 3 - Japonia; 4,5,6 - România

II.3.7. Analiza metalografică a fazelor și constituenților microstructurali

În vederea aprecierii mai corecte a influenței structurii (fazelor și constituenților) asupra durabilității în exploatare s-a efectuat, pentru doi cilindri, care au avut tendință de reducere a durității cu distanța față de axa cilindrului (cil.nr.0945), respectiv de creștere a durității cu distanța (cil.nr.0952) o analiză a fazelor. Datele obținute sunt prezentate în tab. II.10.

Microstructurile obținute de pe inelele prelevate de pe cilindrii de laminare sunt prezentate în cele ce urmează.

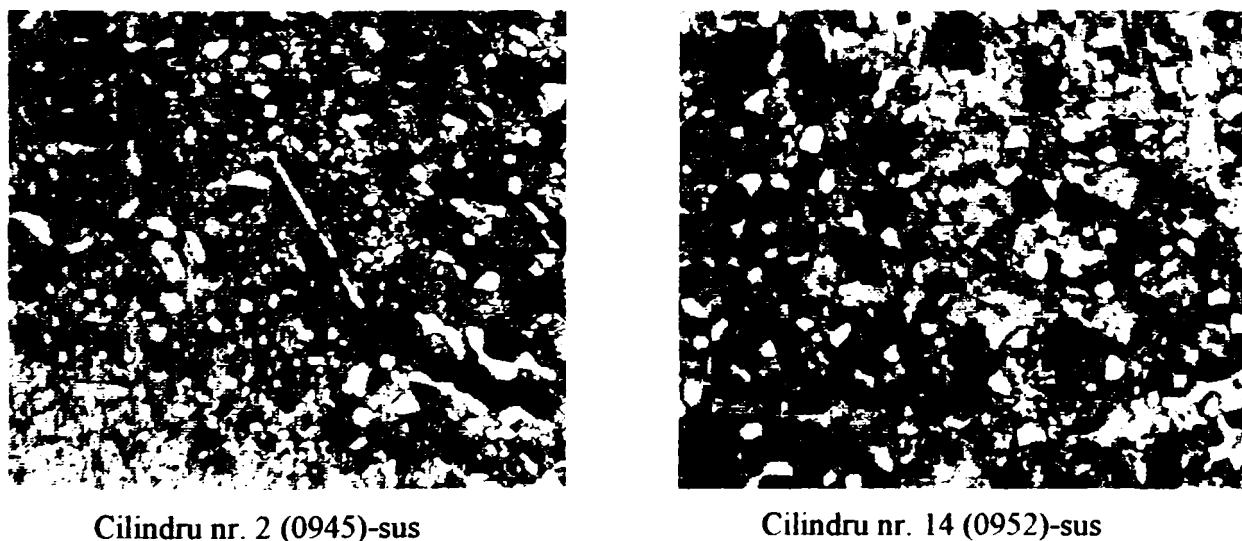
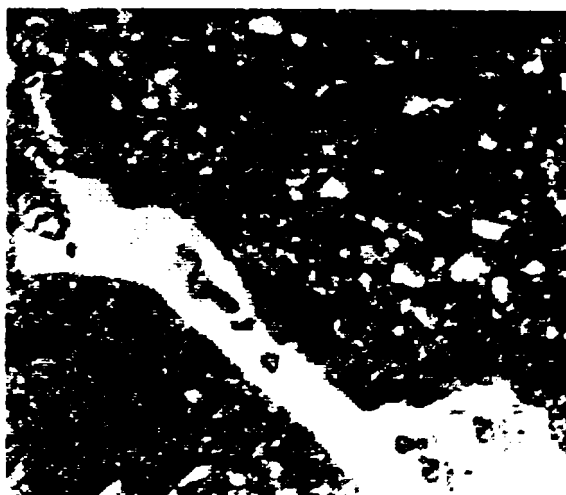


Figura II.40. Microstructurile cilindrilor de laminare, după atac cu nital 2%, mărirea 500:1
(prelevare probe de la partea superioară)



Cilindru nr. 2 (0945)-jos



Cilindru nr. 14 (0952)-jos

Figura II.41. Microstructurile cilindrilor de laminare, după atac cu nital 2%, mărire 500:1 (prelevare probe de la partea inferioară).



Figura II.42. Microstructura cilindrului din Japonia, după atac cu nital 2%, mărire 500:1.

Tabelul II.10. Analiza constituenților și fazelor structurale (STAS 6905-64) ale cilindrilor de laminare.

Nr	Cilindru nr./ Proveniența	Partea	Constituentul sau faza			
			Ledeburita		Cementita secundară	
			Dimens. Lxl [μm]	Repartiția	Lxl [μm]	Formă
14	0952/Siderurgica Hunedoara	sus jos	(2,5-12)x(1-3) (5-30)x(1-6)	Neuniform și sporadic uniform	(3-20)x(1-2)	Fragmentată, uneori aciculară și chiar în rețea
2	0945/Siderurgica Hunedoara	sus jos	(2,6-6)x(0,7-1,5) (2-20)x(0,8-2,5)	Neuniform și sporadic uniform	(5-25)x(0,8-2,5)	
	Japonia	-	(1,0-50)x(1-10)	Uniformă	0,01-1,5	Fragmentată aciculară

Din această analiză rezultă faptul că în cilindri studiați (față de cei din Japonia), formațiile de Le și Ce II au o repartiție neuniformă, nu sunt aciculare [101].

Trebuie făcută precizarea că din cei 17 cilindri de pe care au fost prelevate inelele-probe, doar trei cilindri și-au început campaniile de laminare, dar nu au ieșit din uz. Utilizarea acestora în cajele de laminare este următoarea:

- cilindru nr. 0949, lucrează la caja M 12, la laminarea profilului U 65, și a laminat până în prezent 657 tone oțel;
- cilindru nr. 0954, lucrează la caja M 14, la laminarea profilului U 65 și a laminat până în prezent 518 tone oțel;
- cilindru nr. 0958, lucrează la caja M 14, la laminarea profilului U 80, laminând până în prezent 474 tone oțel.

Restul de 14 cilindri sunt fie în fază de executare a calibrelor pe suprafața acestora, fie pregătiți pentru laminarea diferitelor profile (U80, I120, I100, I80, U100, U65).

II.4. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Pe baza sintezei bibliografice referitoare la problematica caracteristicilor de material pentru oțelul hipereutectoid, tip Adamit, destinat turnării cilindrilor de laminare, au fost analizate aspecte privind:

- prezentarea generală a caracteristicilor mecanice impuse materialelor destinate fabricării cilindrilor de laminare
- analiza diagramelor de tratament termic pentru cilindrii de laminare, în vederea stabilirii diagramelor de tratament termic pentru probele cilindrice și inelele-probă
- posibilități de determinare a caracteristicilor de material pentru oțelul hipereutectoid tip Adamit

Drept **contribuții personale** se menționează:

- prelevarea probelor turnate din mai multe șarje de oțel hipereutectoid, tip Adamit, din care au fost turnați cilindri la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, precum și a inelelor-probă de pe cilindri ce urmează a intra în exploatare, în vederea determinării caracteristicilor de material ale acestui oțel
- stabilirea dimensiunilor, confecționarea epruvetelor și supunerea acestora la încercarea de rupere prin tracțiune, în vederea determinării rezistenței mecanice a oțelului hipereutectoid, tip Adamit, atât pentru probele cilindrice turnate cât și pentru inelele-probă debitate de pe cilindri și compararea datelor obținute
- determinarea curbelor tensiune-deformație pentru oțelul hipereutectoid, tip Adamit
- determinarea și compararea durităților înregistrate pentru probele cilindrice în cele trei faze ale procesului de fabricație, respectiv la turnare, după tratamentul termic primar și după tratamentul termic secundar
- determinarea variației de duritate pe secțiunea inelelor-probă, până la o adâncime de 90 mm spre axa acestora, precum și pe înălțimea tăbliei cilindrilor de laminare, în vederea cunoașterii poziției optime a calibrelor cele mai solicitate în timpul procesului de laminare
- este efectuată analiza microstructurală pentru diferite șarje, pe înălțimea cilindrilor și compararea cu analiza efectuată de ICEM
- stabilirea dependențelor, sub formă analitică și grafică, cu ajutorul programului Excel, dintre duritățile înregistrate și conținuturile de carbon și elemente de aliere.

CAPITOLUL III

CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA DURABILITĂȚII ÎN EXPLOATARE A CILINDRILOR DE LAMINARE TURNAȚI DIN OȚEL HIPEREUTECTOID, TIP ADAMIT

Durabilitatea în exploatare a cilindrilor de laminare este determinată de rezistența lor la uzare, care depinde nu numai de calitatea aliajului din care aceștia sunt realizați, ci și de felul materialului care se laminează, precum și de modul și condițiile în care ei lucrează. De obicei, uzura cilindrilor la o montare în caje se socotește în funcție de grosimea minimă a crustei uzate ce se îndepărtează prin restrunjire pentru restabilirea profilului inițial al cilindrului. Deși uzura în timpul procesului de laminare este un fenomen normal, aceasta poate fi dirijată prin crearea unor condiții care să conducă la micșorarea ei. Cu cât este mai înaltă duritatea crustei de lucru a cilindrilor, cu atât uzura este mai redusă, însă nu există o dependență directă între aceste două caracteristici.

Situațiile înregistrate în practica industrială demonstrează, încă o dată, faptul că durabilitatea în exploatare a cilindrilor de laminare este influențată de o serie de factori, întâlniți pe tot fluxul tehnologic, pornind de la elaborarea aliajului, continuând cu tehnologia de formare - turnare - dezbaterie - tratament termic și finalizând cu exploatarea în cajele de laminare.

III.1. CREAREA UNEI BAZE DE DATE FOLOSIND SGBD MICROSOFT ACCESS, ÎN VEDEREA PRELUCRĂRII DATELOR ÎNREGISTRATE ÎN PRACTICA INDUSTRIALĂ

Ținându-se cont de totalitatea factorilor de influență asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare am considerat oportună, în primă fază a analizei efectuate în acest capitol, realizarea unei **baze de date relaționale**, folosind un sistem informatic. De fapt, o bază de date relațională reprezintă o structură complexă, folosită la memorarea și gestionarea datelor ce descriu un anumit tip de obiecte sau fenomene. Concret, baza de date este un "container" în care sunt "depozitate" mai multe tabele ce conțin date (între tabele pot exista anumite legături) [41].

Având în vedere faptul că, în general, despre cilindri de laminare se cunosc, la un moment dat, foarte multe date (compoziția chimică, nr. cilindru, nr. șarjă, data turnării, data ieșirii din exploatare, cauza scoaterii din exploatare etc.) rolul acestei baze de date este de a reduce considerabil efortul regăsirii datelor referitoare la aceștia sau, cu alte cuvinte, ca datele să fie stocate astfel încât să poată fi accesate și manipulate cu ușurință.

Pentru realizarea bazei de date am optat pentru Microsoft Access pentru Windows (denumit, în continuare, Access), deoarece acesta este un sistem robust de gestionare a bazelor de date

relaționale în scopul creării aplicațiilor de baze de date locale sau de tip client/server care rulează sub Windows. Access a fost proiectat, în special, pentru crearea aplicațiilor multiuser în care fișierele de baze de date sunt folosite în comun în rețele și înglobează un sistem de securitate sofisticat (pentru a împiedica persoanele neautorizate să vizualizeze sau să modifice bazele de date) și posedă o structură de baze de date cu totul deosebită, capabilă să combine într-un singur fișier, de tipul .mdb, toate tabelele cu date asociate și indecșii lor, formularele, rapoartele, comenzile macro și codul Access Basic. Baza de date are asociat un fișier cu extensia .mdb în care sunt memorate date referitoare la baza de date: tabelele componente, relațiile dintre tabele, dicționarul de date asociate [41].

Un mare avantaj pe care îl prezintă Access-ul în realizarea bazei de date și a analizelor statistice efectuate în cadrul acestui capitol, este faptul că are capacitatea de a importa și exporta date din și în cele mai cunoscute fișiere cu baze de date, foi de calcul tabelar și text, existente în lumea calculatoarelor personale (FOX, ORACLE, EXCEL, WORD etc).

Tabelele componente ale bazei de date sunt structuri în care se pot memora date, descriind un anumit tip de elemente. Fiecare caracteristică a elementelor alcătuiește un câmp, iar elementele propriu-zise sunt memorate în înregistrări.

În tabela "cil_date_gen", prezentată în fig. III.1., se păstrează datele referitoare la numărul șarjei elaborate, numărul cilindrului, data turnării, dimensiunile cilindrului turnat, compoziția chimică, durabilitatea, cantitate laminată etc., cheia primară *id_cil* identificând, în mod unic, fiecare cilindru.

Field Name	Data Type	Description
id_cil	AutoNumber	
nr_cil	Text	
șarja	Text	
data_turnari	Date/Time	
temp_turnare	Number	
durata_turnari	Text	
din_1	Text	
din_2	Text	
Greutate, kg	Text	
C	Text	
Mn	Text	
Si	Text	
S	Text	
P	Text	
Cr	Text	
Ni	Text	
Cu	Text	
V	Text	
Mo	Text	
Ti	Text	
Alte	Text	
id_profil	Number	
id_beneficiar	Number	
duritate	Number	
durabilitate	Number	
durabilitate_p1	Number	
durabilitate_p2	Number	
durabilitate_p3	Number	
durabilitate_p4	Number	
durabilitate_p5	Number	
restrunjk_0	Number	
restrunjk_1	Number	

Field Properties

General | Lookup |

Field Size: Long Integer
New Values: Increment
Format:
Caption:
Indexed: Yes (No Duplicates)

A field name can be up to 64 characters long, including spaces. Press F1 for help on field names.

Design view. F6 = Switch panes. F1 = Help.

Figura III.1. Structura tabelului "cil_date_gen".

Ținându-se cont de faptul că, pentru fiecare cilindru, este indicată păstrarea datelor legate de profilele obținute în urma laminării, de laminoarele care utilizează acești cilindri (beneficiari) și cauzele care au dus la scoaterea din uz, au fost proiectate următoarele tabele: "beneficiar", "profil" și "cauze"; structura acestor tabele, precum și relațiile dintre tabelele bazei de date, sunt prezentate în fig. III.2, III.3, III.4, III.5.

id_benef	den_benef
1	laminor sarma LS 3
2	laminor profile usoare LPU
3	laminor profile mijlocii LPM
4	_
*	(AutoNumber)

Figura III.2. Structura tabelului "beneficiar".

Figura III.3. Structura tabelului "profil".

id_profil	profil
5	U 80
4	U 65
1	U 50
9	U 120
8	U 100
3	Square
2	I 80
7	I 120
6	I 100
10	_
*	(AutoNumber)

Figura III.4. Structura tabelului "cauze".

id_cauza	cauza scoaterii din uz
12	Transformare pt laminare fina
6	Rupt la prima bara
9	Rupt la montare
4	Rebut la turnare-fisura tableie
10	Rebut la turnare-fisura long.
3	Pori pe tableie
1	Pori
2	Largiri mari
5	Fisura pe tableie
11	Cordon marginal rupt
15	Cilindru rupt in exploatare
13	Cilindru predat pt laminare
8	Cilindru defect
7	Calibre largi
16	Calibre anulate+calibre largi
*	16 _
*	(AutoNumber)

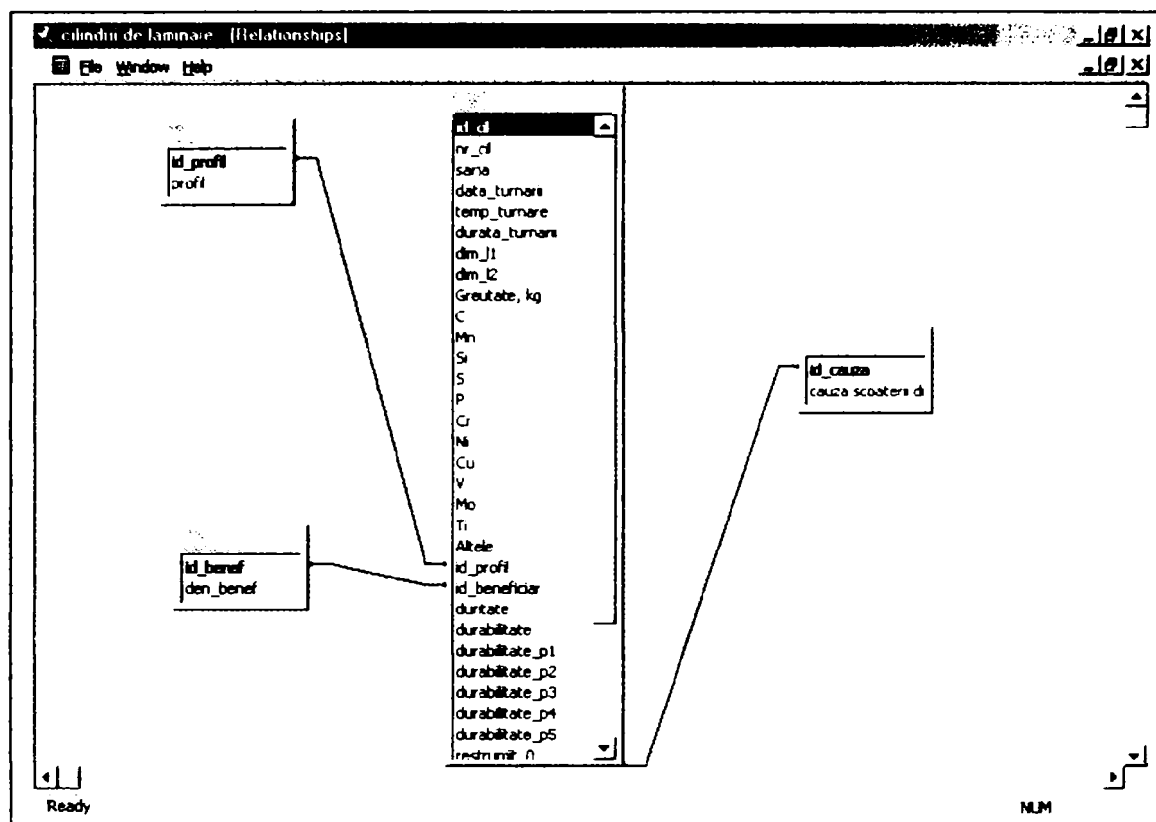


Figura III.5. Relațiile dintre tabele.

Prin proiectarea interfeței utilizator și a prelucrărilor specifice (interogări, comenzi etc.), a rezultat *meniul principal* al aplicației, prezentat în figura (fig.III.6.), care permite navigarea prin opțiunile aplicației.

Astfel, *meniul principal* al aplicației cuprinde următoarele secțiuni:

- *Cilindri noi* (fig. III.7.), în care există posibilitatea de a opera intrările de date legate de cilindri noi introduși în baza de date
- *Căutare cilindri* care, prin intermediul meniului prezentat în fig. III.8, ajută la regăsirea celui cilindru pe care dorim să-l vizualizăm, prin simpla tastare a numărului cilindrului sau prin alegere din lista derulantă. Rezultatul căutării se prezintă sub forma unei fișe de șarjă, vizualizată pe ecran, conform fig.III.9., sau cu posibilitate de tipărire la imprimantă (de exp. "Fișa cilindrului nr.061", prezentată la pg.67).
- *Căutare diverse criterii* (fig. III.10.), care realizează o centralizare a datelor legate de cilindri după diverse criterii de căutare: *beneficiari*, *profile* sau *cauza scoaterii din uz*. Rezultatul căutărilor, prin intermediul meniurilor din figurile III.11, III.12, III.13, este vizualizat prin intermediul fișelor, de exp.: "Cilindri destinați beneficiarului: laminor profile mijlocii LPM", "Cilindri profil I 80", "Cilindri care au următoarea cauză a scoaterii din uz: lărgiri mari".

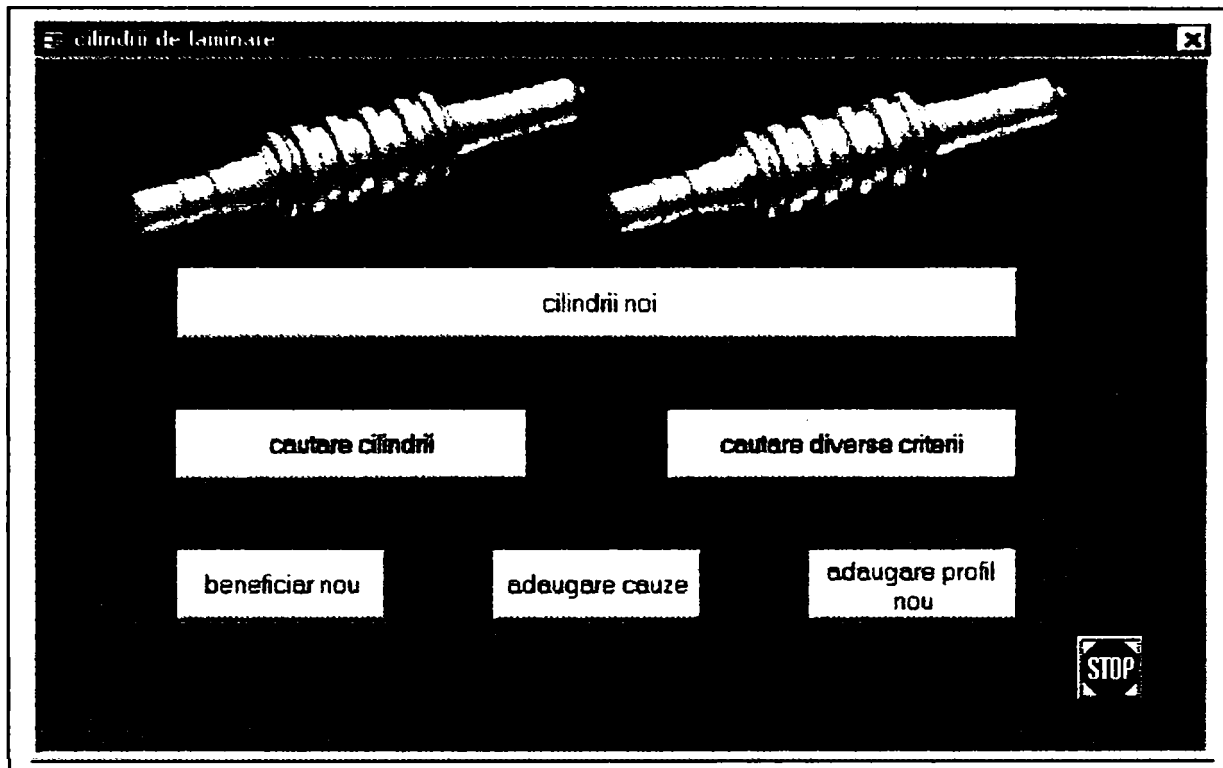


Figura III.6. Meniul principal.

Introducere date

Nr. Cilindru: 061 Diam. table, [mm]: 460 Data turnari: 20.10.1993 Temp. turnare, [°C]: 1450 Masa, [kg]: 3900
 Nr. Sarja: 00506 Lung. table, [mm]: 900 Data scoaterii din uz: 18.05.1998 Durata turnare: 6' Dunitate, [HB]: 291

Beneficiar: laminor profile mijoci LPM
 Profil: U 80

COMPOZITIA CHIMICA, %

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Ti	Altele
1.86	0.90	0.85	0.015	0.032	1.20	1.68	0.07		0.32		

Cota initiala, [mm]: -9 Restrungere 1, [mm]: -25 Restrungere 2, [mm]: -40 Restrungere 3, [mm]:
 Restrungere 4, [mm]:
 Laminat, [to]: 699 Laminat 1, [to]: 984 Laminat 2, [to]: 360 Laminat 3, [to]:
 Laminat 4, [to]:

Cauza scoaterii din uz: calibre largi Durabilitate, [to/mm]: 64

Record: 14 | 5 of 287

Revenire

Figura III.7. Introducere cilindri noi.

CAUTARE CILINDRII

numar cilindru:

- 013
- 016
- 019
- 042
- 061
- 071

Figura III.8. Căutare cilindri după numar.

cilindru

Nr. Cilindru Diam. table, (mm) Data turnării Temp. turn., (°C) Masa, (kg)
 Nr. Saria Lung. table, (mm) Data scoaterii din uz Durata turnare Duritate, (HB)

COMPOZITIA CHIMICA, %

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Ti	Altele
1.86	0.90	0.85	0.015	0.032	1.20	1.68	0.07		0.32		

Beneficiar
 Profil

Cota inițială, (mm) Restrușire 1, (mm) Restrușire 2, (mm) Restrușire 3, (mm)
 Restrușire 4, (mm)
 Laminat, (to) Laminat 1, (to) Laminat 2, (to) Laminat 3, (to)
 Laminat 4, (to)
 Cauza scoaterii din uz Durabilitate, (to/mm)

Figura III.9. Rezultatul căutării.

CAUTARE CILINDRII DUPA DIVERSE CRITERII DE CAUTARE

beneficiar profil cauza scoaterii din uz

cautare cilindrii dupa profilul acestora

Figura III.10. Cautare după diverse criterii.

CAUTARE CILINDRII DUPA BENEFICIAR

denumire beneficiar

laminor sarma LS 3
 laminor profile usoare LPU
 laminor profile mijlocii LPM

Figura III.11. Cautare după beneficiar.

FISA CILINDRULUI NR. 061

nr. cilindru
061

dimeciune, (mm)
460 X 900

masa, (kg)
3900

serja nr.
00506

data turnarii
20.10.1993

temperatura de turnare, (°C)
1450

durata turnarii, (min)
6'

COMPOZITIA CHIMICA, [%]

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Ti	Altele
1,86	0,90	0,85	0,015	0,032	1,20	1,68	0,07		0,32		

profil
U 80

denumire beneficiar
laminor profile mijlocii LPM

duritate, (HB)
291

durabilitate, (to/mm)
64

data scaterii din uz
18.05.1998

cauza scaterii din uz
calibre largi

costa initiala, (mm) -9
restrujire 1, (mm) -25
restrujire 2, (mm) -40
restrujire 3, (mm)
restrujire 4, (mm)

cantitate laminata, (ta) 699
cantitate laminata, (ta) 984
cantitate laminata, (ta) 360
cantitate laminata, (ta)
cantitate laminata, (ta)

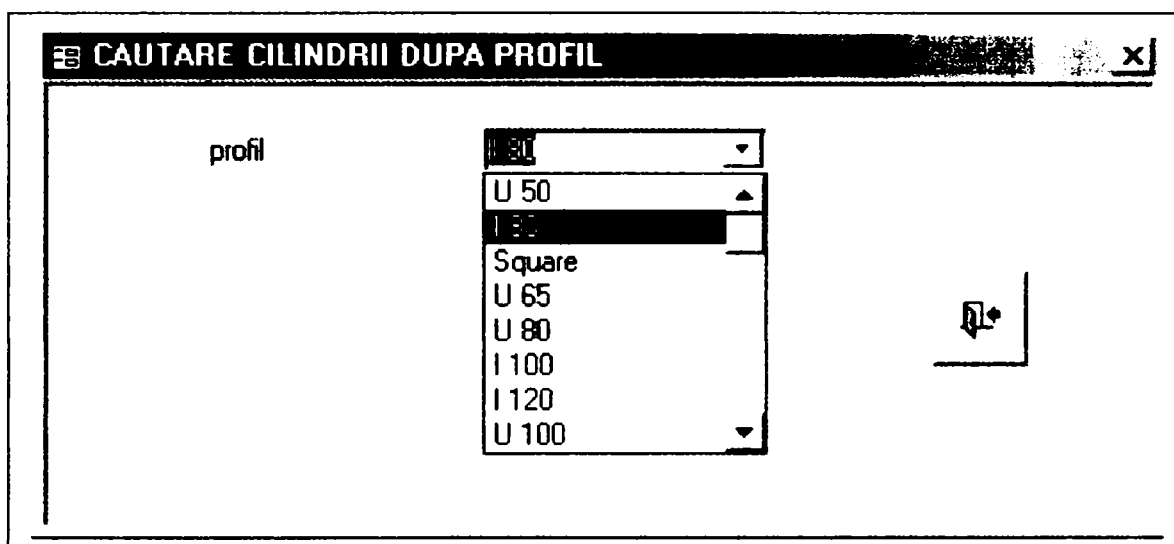


Figura III.12. Cautare după profil.

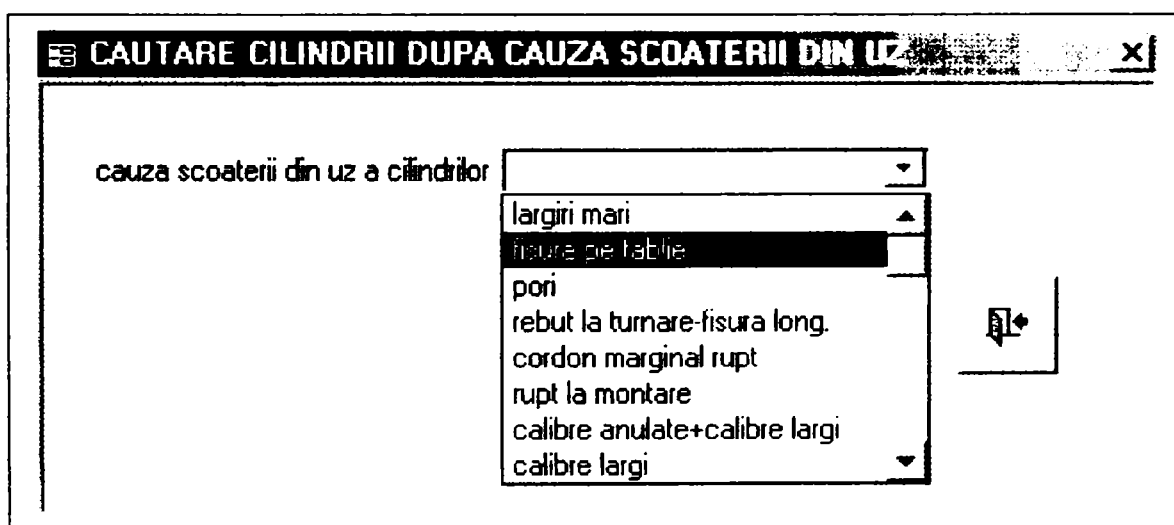


Figura III.13. Cautare după cauza scoaterii din uz.

Scopul pentru care a fost creată această bază de date este acela de a ușura urmărirea fiecărui cilindru, de la turnare și până la scoaterea din uz a acestuia. Baza de date a fost concepută și realizată de așa manieră încât aceasta poate fi folosită, cu succes, în practica industrială, cu atât mai mult cu cât a devenit foarte ușor (și puțin costisitor) a se lega, în rețea, cel puțin două calculatoare. Un alt avantaj de necontestat al utilizării acestei baze de date este stocarea mult mai sigură a datelor care se înregistrează pe întregul flux de fabricație al cilindrilor de laminare și accesarea cu viteză mare și cu ușurință a acestora.

Datele stocate în prezenta bază de date constituie punctul de plecare pentru studiul și analiza critică efectuate în capitolele de urmează, iar codul sursă al bazei de date este prezentat în Anexa III.1.

Cilindrii destinatii beneficiarului: laminor profile mijlocii LPM

cauza scaterii din uz	nr. cilindru	seria nr.	data turnarii	temperatura de turnare	durata turnarii	dimensiuni	masa, (kg)	data scaterii din uz	profil				
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	Alteale duritate, (HB)	durabilitatea, (to/mai)	data scaterii din uz	profil
-	0,81	0,60	0,010	0,032	1,12	1,59	0,15	0,32	1420	6'52"	550 X 900	09.07.1999	I 100
rupt la prima bara	0,85	0,74	0,015	0,037	1,06	1,55	0,15	0,32	1430	6'40"	550 X 900	25.03.1998	I 100
-	0,76	0,92	0,012	0,035	1,03	1,64	0,14	0,33	1430	7'10"	560 X 900	05.08.1997	I 80
-	0,82	0,73	0,016	0,031	1,09	1,6	0,13	0,37	1435	6'30"	550 X 900	27.10.1997	U 80
-	0,76	0,48	0,012	0,026	1,04	1,85	0,15	0,26	1440	6'10"	540 X 900	16.07.1998	I 100
calibre largi	0,76	0,48	0,012	0,026	1,04	1,85	0,15	0,26	1425	6'30"	540 X 900	5200	I 120
-	0,78	0,60	0,014	0,020	1,04	1,65	0,19	0,33	1430	4'22"	460 X 900	3800	U 100
-	0,78	0,60	0,014	0,020	1,04	1,65	0,19	0,33	1430	6'20"	540 X 900	5200	I 100
-	0,88	0,70	0,008	0,031	1,27	1,67	0,15	0,42	1430	5'10"	450 X 900	3700	I 80
-	0,88	0,70	0,008	0,031	1,27	1,67	0,15	0,42	1430	7'10"	540 X 900	5200	I 80
transformare pt laminare fina	0,86	0,84	0,012	0,020	1,12	1,73	0,21	0,35	1420	7'20"	570 X 900	5690	I 80
cilindru rupt in exploatare	0,81	0,60	0,010	0,032	1,12	1,59	0,15	0,32	1430	4'40"	460 X 900	3900	I 120
-	0,88	0,76	0,020	0,025	1,10	1,60	0,13	0,35	1420	6'25"	550 X 900	5400	I 80
cilindru defect	0,84	0,90	0,010	0,018	1,02	1,28	0,15	0,28	1420	4'50"	450 X 900	3700	U 50

cilindri profil 180

transfer		nr. cilindru		scarja nr.		data turnarii		temperatura de turnare		durata turnarii		dimensiuni		masa, [kg]	
C	Mh	Si	S	P	Cr	M	Cu	V	Mo	Ti	Alteala duritatea, [HB]	durabilitatea, (to./mm)	data scoaterii din uz	cauza scoaterii uz	
	laminor profile mijlocii LPM		0268		01855		25.08.1995		0,35		1420	6'25"	550 X 900	5400	
1,92	0,88	0,76	0,020	0,025	1,10	1,60	0,13				285	166		18.05.1998	
	laminor profile mijlocii LPM		016		00355		12.07.1993				1420	7'20"	570 X 900	5690	
1,82	0,86	0,84	0,012	0,020	1,12	1,73	0,21		0,35		286	76		06.10.1995	transformare pt laminare fine
	laminor profile mijlocii LPM		0365		02487		26.10.1996		0,32		1420	6'40"	530 X 900	5000	
1,97	0,80	0,75	0,010	0,025	1,15	1,70	0,19				320	85		04.02.2000	largin mari
	laminor profile mijlocii LPM		0333		02225		08.06.1996		0,32		1440	4'20"	450 X 900	3700	
1,84	0,74	0,70	0,012	0,027	1,02	1,68	0,12		0,32		310	56		08.04.1999	
	laminor profile mijlocii LPM		0329		02198		28.05.1996		0,30		1420	6'50"	570 X 900	5200	
1,77	0,85	0,78	0,010	0,022	1,04	1,66	0,19				300	96		04.02.2000	
	laminor profile mijlocii LPM		0318		02160		14.05.1996		0,27		1430	6'30"	540 X 900	5200	
1,78	0,68	0,70	0,008	0,028	1,00	1,68	0,17				300	50			
	laminor profile mijlocii LPM		0310		02111		07.04.1996		0,42		1430	7'10"	540 X 900	5200	
2,10	0,88	0,70	0,008	0,031	1,27	1,67	0,15				285	56		09.07.1999	
	laminor profile mijlocii LPM		0309		02111		07.04.1996		0,42		1430	5'10"	450 X 900	3700	
2,10	0,88	0,70	0,008	0,031	1,27	1,67	0,15				280	50			
	laminor profile mijlocii LPM		0370E		02562		09.12.1996				1420	6'10"	540 X 900	5200	
1,85	0,78	0,57	0,020	0,020	1,10	1,70	0,15		0,34	0,05	320	47		18.05.1998	
	laminor profile mijlocii LPM		0273		01950		06.10.1995		0,37		1420	7'10"	540 X 900	5200	
1,78	0,82	0,78	0,014	0,038	1,15	1,77	0,13				380	93		04.10.1998	cordon marginal rupt
	laminor profile mijlocii LPM		0372E		02578		16.12.1996		0,35	0,04	1430	4'20"	450 X 900	4000	
1,90	0,90	0,65	0,012	0,038	1,08	1,60	0,16				360	47		18.05.1998	
	laminor profile mijlocii LPM		0259		01771		16.07.1995		0,32		1430	6'15"	540 X 900	5200	
1,87	0,85	0,75	0,020	0,035	1,08	1,73	0,13				310	52		18.05.1998	
	laminor profile mijlocii LPM		0254		01739		01.07.1995		0,33		1435	6'30"	550 X 900	5400	
1,82	0,86	0,71	0,010	0,033	1,15	1,75	0,17				380	41		04.10.1998	
	laminor profile mijlocii LPM		0250		01725		23.06.1995		0,37		1430	4'40"	460 X 900	3900	
1,92	0,84	0,70	0,020	0,035	1,15	1,92	0,16				330	30		18.05.1998	

Cilindrii care au urmatoarea cauza a secatarii din uz: largiri mari

benzina		nr. cilindru	seria nr.	data turnarii	temperatura de turnare	durata turnarii	dimensiuni	masa, (kg)							
C	Mh	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Ti	Alte	duritate, (HB)	durabilitate, (to/ana)	data secatarii din uz	profil
												6'20"	540 X 900	5200	
												310	50	09.07.1999	I 100
												4'20"	450 X 900	4000	
												340	64	04.02.2000	I 80
												4'10"	450 X 900	4000	
												300	50	08.07.1999	I 100
												6'40"	530 X 900	5000	
												320	85	04.02.2000	I 80

III.2. ANALIZA FACTORILOR DE INFLUENȚĂ ASUPRA DURABILITĂȚII CILINDRILOR TIP ADAMIT

Analiza critică a factorilor ce influențează durabilitatea în exploatare a cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, este în strânsă legătură cu tehnologia de fabricație a acestora, respectiv elaborarea aliajului, executarea formelor destinate turnării cilindrilor, turnarea, dezbaterea etc., precum și cu condițiile reale de exploatare, respectiv de laminare. În acest caz, este necesară studierea tuturor factorilor care influențează, într-un mod sau altul, durabilitatea în exploatare a cilindrilor de laminare.

III.2.1. Influența tehnologiei de fabricație asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare

Analiza tehnologiei de fabricație a cilindrilor de laminare, turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, presupune parcurgerea tuturor etapelor, pornind de la elaborarea și turnarea aliajului lichid și până la tratamentul termic aplicat cilindrilor turnați.

III.2.1.1. Analiza tehnologiei de elaborare - turnare a cilindrilor

La S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, asimilarea tehnologiei de fabricație a cilindrilor tip Adamit a început în anul 1988, prin elaborarea și turnarea acestora la atelierul Oțelărie, din cadrul secției Turnătorie. Din anul 1993, turnarea acestor cilindri a continuat la secția T.U.T. (Turnătorie Utilaj de Turnare), oțelul fiind elaborat la secția Oțelăria Electrică nr. 1 (OE 1), în cuptoare electrice cu arc, cu căptușeală bazică, de 20 t capacitate [96].

Fluxul tehnologic actual de fabricație este redat în schema din fig. III.14.

În perioada 01.01 - 03.06.2001, s-au elaborat 23 șarje de oțel tip Adamit, din care s-au turnat 92 cilindri. Situația șarjelor de oțel Adamit, elaborate și turnate în perioada ianuarie-iulie 2001, este prezentată în tab.III.1. Elaborarea oțelului s-a efectuat conform Instrucțiunilor Tehnologice, cod 607-92, cu caracter experimental [96],[98],[121].

Fazele elaborării oțelului hipereutectoid tip Adamit la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara au fost prezentate în cadrul capitolului I, paragraful I.3.2.2.

Din urmărirea efectuată au rezultat următoarele observații privind *elaborarea oțelului*:

- încărcătura metalică constă din 91...95% spărturi de cilindri de Adamit și deșeuri rezultate de la prelucrarea acestora (maselote, așchii), în loc de max.60% cât se recomandă în literatura de specialitate;
- pentru carburare se folosește o cantitate variabilă, de 30...70 kg cocs/t încărcătură, dozarea acestuia și asimilarea în baia metalică la topire fiind imprecisă; instrucțiunile tehnologice prevăd, ca material de carburare, cocs petrol sau spărturi de electrozi;
- nu se stăpânește variația conținutului de carbon în toate fazele procesului de elaborare, situație prezentată explicit în tab.III.1 și reprezentată grafic în fig.III.15.

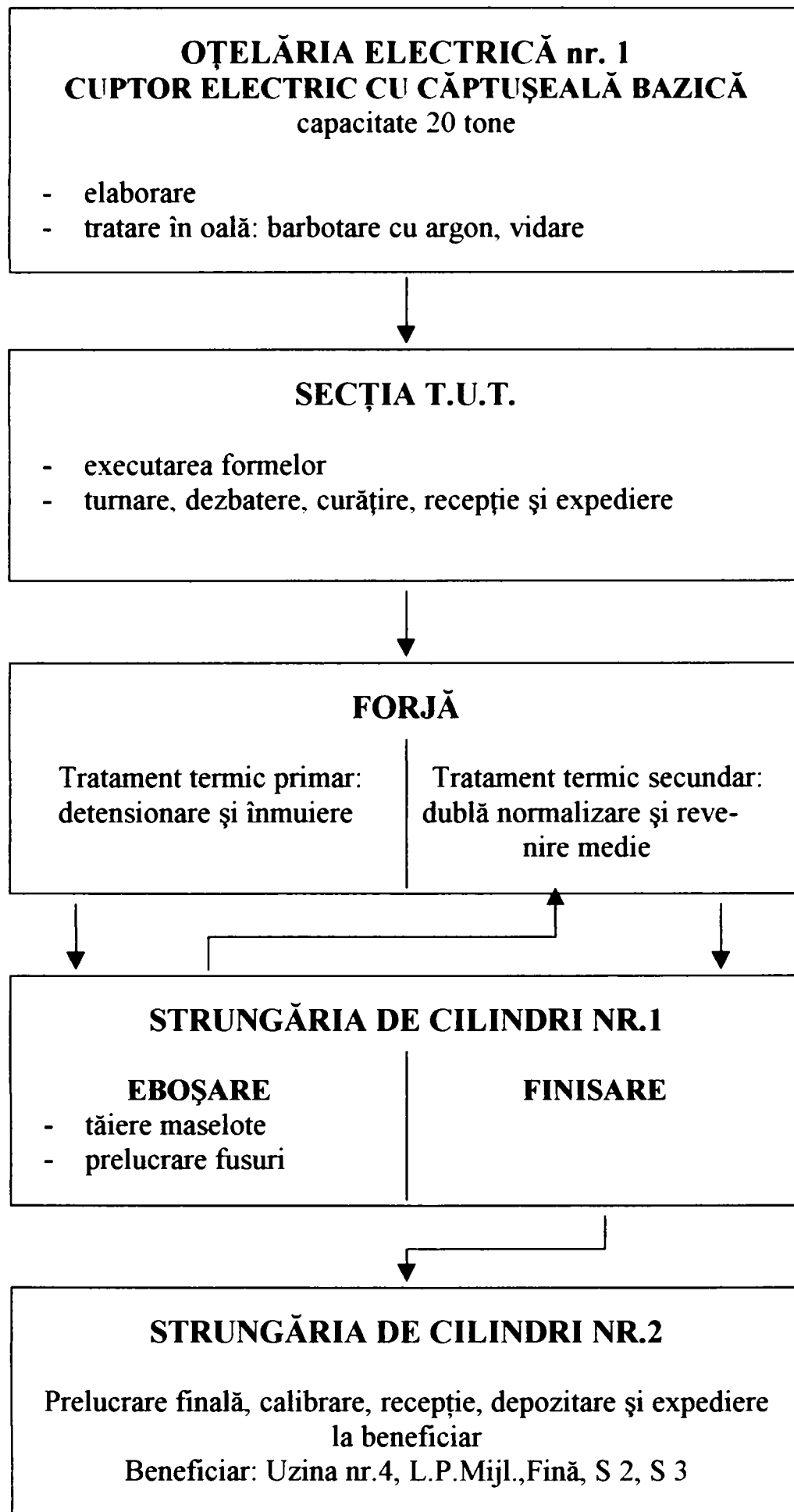


Figura III.14. Schema fluxului tehnologic de fabricație a cilindrilor de laminor, turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit.

Tabelul III.1. Situația șarjelor de oțel hipereutectoid, tip Adamit studiate.

Nr. crt	Șarja nr.	Cilindrul nr.	C _{topire} [%]	C _{afinare} [%]	Compoziția chimică finală [%]										Durata turn. [min]		Observatii
					C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr	Temp de turnare [°C]				
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
1	03143	0524 ...	2,50	1,90	1,82	0,75	0,83	0,035	0,012	1,77	0,33	1,06	26 1420	Gr = 20 kg (la cil. 4 se intervine cu O ₂)			
2	03148	0528 ...	1,68	1,76	1,88	0,65	0,82	0,018	0,010	1,65	0,33	1,08	21 1430	Carburat după topire și după afinare Gr = 20 kg (la cil. 4 se intervine cu O ₂)			
3	03150	0532 ...	1,88	1,47	2,00	0,78	0,80	0,015	0,008	1,78	0,33	1,08	22 1420	Carburat după topire și după afinare Gr = 40kg, FeMo = 25kg, FeSi = 70kg, Al = 25kg			
4	03156	0536 ...	2,10	1,90	2,00	0,75	0,87	0,028	0,008	1,73	0,39	1,28	21 1430				
5	03161	0540 ...	2,80	1,95	1,98	0,72	0,80	0,030	0,010	1,62	0,35	1,05	25 1430	Ni = 30kg, FeMo = 25kg, Al = 30kg			
6	03167	0544 ...	2,50	1,92	1,92	0,70	0,85	0,025	0,010	1,67	0,34	1,16	25 1430	FeMo = 30kg, Ni = 60kg, Vid = 200 torri			
7	03168	0548 ...	2,45	2,00	1,90	0,79	0,80	0,020	0,010	1,78	0,31	1,07	25 1430	FeMo = 15kg, FeSi = 30 kg, Ni = 40kg, Vid = 135 torri			
8	03172	0552 ...	1,48	1,73	1,85	0,72	0,83	0,027	0,010	1,60	0,30	1,08	25 1435	Carburat după topire și după afinare Al = 25kg, Gr = 60kg, FeSi = 70kg, Vid=240 torri (la cil. 1 se intervine cu O ₂)			
9	03178	0556 ...	2,30	1,68	1,96	0,80	0,80	0,030	0,008	1,60	0,33	1,15	25 1440	Carburat după afinare Al = 25kg, Gr = 50kg, Vid = 140 torri			
10	03183	0560 ...	2,80	1,70	1,98	0,73	0,82	0,024	0,012	1,70	0,31	1,10	17 1430	Carburat după afinare Gr = 24 kg, Vid = 90 torri			
11	03188	0564 ...	2,65	1,95	1,90	0,75	0,84	0,035	0,012	1,65	0,34	1,12	20 1430	FeSi = 60 kg, Vid = 90 torri			

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
12	03198	0568 ... 0571	2,95	1,95	1,85	0,72	0,82	0,023	0,010	1,60	0,32	1,12	20 1420	Al = 25 kg, Vid = 90 torri
13	03202	0572 ... 0575	2,64	1,80	2,00	0,66	0,84	0,029	0,010	1,60	0,38	1,15	20 1425	Gr = 25 kg, Ni = 30kg, Vid = 110 torri
14	03207	0576 ... 0579	2,85	1,65	1,90	0,80	0,80	0,025	0,014	1,75	0,34	1,10	20 1430	Carburat după afinare și după topire FeSi = 80kg, Gr = 20 kg, Vid = 250 torri
15	03213	0580 ... 0583	2,27	1,62	1,80	0,68	0,74	0,020	0,010	1,60	0,30	1,05	20 1425	FeMo = 20kg, Gr = 25 kg, Vid = 230 torri
16	03219	0584 ... 0587	2,81	1,99	1,90	0,75	0,80	0,022	0,010	1,68	0,32	1,20	21 1430	Al = 30kg, Ni = 10kg, FeMo = 10kg, Vid = 130 torri
17	03224	0588 ... 0591	2,80	2,00	1,98	0,70	0,88	0,022	0,012	1,65	0,36	1,18	20 1435	Al = 25kg, Ni = 30kg, FeMo = 10kg, Vid = 120 torri
18	03228	0592 ... 0595	2,00	1,84	1,80	0,72	0,77	0,020	0,010	1,62	0,31	1,01	20 1430	Gr = 34 kg, Vid = 50 torri
19	03235	0599 ... 0599	2,20	1,90	1,98	0,73	0,74	0,020	0,012	1,60	0,35	1,00	35 1440	Al = 30 kg, Gr = 20 kg, Barbotare 50 min
20	03261	0600 ... 0603	1,62	1,95	1,92	0,64	0,80	0,020	0,008	1,66	0,34	1,00	25 1435	Carburat după topire Al = 25 kg
21	03266	0604 ... 0607	2,76	1,88	1,82	0,63	0,84	0,028	0,010	1,66	0,35	1,10	20 1420	Gr = 45 kg, Barbotare 10 min
22	03271	0608 ... 0611	2,80	1,84	1,82	0,70	0,65	0,020	0,020	1,65	0,30	1,05	25 1425	Gr = 40 kg, FeSi = 30kg, Al = 25kg
23	03274	0612 ... 0615	2,30	2,00	1,90	0,72	0,75	0,015	0,012	1,68	0,30	1,02	15 1440	Al = 25 kg, Vid = 160 torri

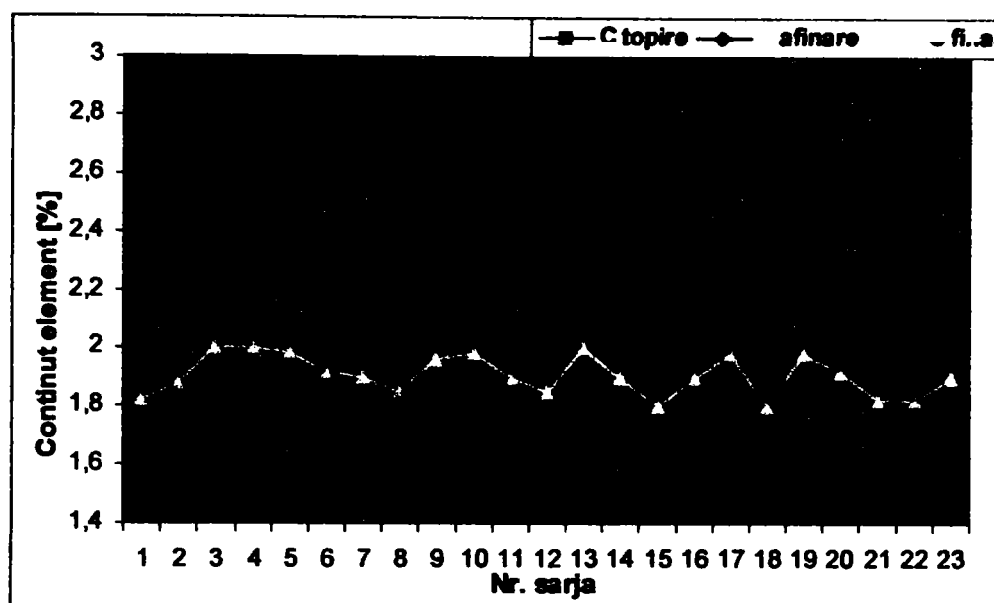


Figura III.15. Variația conținuturilor de carbon în diferite faze ale elaborării.

Din graficul prezentat în fig. III.15 rezultă faptul că, la topire, conținutul de carbon al șarjelor elaborate prezintă o variație destul de mare a concentrațiilor, comparativ cu conținutul de carbon la afinare sau final. Din această cauză se practică recarburări după topire, la sfârșitul perioadei de afinare și chiar corecția conținutului de carbon final prin adaos de grafit în oala de turnare, fapt ce reiese și din tab.III.1.

- pentru încadrare în compoziția chimică prescrisă se practică corecții și la elementele de aliere Cr, Ni, Mo: cu cca 5...10 minute înainte de evacuare, pe jgheab sau în oala de turnare.

În fig.III.16 este prezentată variația elementelor de aliere, Cr, Ni, Mo, pentru cele 23 șarje elaborate. Din graficul prezentat rezultă faptul că aceste elemente se încadrează în limitele prevăzute, respectiv Cr = (1,0...1,2)%, Ni = (1,6...1,2)%, Mo = (0,3...0,5)%, conform tab.I.3.

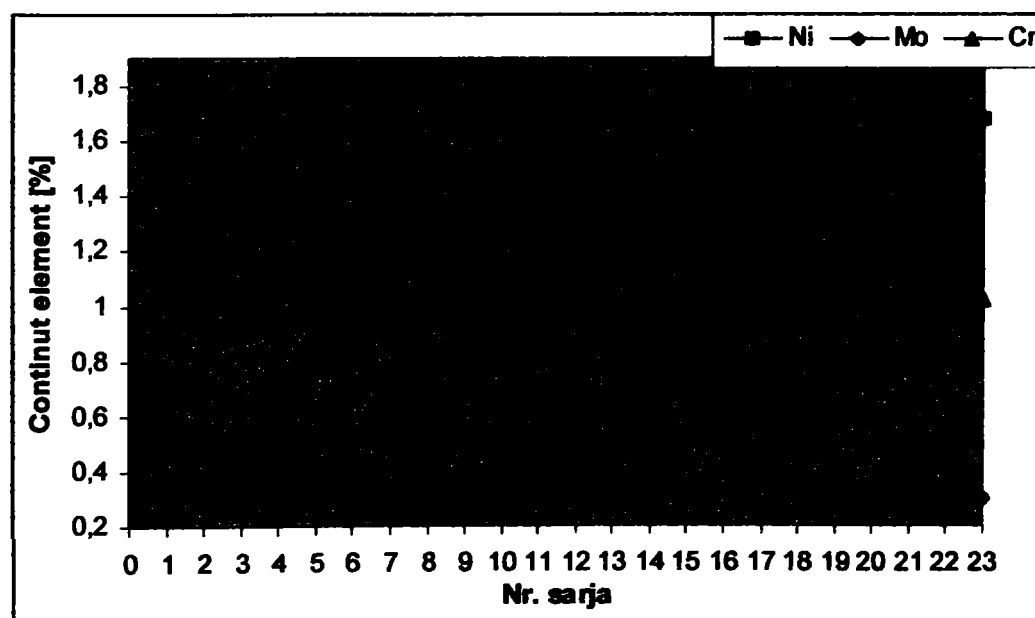


Figura III.16. Variația elementelor de aliere, Cr, Ni, Mo, pentru șarjele studiate.

- având în vedere prescripțiile privitoare la conținutul de gaze și incluziuni nemetalice trebuie evitată adăugarea materialelor reci și necalcinate;
- după evacuare, oțelul este tratat în oală, prin barbotare cu argon iar, în ultima perioadă s-a încercat vidarea în instalații V.H.D., dar vidul realizat în condițiile actuale, de cca. 150...200 torri este necorespunzător (este indicat un vid sub 50 torri);
- după barbotare și vidare se verifică temperatura, se transportă oala la sectorul de turnare, unde se reverifică temperatura care, de regulă, este mai mare decât cea prescrisă. Pentru răcirea oțelului până la temperatura de turnare se practică rebarbotarea oțelului cu argon.

Aceste rebarbotări sunt foarte dăunătoare în ceea ce privește calitatea oțelului. Trebuie impusă o temperatură minimă de sfârșit de barbotare: se propune interzicerea barbotării la temperaturi mai mici de 1450°C. De asemenea, este necesar un timp pentru decantarea incluziunilor nemetalice, timpul de transport de la cuptorul de elaborare la sectorul de turnare fiind favorabil desfășurării acestui proces. Dacă barbotarea se execută la secția OE1 (de obicei sub vid 150..200torri), este recomandabilă finalizarea acesteia până atingerea unei temperaturi impuse (1450...1470°), fără efectuarea rebarbotării la secția T.U.T. Doar în situația în care oțelul nu se rebarbotează la secția OE1, se efectuează barbotarea la secția T.U.T. (respectând, însă, temperatura minimă, de 1450°C, de sfârșit de barbotare).

Turnarea cilindrilor din oțel Adamit se execută direct, prin intermediul unei pâlnii de centrare (v.capI.fig.I.20.), din material refractar, fixată rigid, deasupra maselelor.

În ceea ce privește **temperatura de turnare**, aceasta a fost stabilită, prin instrucțiunile tehnologice în vigoare, la 1420...1430°C, valoare pe care o considerăm prea mică și propunem ca temperatura de început de turnare să fie cuprinsă în intervalul 1430...1440°C. Temperaturile de început de turnare înregistrate în cazul celor 23 șarje sunt prezentate în fig. III.17.

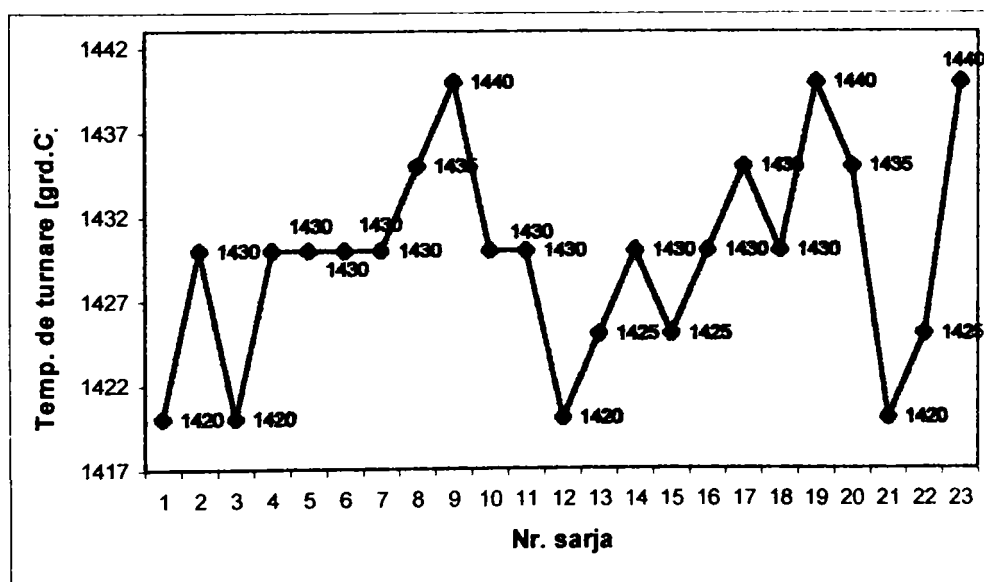


Figura III.17. Valorile temperaturilor de turnare pe șarjele elaborate.

Deși, compozițiile chimice și temperaturile de turnare se încadrează în limitele prevăzute de standardele în vigoare, ipoteza normalității distribuției datelor înregistrate poate fi ușor verificată cu ajutorul analizei statistico-matematice, respectiv testul hi pătrat.

Prelucrarea statistico-matematică a datelor tehnologice

Aprecierea parametrilor statistici ai datelor tehnologice, s-a realizat pe baza prelucrării statistice a rezultatelor înregistrărilor.

Aprecierea fiecărei grupe de rezultate, datelor înregistrate efectiv, a condus la transformarea temperaturilor de turnare și a compoziției chimice, specificate în coloanele 2...10 din tab. III.2, în variabile aleatoare, notate X.

Tabelul III.2. Caracteristicile șarjelor studiate.

Nr. crt.	Șarja nr.	C _{topire} [%]	C _{afinare} [%]	Compoziția chimică finală [%]						Temp de turnare [°C]
				C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	03143	2,50	1,90	1,82	0,75	0,83	1,77	0,33	1,06	1420
2	03148	1,68	1,76	1,88	0,65	0,82	1,65	0,33	1,08	1430
3	03150	1,88	1,47	2,00	0,78	0,80	1,78	0,33	1,08	1420
4	03156	2,10	1,90	2,00	0,75	0,87	1,73	0,39	1,28	1430
5	03161	2,80	1,95	1,98	0,72	0,80	1,62	0,35	1,05	1430
6	03167	2,50	1,92	1,92	0,70	0,85	1,67	0,34	1,16	1430
7	03168	2,45	2,00	1,90	0,79	0,80	1,78	0,31	1,07	1430
8	03172	1,48	1,73	1,85	0,72	0,83	1,60	0,30	1,08	1435
9	03178	2,30	1,68	1,96	0,80	0,80	1,60	0,33	1,15	1440
10	03183	2,80	1,70	1,98	0,73	0,82	1,70	0,31	1,10	1430
11	03188	2,65	1,95	1,90	0,75	0,84	1,65	0,34	1,12	1430
12	03198	2,95	1,95	1,85	0,72	0,82	1,60	0,32	1,12	1420
13	03202	2,64	1,80	2,00	0,66	0,84	1,60	0,38	1,15	1425
14	03207	2,85	1,65	1,90	0,80	0,80	1,75	0,34	1,10	1430
15	03213	2,27	1,62	1,80	0,68	0,74	1,60	0,30	1,05	1425
16	03219	2,81	1,99	1,90	0,75	0,80	1,68	0,32	1,20	1430
17	03224	2,80	2,00	1,98	0,70	0,88	1,65	0,36	1,18	1435
18	03228	2,00	1,84	1,80	0,72	0,77	1,62	0,31	1,01	1430
19	03235	2,20	1,90	1,98	0,73	0,74	1,60	0,35	1,00	1440
20	03261	1,62	1,95	1,92	0,64	0,80	1,66	0,34	1,00	1435
21	03266	2,76	1,88	1,82	0,63	0,84	1,66	0,35	1,10	1420
22	03271	2,80	1,84	1,82	0,70	0,65	1,65	0,30	1,05	1425
23	03274	2,30	2,00	1,90	0,72	0,75	1,68	0,30	1,02	1440

Prelucrarea efectivă a datelor înregistrate s-a efectuat prin parcurgerea, pentru fiecare variabilă, a următoarelor etape [2],[15],[50]:

- Gruparea datelor și determinarea frecvențelor intervalelor de grupare
- Calculul principalilor parametrii statistici
- Verificarea caracterului repartiției experimentale.

a). Gruparea datelor și determinarea frecvențelor intervalelor de grupare

La efectuarea celor n determinări, pentru fiecare din parametrii studiați ($n = 23$), s-au obținut valorile x_1, x_2, \dots, x_n , care reprezintă câte o selecție extrasă din colectivitatea statistică. Explicarea acestor valori, înscrise în tabelul datelor primare III.2, s-a realizat prin gruparea lor în clase sau intervale de grupare. Numărul de grupe, n_g , intervalele de grupare, Δ și caracteristica de grupă, x_i , rezultă, după [2],[3] cu relațiile:

$$n_g = 1 + 3,222 \cdot \lg n \quad (\text{III.1})$$

$$\Delta = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,222 \cdot \lg n} \quad (\text{III.2})$$

în care:

n - volumul eșantionului (numărul datelor);

x_{\max} , x_{\min} - valoarea maximă, respectiv minimă a parametrului urmărit;

x_i - valoarea de la mijlocul intervalului.

Pentru fiecare interval de grupare, i , s-au determinat următoarele frecvențe:

- **frecvența absolută, f_{ai} și frecvența cumulată absolută, f_{cai} :**

$$f_{ai} = n_i, \text{ respectiv } f_{cai} = n_i + n_{i-1} + \dots + n_1 \quad (\text{III.3})$$

în care n_i reprezintă numărul de valori ale parametrului x din intervalul de grupare i .

- **frecvența relativă, f_{ri} și frecvența cumulată relativă, f_{cri} :**

$$f_{ri} = n_i / n, \text{ respectiv } f_{cri} = f_{ri} + f_{ri-1} + \dots + f_{r1} \quad (\text{III.4})$$

în care f_{ri} reprezintă frecvențele relative ale intervalelor de grupare respective.

Gruparea datelor și determinarea frecvențelor s-a efectuat, pentru toate variabilele aleatoare menționate anterior, utilizând programul automat orientat pe calcul tabelar EXCEL 7.0. [40], ce rulează sub WINDOWS '95.

Pentru exemplificare, celulele tab. III.3 conțin valorile finale, obținute prin aplicarea în formulele de calcul ale mărimilor specificate, aferente variabilei aleatoare **Temperatura de turnare [°C]**. Dacă valorile experimentale din coloana 10 din tab.III.2 (pentru care $n = 23$, $x_{\min} = 1420^\circ\text{C}$ și $x_{\max} = 1440^\circ\text{C}$) sunt înlocuite în relațiile (III.1), (III.2), (III.3), rezultă $n_g = 5$ și $\Delta = 4$.

Tabelul III.3. Repartiția frecvențelor pe grupe pentru variabila aleatoare **Temperatura de turnare [°C]**

Nr. crt. i	Limita inferioară	Limita superioară	Caracteristica grupeii	f_{ai}	f_{ri}	f_{cri}	f_{cai}
1	1420	1424	1422	4	0,173913	0,173913	4
2	1424	1428	1426	3	0,130435	0,304348	7
3	1428	1432	1430	10	0,434783	0,739130	17
4	1432	1436	1434	3	0,130435	0,869565	20
5	1436	1440	1438	3	0,130435	1,000000	23
SUMA	-	-	-	23	1,000000	-	

Evidențierea repartiției experimentale a acestei variabile s-a realizat în fig. III.18, prin reprezentarea grafică a histogramei și poligonului frecvenței absolute.

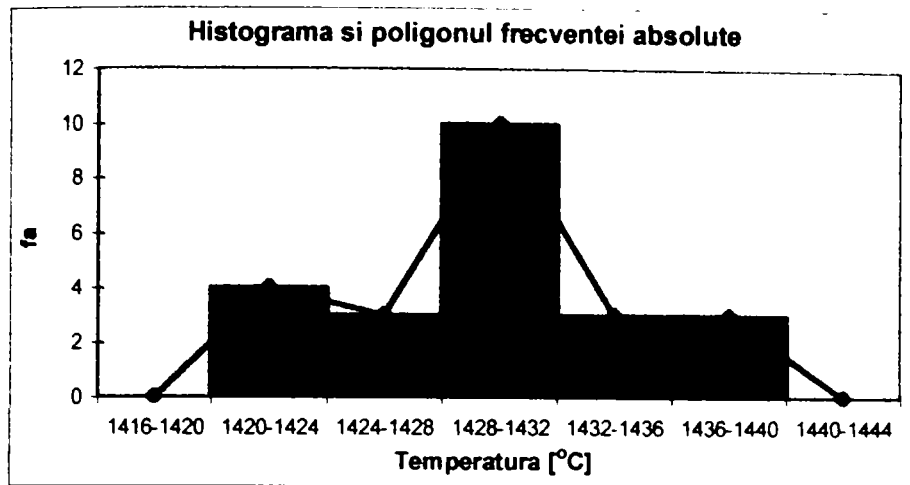


Figura III.18. Repartiția frecvenței variabilei Temperatura de turnare, [°C]. Histograma și poligonul frecvenței absolute.

Similar, în tab.III.4 sunt prezentate valorile finale, aferente variabilei aleatoare **Carbon la topire [%]**. În formulele de calcul s-au înlocuit valorile experimentale din coloana 2 din tab.III.2, pentru care $n = 23$, $x_{min} = 1,48\%$ și $x_{max} = 2,95\%$ ($n_g = 5$ și $\Delta = 0,294$).

Tabelul III.4. Repartiția frecvențelor pe grupe pentru variabila aleatoare **Carbon la topire [%]**

Nr. crt. <i>i</i>	Limita inferioară	Limita superioară	Caracteristica grupei	f_{ai}	f_{ri}	f_{cri}	f_{cai}
1	1,48	1,774	1,627	3	0,130435	0,130435	3
2	1,774	2,068	1,921	2	0,086957	0,217391	5
3	2,068	2,362	2,215	5	0,217391	0,434783	10
4	2,362	2,656	2,509	4	0,173913	0,608696	14
5	2,656	2,95	2,803	9	0,391304	1	23
SUMA	-	-	-	23	1,000000	-	

Histograma și poligonul frecvenței absolute pentru variabila **Carbonul la topire** sunt prezentate în fig.III.19.

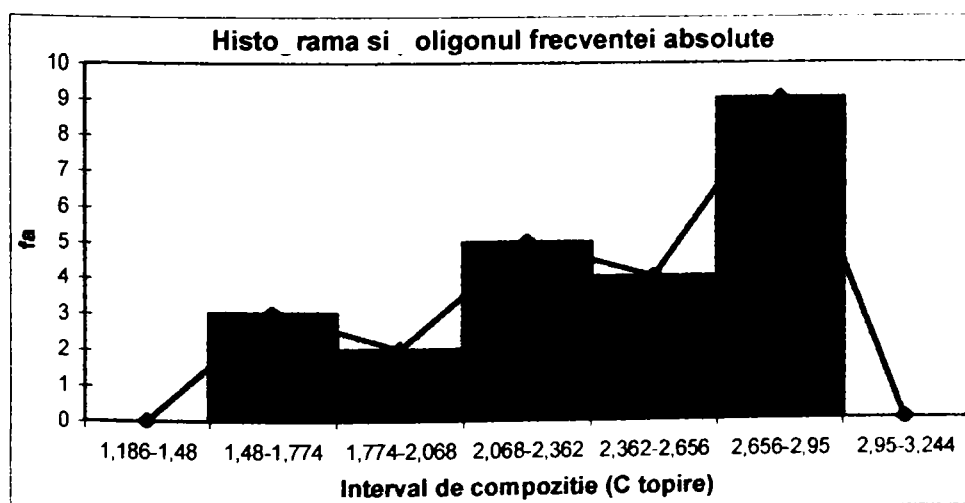


Figura III.19. Repartiția frecvenței variabilei Carbon la topire, [%]. Histograma și poligonul frecvenței absolute.

Pentru variabila aleatoare **Carbon la afinare [%]**, cu valorile experimentale din coloana 3 a tab.III.2, rezultă, pentru $n = 23$, $x_{min} = 1,47\%$ și $x_{max} = 2,00\%$, $n_g = 5$ și $\Delta = 0,106$.

Tabelul III.5. Repartiția frecvențelor pe grupe pentru variabila aleatoare **Carbon la afinare [%]**

Nr. crt. <i>i</i>	Limita inferioară	Limita superioară	Caracteristica grupe	f_{ii}	f_{ri}	f_{cri}	f_{cai}
1	1,47	1,576	1,523	1	0,043478	0,043478	1
2	1,576	1,682	1,629	3	0,130435	0,173913	4
3	1,682	1,788	1,735	3	0,130435	0,304348	7
4	1,788	1,894	1,841	4	0,173913	0,478261	11
5	1,894	2	1,947	12	0,521739	1	23
SUMA	-	-	-	23	1,000000	-	

Histograma și poligonul frecvenței absolute, pentru variabila **Carbon la afinare [%]**, sunt prezentate în fig.III.20.

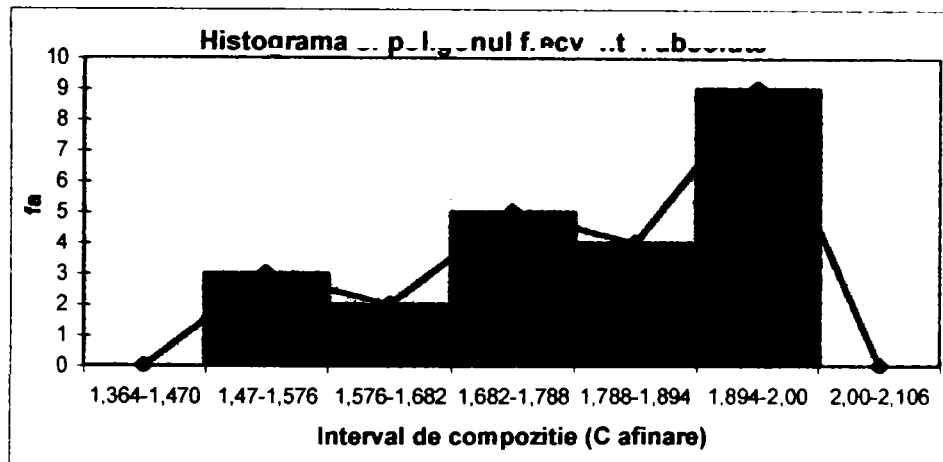


Figura III.20. Repartiția frecvenței variabilei Carbon la afinare, [%]. H.s.or.m. și poligonul frecvenței absolute.

În cazul variabilei aleatoare **Carbon final [%]** rezultă următoarele: $n = 23$, $x_{min} = 1,80\%$ și $x_{max} = 2,00\%$, $n_g = 5$ și $\Delta = 0,04$, iar mărimile calculate sunt prezentate în tab.III.6.

Tabelul III.6. Repartiția frecvențelor pe grupe pentru variabila aleatoare **Carbon final [%]**

Nr. crt. <i>i</i>	Limita inferioară	Limita superioară	Caracteristica grupe	f_{ii}	f_{ri}	f_{cri}	f_{cai}
1	1,8	1,84	1,82	5	0,217391	0,217391	5
2	1,84	1,880	1,86	3	0,130435	0,347826	8
3	1,88	1,92	1,9	7	0,304348	0,652174	15
4	1,92	1,96	1,94	1	0,043478	0,695652	16
5	1,96	2	1,98	7	0,304348	1	23
SUMA	-	-	-	23	1,000000	-	

Histograma și poligonul frecvenței absolute pentru variabila **Carbonul final [%]** sunt prezentate în fig.III.21.

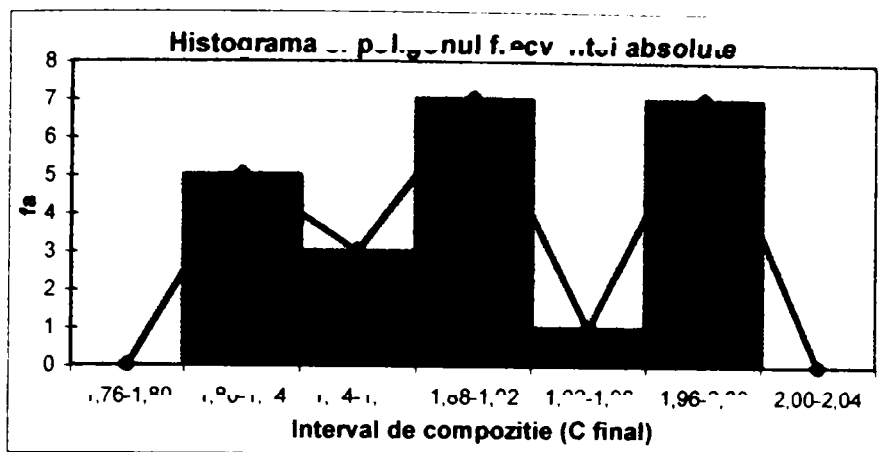


Figura III.21. Repartiția frecvenței variabilei Carbon final, [%]. Histograma și poligonul frecvenței absolute.

Similar cu prelucrarea statistică prezentată mai sus (pentru variabilele aleatoare **Temperatura de turnare, Carbon la topire, Carbon la afinare, Carbon final**), în continuare este prezentată prelucrarea statistică pentru celelalte variabile aleatoare, prezentate în tab.III.2, respectiv pentru **Siliciu, Mangan, Nichel, Crom, Molibden**.

- pentru variabila aleatoare **Siliciu [%]** rezultă: $n = 23$, $x_{\min} = 0,63\%$ și $x_{\max} = 0,80\%$, $n_g = 5$ și $\Delta = 0,034$. Mărimile calculate sunt prezentate în tab.III.7, iar histograma și poligonul frecvenței absolute în fig.III.22.

Tabelul III.7. Repartiția frecvențelor pe grupe pentru variabila aleatoare **Siliciu [%]**

Nr. crt. i	Limita inferioară	Limita superioară	Caracteristica grupei	f_{ai}	f_{ni}	f_{ri}	f_{ci}
1	0,63	0,664	0,647	4	0,173913	0,173913	4
2	0,664	0,698	0,681	1	0,043478	0,217391	5
3	0,698	0,732	0,715	10	0,434783	0,652174	15
4	0,732	0,766	0,749	4	0,173913	0,826087	19
5	0,766	0,80	0,783	4	0,173913	1	23
SUMA	-	-	-	23	1,000000	-	

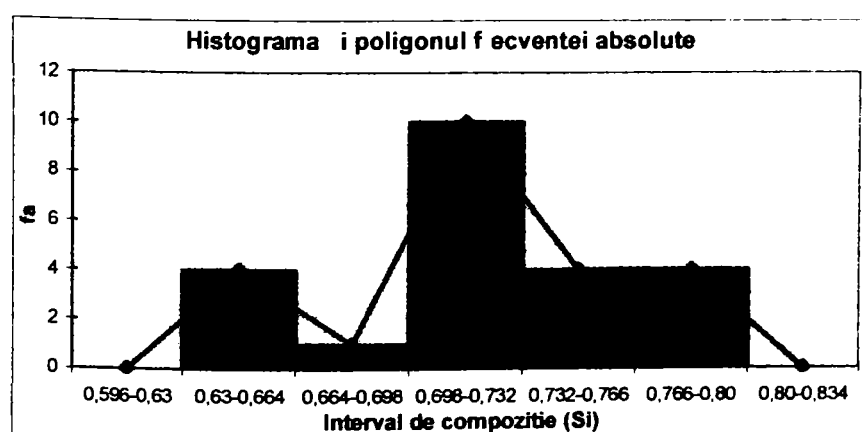


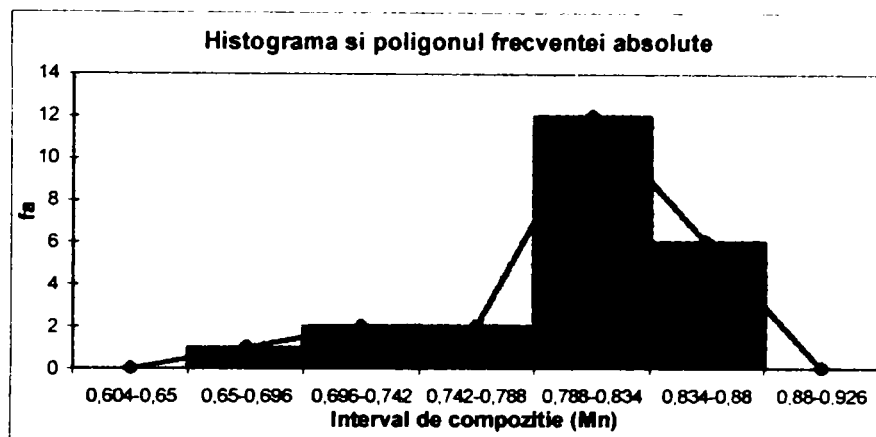
Figura III.22. Repartiția frecvenței variabilei Siliciu, [%]. Histograma și poligonul frecvenței absolute.

- pentru variabila aleatoare **Mangan [%]** rezultă $n = 23$, $x_{\min} = 0,65\%$ și $x_{\max} = 0,88\%$, $n_g = 5$ și $\Delta = 0,046$. Mărimile calculate sunt prezentate în tab.III.8, iar histograma și poligonul frecvenței absolute în fig.III.23.

Tabelul III.8. Repartiția frecvențelor pe grupe pentru variabila aleatoare Mangan [%]

Nr. crt. <i>i</i>	Limita inferioară	Limita superioară	Caracteristica grupei	f_{ii}	f_{ri}	f_{cri}	f_{cai}
1	0,65	0,696	0,673	1	0,043478	0,043478	1
2	0,696	0,742	0,719	2	0,086957	0,130435	3
3	0,742	0,788	0,765	2	0,086957	0,217391	5
4	0,788	0,834	0,811	12	0,521739	0,73913	17
5	0,834	0,88	0,857	6	0,26087	1	23
SUMA	-	-	-	23	1,000000	-	

Figura III.23. Repartiția frecvenței variabilei Mangan, [%]. Histograma și poligonul frecvenței absolute.



- în cazul variabilei aleatoare Nichel [%] rezultă următoarele: $n = 23$, $x_{\min} = 1,60\%$ și $x_{\max} = 1,78\%$, $n_g = 5$ și $\Delta = 0,036$. Mărimile calculate sunt prezentate în tab.III.9, iar histograma și poligonul frecvenței absolute în fig.III.24.

Tabelul III.9. Repartiția frecvențelor pe grupe pentru variabila aleatoare Nichel [%]

Nr. crt. <i>i</i>	Limita inferioară	Limita superioară	Caracteristica grupei	f_{ii}	f_{ri}	f_{cri}	f_{cai}
1	1,6	1,636	1,618	8	0,347826	0,347826	8
2	1,636	1,672	1,654	7	0,304348	0,652174	15
3	1,672	1,708	1,69	3	0,130435	0,782609	18
4	1,708	1,744	1,726	1	0,043478	0,826087	19
5	1,744	1,78	1,762	4	0,173913	1	23
SUMA	-	-	-	23	1,000000	-	

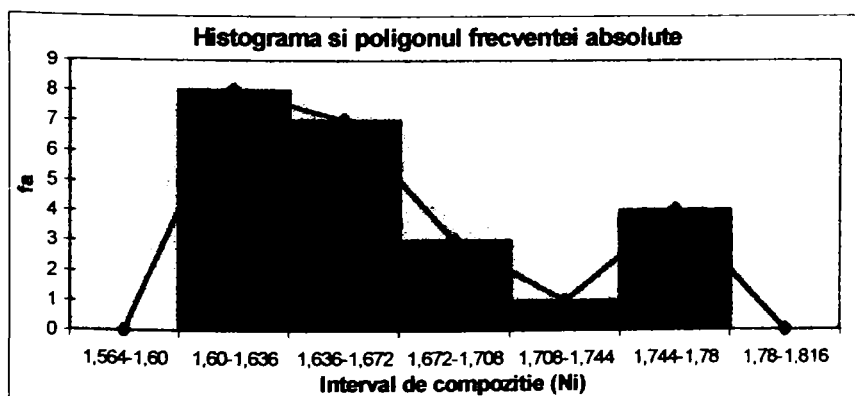


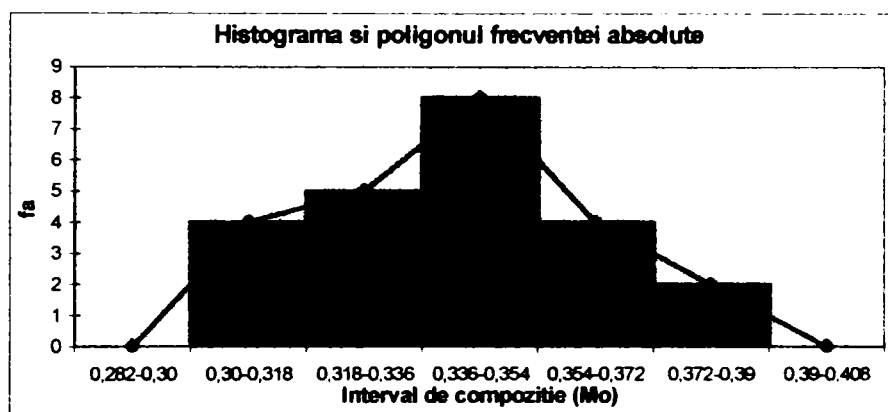
Figura III.24. Repartiția frecvenței variabilei Nichel, [%]. Histograma și poligonul frecvenței absolute.

- în cazul variabilei aleatoare **Molibden [%]** rezultă următoarele: $n = 23$, $x_{\min} = 0,30\%$ și $x_{\max} = 0,39\%$, $n_g = 5$ și $\Delta = 0,018$. Mărimile calculate sunt prezentate în tab.III.10, iar histograma și poligonul frecvenței absolute în fig.III.25

Tabelul III.10. Repartiția frecvențelor pe grupe pentru variabila aleatoare **Molibden [%]**

Nr. crt. <i>i</i>	Limita inferioară	Limita superioară	Caracteristica grupei	f_{ai}	f_{ri}	f_{ci}	f_{ci}
1	0,3	0,318	0,309	4	0,173913	0,173913	4
2	0,318	0,336	0,327	5	0,217391	0,391304	9
3	0,336	0,354	0,345	8	0,347826	0,73913	17
4	0,354	0,372	0,363	4	0,173913	0,913043	21
5	0,372	0,39	0,381	2	0,086957	1	23
SUMA	-	-	-	23	1,000000	-	-

Figura III.25. Repartiția frecvenței variabilei Molibden, [%]. Histograma și poligonul frecvenței absolute.



- în cazul variabilei aleatoare **Crom [%]** rezultă următoarele: $n = 23$, $x_{\min} = 1,00\%$ și $x_{\max} = 1,28\%$, $n_g = 5$ și $\Delta = 0,056$. Mărimile calculate sunt prezentate în tab.III.11, iar histograma și poligonul frecvenței absolute în fig.III.26.

Tabelul III.11. Repartiția frecvențelor pe grupe pentru variabila aleatoare **Crom [%]**

Nr. crt. <i>i</i>	Limita inferioară	Limita superioară	Caracteristica grupei	f_{ai}	f_{ri}	f_{ci}	f_{ci}
1	1	1,056	1,028	4	0,173913	0,173913	4
2	1,056	1,112	1,084	11	0,478261	0,652174	15
3	1,112	1,168	1,14	5	0,217391	0,869565	20
4	1,168	1,224	1,196	2	0,086957	0,956522	22
5	1,224	1,28	1,252	1	0,043478	1	23
SUMA	-	-	-	23	1,000000	-	-

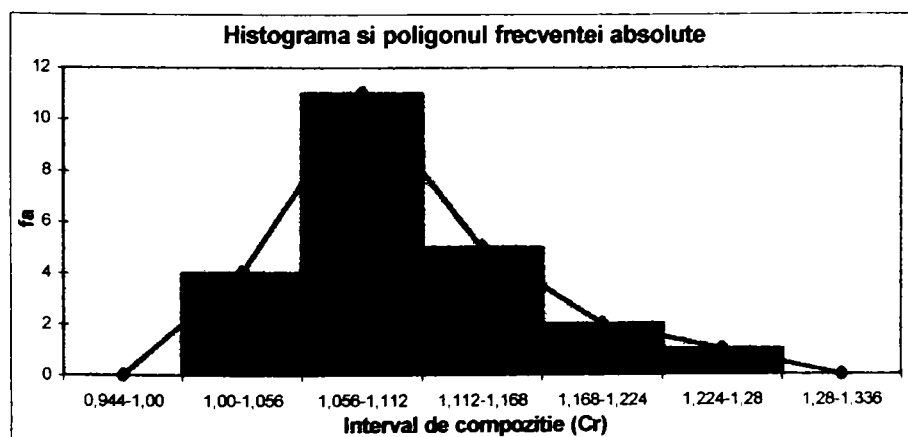


Figura III.26. Repartiția frecvenței variabilei Crom, [%]. Histograma și poligonul frecvenței absolute.

b). Calculul principalilor parametri statistici

Indicatorii de localizare și de împrăștiere statistică, calculați pentru toate variabilele aleatoare, sunt [2],[3],[15],[50]:

- **media aritmetică, m_x , a variabilei x :**

$$m_x = \sum_{i=1}^n f_n \cdot x_i \quad (\text{III.5})$$

în care:

f_n - frecvența relativă în intervalul curent i ;

x_i - valoarea variabilei în mijlocul intervalului i .

- **dispersia (pătratul abaterii standard), s_x^2 , a variabilei x :**

$$s_x^2 = \sum_{i=1}^n f_n (x_i - m_x)^2 \quad (\text{III.6})$$

- **abaterea standard (abatere medie pătratică) s_x , în raport cu media variabilei x :**

$$s_x = \sqrt{s_x^2} \quad (\text{III.7})$$

- **coeficientul de variație, V_x , al variabilei aleatoare x :**

$$V_x = \frac{s_x}{m_x} \quad \text{sau} \quad V_x \% = \frac{s_x}{m_x} 100 \quad (\text{III.8})$$

Media aritmetică și abaterea standard, măsurate în aceleași unități ca și variabila X , coeficientul de variație, adimensional sau procentual, precum și dispersia, s-au determinat pentru toate variabilele aleatoare.

Tabelul III.12. Indicatori statistici ai variabilelor aleatoare X .

Nr. crt.	Indicator statistic	Variabila aleatoare								
		C_{topire} [%]	C_{afinare} [%]	Compoziția chimică finală [%]						Temp de turnare [°C]
				C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr	
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	x_{max}	2,95	2,00	2,00	0,80	0,88	1,78	0,39	1,28	1440
2	x_{min}	1,48	1,47	1,80	0,63	0,65	1,60	0,30	1,00	1420
3	m_x	2,3973	1,8426	1,9069	0,7213	0,8039	1,6652	0,3317	1,096087	1429,565
4	s_x^2	0,4346	0,1435	0,0685	0,0480	0,0497	0,0606	0,0248	0,068606	6,199898
5	s_x	0,6592	0,3788	0,2618	0,2192	0,2229	0,2463	0,1574	0,261927	2,489959
6	V_x %	27,498	20,558	13,733	30,399	27,731	14,791	47,470	23,8965	0,174176
7	Nr. intervale	5	5	5	5	5	5	5	5	5
8	χ^2_{calc}	3,2809	3,8683	4,9955	5,9447	5,9319	4,4074	3,1466	3,3979	4,402474
9	χ^2_{tab}	5,9914	5,9914	5,9914	5,9914	5,9914	5,9914	5,9914	5,9914	5,9914
10	dacă $\chi^2_{\text{calc}} < \chi^2_{\text{tab}}$ repartiția este normală; dacă $\chi^2_{\text{calc}} > \chi^2_{\text{tab}}$ repartiția nu este normală									
11	Caracterul repartiției	normală	normală	normală	normală	normală	normală	normală	normală	normală

În fig.III.27, este prezentată foaia de calcul a programului EXCEL pentru determinarea parametrilor statistici ai variabilei aleatoare **Temperatura de turnare [°C]**.

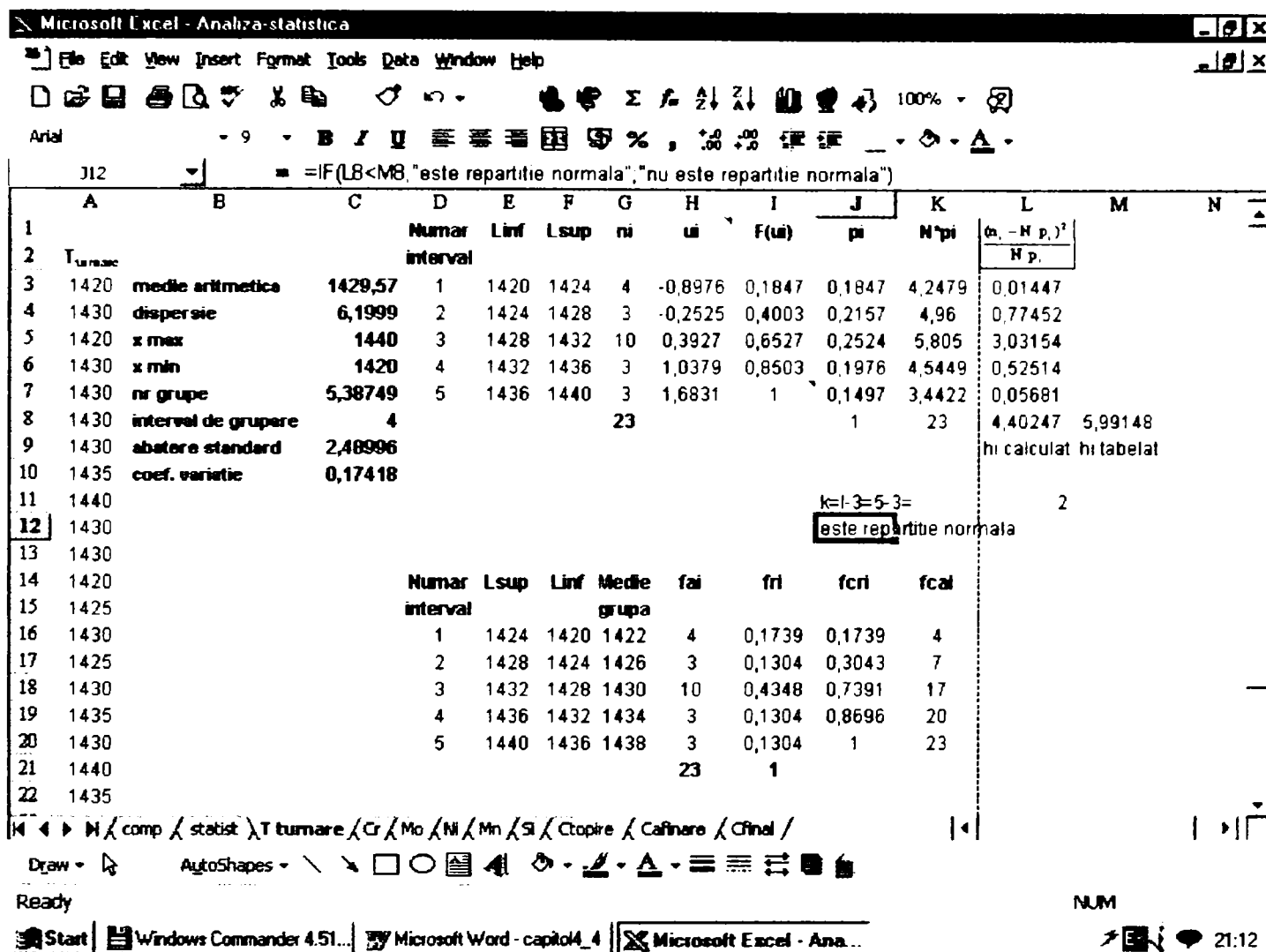


Figura III.27. Exemplificarea parametrilor statistici pentru variabila aleatoare Temperatura de turnare [°C].

c). *Verificarea caracterului repartiției experimentale* s-a efectuat pentru fiecare variabilă aleatoare X, în vederea posibilității de încadrare a repartiției experimentale (de selecție) într-o anumită clasă de repartiție teoretică.

Deoarece în urma calculării frecvențelor s-a constatat că repartiția de frecvență prezintă câte un singur maxim s-a considerat, după [17],[40], că repartiția experimentală urmează o lege de distribuție normală. Verificarea suplimentară a acestei ipoteze, bazată și pe observația conform căreia, după [2],[17],[18],[50] rezultatele obținute prin măsurători fizice sau analize chimice repetate în aceleași condiții variază în jurul unei anumite valori, s-a efectuat cu testul χ^2 (hi pătrat), definit ca:

$$\sum_{i=1}^{n_g} \frac{(f_{ai} - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i} \quad \text{cu } \nu = n_g - 2 - 1 \text{ grade de libertate} \quad \text{(III.9)}$$

valoare ce se compară cu $\chi^2_{\alpha, \nu}$.

Semnificația termenilor este:

f_{ai} - frecvențele absolute ale repartiției experimentale;

$n \cdot p_i$ - frecvențele repartiției teoretice normale, unde p_i este probabilitatea de apariție pe intervalul i .

$\chi^2_{\alpha, \nu}$ - valoarea repartiției χ^2 la un nivel de semnificație α ales și la numărul de grade de libertate ν .

Dacă $\chi^2_{calc} < \chi^2_{\alpha, \nu}$ se admite ipoteza că repartiția este o repartiție normală.

Calculule efectuate prezentate în tabelele de mai sus sunt efectuate pentru nivelul de încredere $P = 1 - \alpha = 0,95$ (sau 95%), unde α reprezintă pragul de semnificație ales. Astfel, se poate afirma cu o probabilitate de $P = 1 - \alpha$, adică de 95%, că datele studiate prezintă o distribuție normală.

Încadrarea datelor înregistrate într-o repartiție normală înseamnă că, din punct de vedere practic, chiar dacă pe parcursul elaborării și turnării au fost înregistrate variații în limite destul de largi, acestea au o influență nesemnificativă și se poate spune, cu o probabilitate de 95%, că procesul de elaborare a decurs corespunzător.

III.2.1.2. Analiza tehnologiei de tratament termic aplicat cilindrilor de laminare

Obținerea unor structuri corespunzătoare la suprafața tăbliei, în cazul cilindrilor cu tăblie netedă, nu constituie o problemă deosebită, dar obținerea unor structuri omogene și caracteristici uniforme pe o adâncime mai mare de 60...70mm de la suprafața tăbliei constituie principala problemă de fabricație a cilindrilor pentru profile. Această problemă este cu atât mai greu de rezolvat cu cât adâncimea calibrelor este mai mare.

Scopul aplicării tratamentelor termice în cazul cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid are caracter multiplu, respectiv [6],[67],[70], [96]:

- eliminarea tensiunilor interne, care au valori foarte mari;
- scăderea durtății obținută la turnare, până la valori cuprinse în intervalul 280...300HB, în vederea creșterea prelucrabilității prin așchiere;
- corectarea structurii primare, prin distrugerea rețelei de cementită, creșterea numărului de grăunți de perlită și a gradului ei de finețe, în vederea asigurării valorilor proprietăților mecanice impuse și, în mod deosebit, creșterea durtății crustei cilindrilor (nu numai în stratul superficial ci și în adâncime), la valori de 380..420HB.

În urma studiilor efectuate de-a lungul perioadei elaborării lucrării de față, atât din practica industrială, cât și din literatura de specialitate, se pot face o serie de precizări legat de tratamentele termice aplicate cilindrilor de laminare turnați din oțel, tip Adamit.

Astfel, se poate preciza faptul că structura, în stare turnată (fig.III.28), poate să fie foarte diferită din punct de vedere al proporției de cementită secundară și al formei și repartizării acesteia în jurul grăunților de perlită [70]. Astfel, cu creșterea conținutului de carbon se mărește cantitatea de cementită liberă care se repartizează sub formă de rețea în jurul grăunților de perlită cu grosimi din ce în ce mai mari. La viteze mari de răcire, separările de cementită secundară se repartizează sub formă de ace în masa de perlită, obținându-se astfel structura Widmanstätten (acele de cementită secundară au tendința de tensionare a structurii, ceea ce duce la fragilizarea oțelului). Distrugerea continuității rețelei de cementită sau chiar obținerii sferoidizării, se poate face prin tratament termic. Tot prin tratament termic se poate mări gradul de dispersie a perlitei și obține globulizarea cementitei [70].

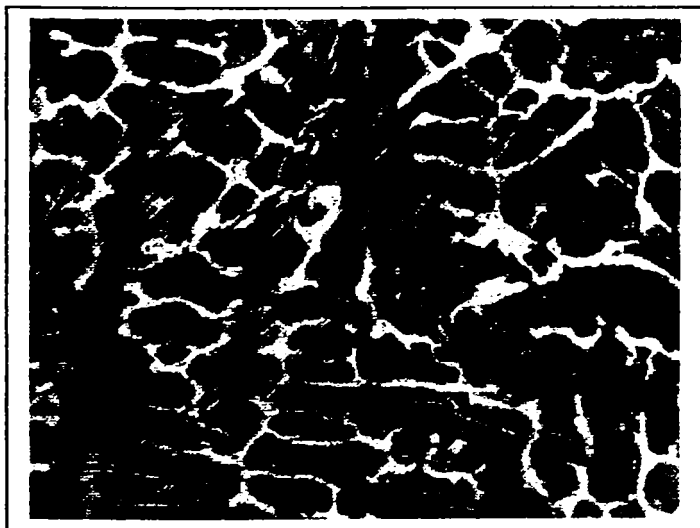


Figura III.28. Microstructura crustei cilindului (în stare turnată), atac nital 2%, mărirea 100:1

Duritatea mare obținută la turnare (aprox.370..400HB) și structura necorespunzătoare a cilindrilor, induce obligativitatea aplicării tratamentelor termice. Diagramele de tratament termic (primar și secundar) care se aplică în prezent la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara au fost prezentate în cap.I, paragraful 3.2.6.

În urma aplicării tratamentului termic primar, are loc: scăderea durității (la valori cuprinse în intervalul 250...290 HB pe tăblie și 250...280HB pe fusuri), în vederea efectuării operației de prelucrare prin așchiere pentru eboșare; omogenizarea compoziției chimice; distrugerea rețelei de carburi și globulizarea lor (fig.III.29).

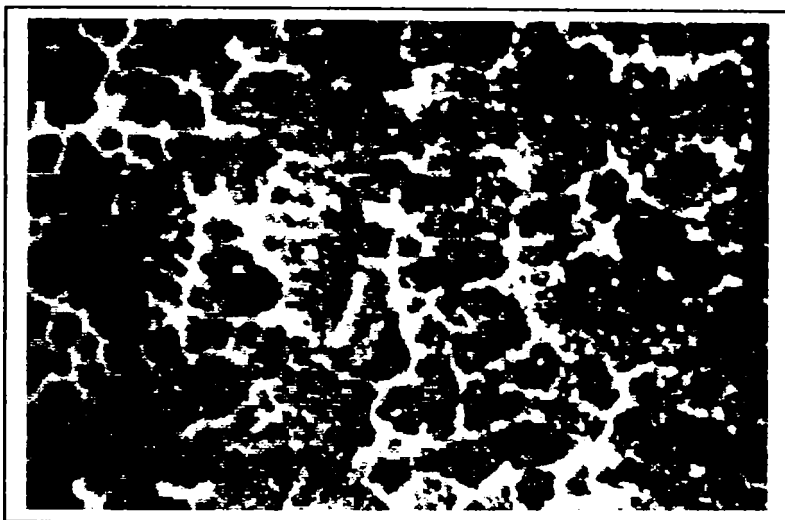


Figura III.29. Microstructura oțelului Adamit, după tratamentul termic primar (cementită sub formă de rețea + carburi de globulizare); atac nital 2%, mărirea 100:1

După efectuarea tratamentului termic primar și eboșarea cilindrilor se execută tratamentul termic secundar, pentru asigurarea pe tăblia cilindului a proprietățile fizico-mecanice cerute de procesul de laminare, în special, creșterea durității acesteia [67].

Pentru eliminarea efectelor decarburării suprafeței cilindrilor, precum și pentru creșterea durității numai pe tăblie, în cursul tratamentului termic se vor utiliza vopsele și dispozitive de protecție. Astfel, ținând cont de faptul că, în urma tratamentului termic secundar, doar duritatea tăbliei trebuie să crească, fusurile trebuie protejate, prin îmbrăcarea lor cu manșoane de tablă [4],[67].

Microstructura tăbliei (fig.III.30), după aplicarea tratamentului termic secundar, este formată din masă metalică de bază bainitico-martensitică, insule de carburi și rare incluziuni fine de grafit.

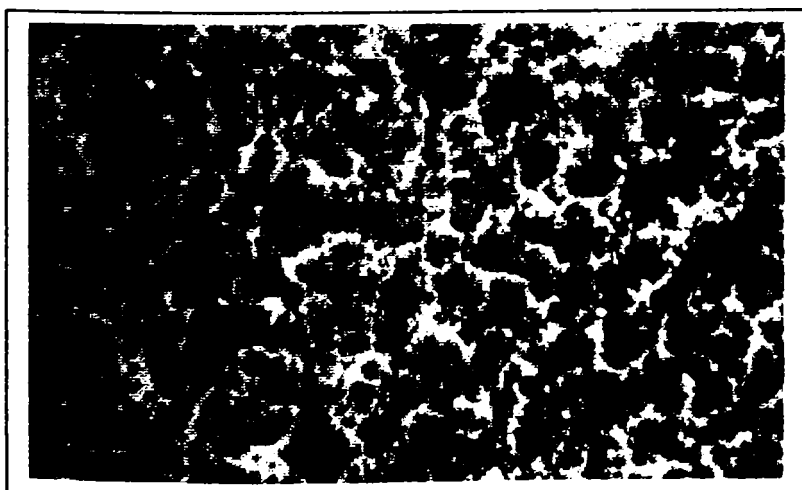


Figura III.30. Microstructura oțelului Adamit, după tratamentul termic secundar; atac nital2%, mărirea 100:1

Tratamentul termic aplicat cilindrilor de laminare turnați din oțel la S.C. Siderurgia S.A. Hunedoara a constituit și va constitui o problemă permanentă, fapt pentru care acest domeniu reprezintă, în sine, o direcție de cercetare științifică [4].

III.2.1.3. Influența tehnologiei de fabricație asupra defectelor înregistrate și a fenomenului de uzare

Primul pas în obținerea unor cilindri de laminare corespunzători din punct de vedere calitativ este respectarea cu strictețe a tehnologiei de fabricație a acestora. Astfel, ținându-se cont de tehnologia de turnare a cilindrilor de laminare, precum și de situațiile înregistrate în practica industrială, se poate menționa faptul că cele mai întâlnite defecte care conduc la rebutarea cilindrilor sunt:

- *goluri de natură gazoasă (pori)* - reprezintă bule de gaz încorporate în aliajul turnat; conform literaturii de specialitate, ponderea acestui defect este de 25% [6];
- *fisuri sau crăpături*, datorate contracției sau utilizării, la formare, a unor utilaje și echipamente necorespunzătoare, ponderea acestui defect fiind de aprox. 20% din totalul rebutului în turnătorie [6].

În urma studiilor efectuate de-a lungul elaborării lucrării de față, la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara s-au înregistrat o serie de astfel de defecte pentru cilindri turnați. În fig.III.31, este prezentat cilindru nr. 0950, turnat din șarja cu nr. 03736, care reprezintă un rebut datorită faptului că, pe suprafața tăbliei, acesta prezintă o fisură longitudinală. Cauza apariției acestui defect este folosirea unei cochile necorespunzătoare (care prezintă fisură). Datorită faptului că, la turnarea cilindrilor 0953/03739, a fost folosită aceeași cochilă ca și la cilindru nr.0950, pe tăblia acestuia s-a înregistrat același tip de defect.



Figura III.31. Cilindru de laminare nr.0950/03736, ce prezintă fisură longitudinală (rebut înregistrat la turnare).

Tot o fisură longitudinală, situată pe suprafața tăbliei, (fig. III.32) este înregistrată și în cazul cilindrilor 0963/03745.

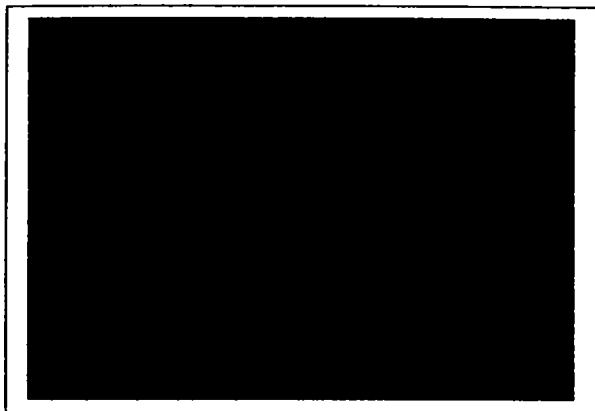


Figura III.32. Cilindru de laminare nr. 0963/03745, ce prezintă fisură longitudinală.



- *adâncimea prea mare sau insuficientă a crustei cilindrului* - reprezintă rebutul datorat adâncimii necorespunzătoare a durității crustei, ceea ce duce la scăderea rezistenței la uzare; ponderea acestui defect este de aprox. 10% din totalul rebutului în turnătorie (duritatea reprezintă un parametru de bază ce permite aprecierea rezistenței la uzare;
- *incluziuni și aderențe* - reprezintă defectele care apar pe cilindri în urma realizării neglijente a formelor, insuficienței curățirii de resturile de amestec de formare în timpul montării formei, turnării la o temperatură prea scăzută, precum și în cazul unor viteze de umplere insuficiente a formei; în fig III.33, III.34 sunt prezentate tipuri de aderențe apărute în zona dintre fusul inferior și tăblie și în zona fusului superior.

Aderențele apar, în principal, din cauza: utilizării amestecurilor de formare necorespunzătoare; aliajului dezoxidat insuficient; utilizării unor vopsele refractare necorespunzătoare; temperaturii de turnare prea ridicate; rețea de turnare (alimentare) necorespunzătoare etc.



Figura III.33. Cilindru turnat, care prezintă aderență (în zona dintre fusul inferior și tăblie).

Figura III.349. Cilindru turnat, care prezintă aderență (în zona fusului superior).



- *retasuri și porozități* - reprezintă defecte care apar la solidificare;
- *compoziția chimică necorespunzătoare* - reprezintă un defect care, datorită nerespectării compoziției chimice prevăzute în standard duce, iremediabil, la rebutarea cilindrilor;
- *defecte de structură* - reprezintă defectele care apar, de cele mai multe ori, datorită încărcăturii necorespunzătoare a cuptorului, turnării, răcirii și tratamentelor termice necorespunzătoare etc.

Tot la categoria defecte de structură este catalogat și defectul numit "pete dure", apărut datorită reducerii temperaturii de turnare ("petele dure" sunt zone cu proporție mult mai mare de cementită și ledeburită, apărute pe fondul unor aglomerări de incluziuni nemetalice, care favorizează stabilitatea carburilor [96]). Acest defect, înregistrat la mai mulți cilindri (0453/02846, 0470/020900, 0477/02963) este prezentat în fig.III.35.

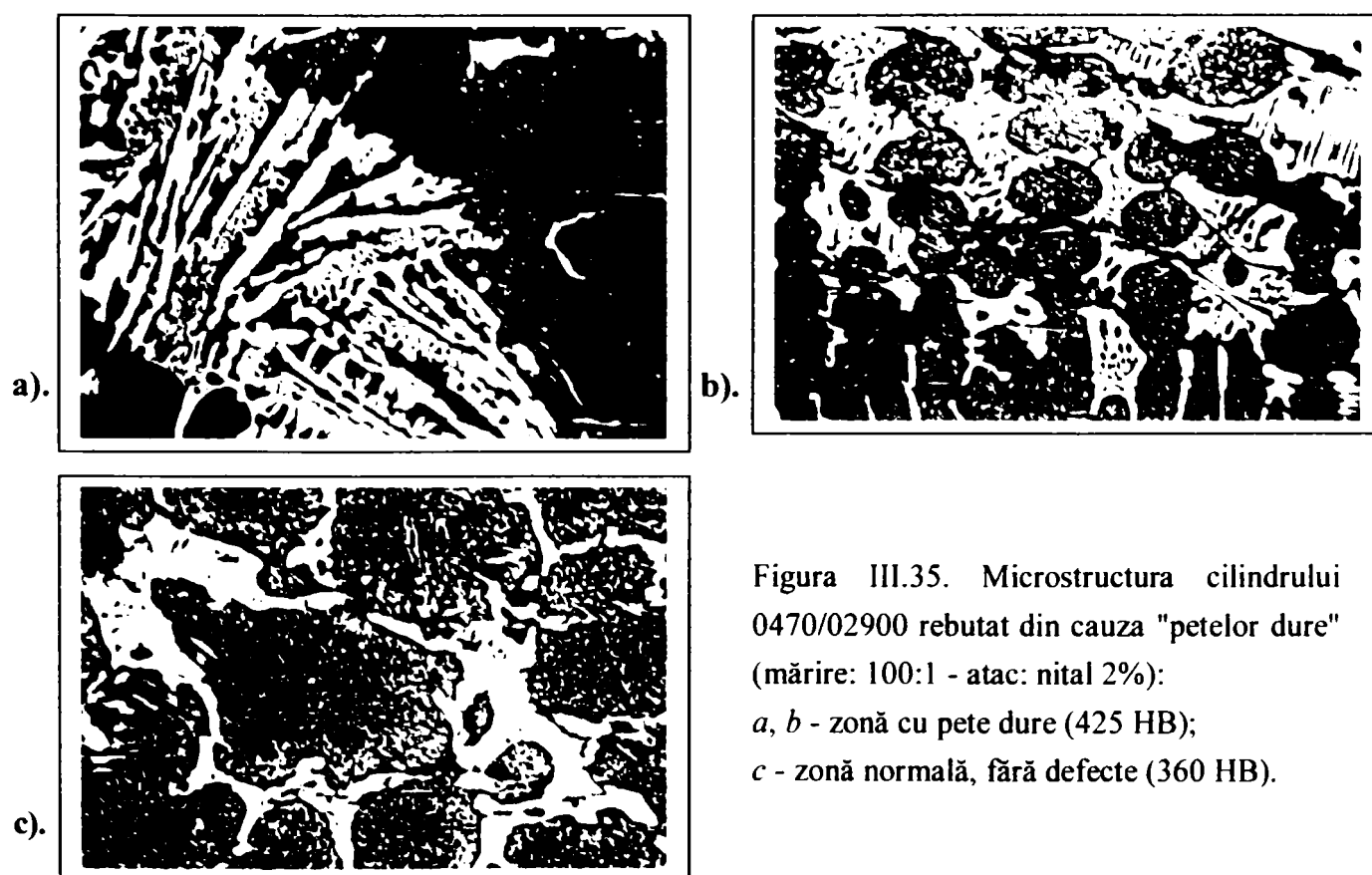


Figura III.35. Microstructura cilindrului 0470/02900 rebutat din cauza "petelor dure" (mărire: 100:1 - atac: nital 2%):
a, b - zonă cu pete dure (425 HB);
c - zonă normală, fără defecte (360 HB).

În fig.III.36, este prezentată microstructura cilindului 0549, după tratamentul termic primar, în care se observă neomogenitatea structurală, respectiv zone cu structuri diferite (rețea de cementită, insule de cementită, ace de cementită și perlită).

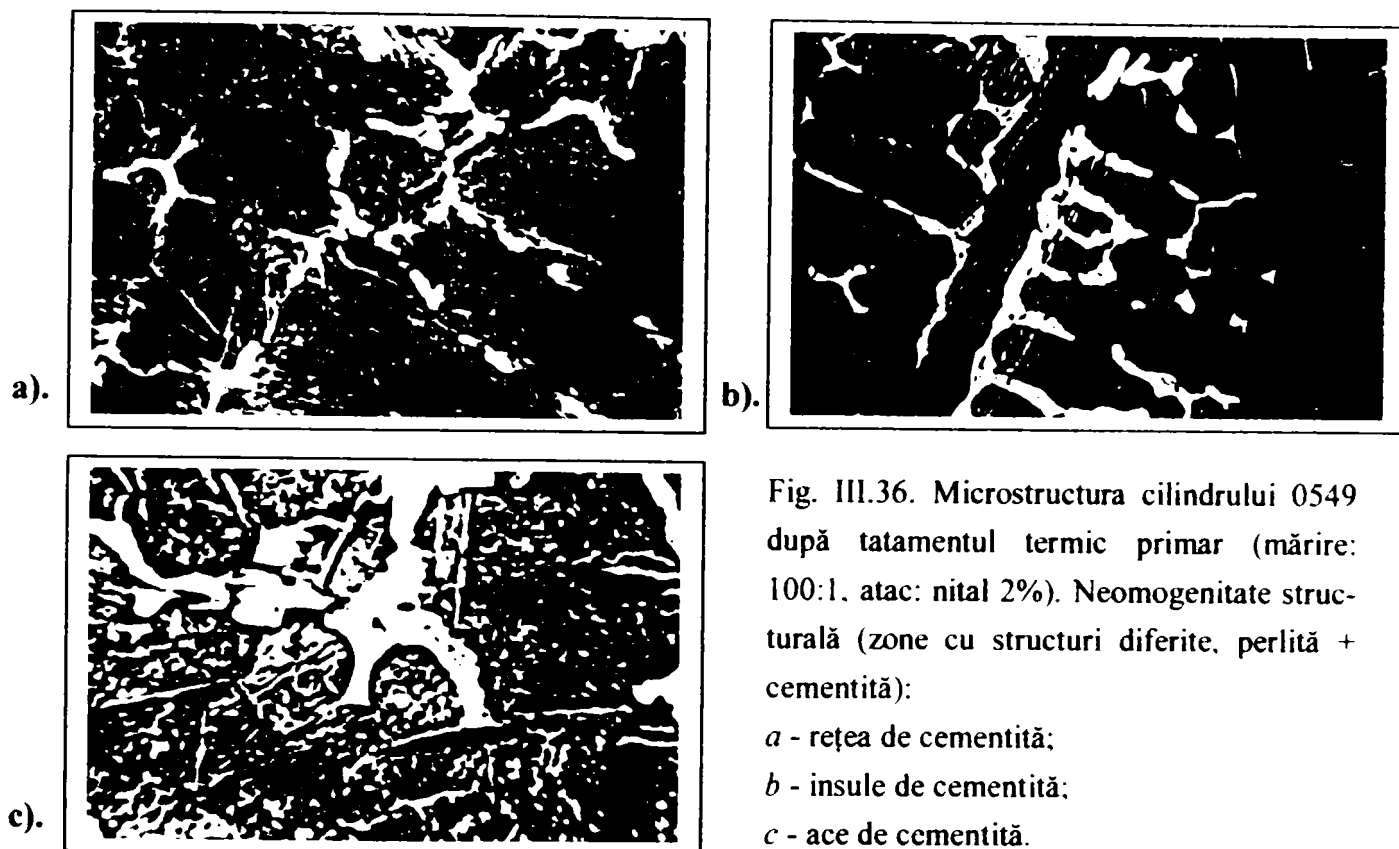


Fig. III.36. Microstructura cilindului 0549 după tratamentul termic primar (mărire: 100:1, atac: nital 2%). Neomogenitate structurală (zone cu structuri diferite, perlită + cementită):

a - rețea de cementită;

b - insule de cementită;

c - ace de cementită.

- *dimensiuni necorespunzătoare* - reprezintă un defect care apare datorită formei, ca rezultat a unei tehnologii de formare necorespunzătoare sau montării greșite a formei.

Din cei 92 cilindri turnați din 23 șarje elaborate (tab.III.1), 12 buc au prezentat defecte, care au dus la rebutarea acestora, ceea ce reprezintă un procent de 13,046%.

Situația cilindrilor de laminor din oțel Adamit rebuțați în perioada 01.01 - 03.06.2001 la S.C. "Siderurgica" S.A. Hunedoara este prezentată în tab. III.13 [13].

Tabelul III.13. Situația cilindrilor de laminor din oțel Adamit rebuțați în perioada 01.01 - 03.06.2001, la S.C. "Siderurgica" S.A. Hunedoara

Nr. cilindru/ Nr. șarjă	Dimensiuni [mm]	Masa [t]	Cauza rebutării
0536/03156	φ450 x 900	1,6	Pori pe suprafața tăbliei
0546/03167	φ450 x 900	1,6	Pori pe suprafața tăbliei
0560/03183	φ460 x 900	1,70	Rupt la dezbatere
0567/03198	φ450 x 1130	1,94	Fisuri în zona de racordare fus-tăblie
0578/03207	φ540 x 900	2,15	Fisuri pe suprafața tăbliei
0586/03219	φ550 x 900	2,25	Fisuri pe suprafața tăbliei
0594/03228	φ570 x 900	2,35	"Pete" dure
0600/03261	φ540 x 900	2,15	"Pete" dure
0602/03261	φ540 x 900	2,15	"Pete" dure
0605/03266	φ450 x 1130	1,94	Fisuri în zona de racordare fus-tăblie
0610/03271	φ450 x 900	1,60	Fisuri pe suprafața tăbliei
0613/03274	φ450 x 900	1,60	Crăpături longitudinale
TOTAL 2001 (6 luni) 12 buc = 23,03 t			

Din analiza situației cilindrilor rebutați (tab.III.13), rezultă că procentul de rebut, înregistrat la turnarea cilindrilor din oțel tip Adamit în primele șase luni ale anului 2001, este 13,04%.

Ponderea defectelor înregistrate în perioada în care s-au făcut experimentările este prezentată în fig.III.37.

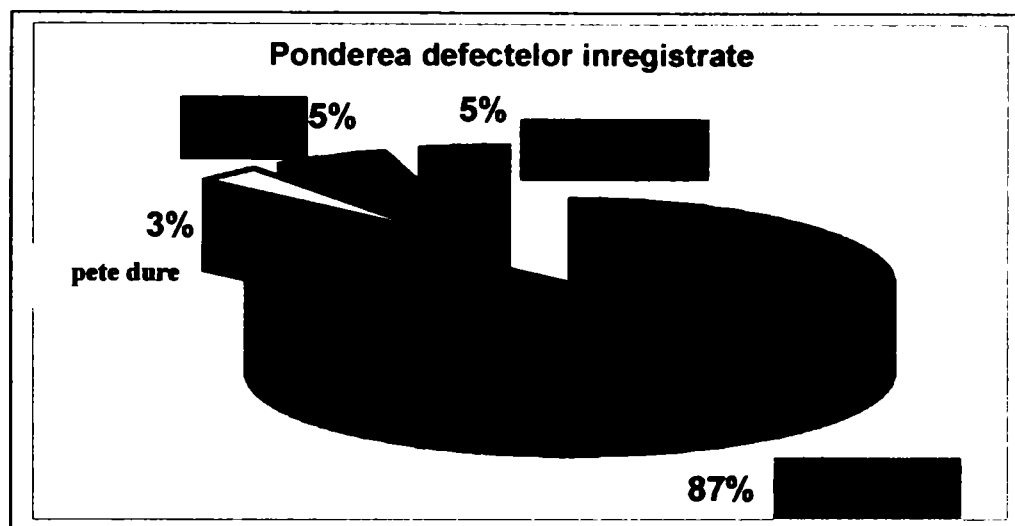


Figura III.37. Ponderea defectelor înregistrate.

Preîntâmpinarea apariției deficiențelor prezentate în cadrul acestui capitol, se poate face numai pe calea respectării tehnologiei de elaborare-formare-turnare-tratament-termic, precum și printr-o bună disciplină tehnologică.

În vederea reducerii sau chiar eliminării acestor deficiențe înregistrate în practica de producție se propun următoarele măsuri:

- interzicerea barbotării la temperaturi mai mici de 1450°C;
- temperatura de turnare trebuie să fie cuprinsă în intervalul 1430...1440°C, deoarece temperatura de turnare de 1420...1430°C care se practică în prezent la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara este prea scăzută, rezultând defecte de structură;
- pentru eliminarea porilor este obligatorie uscarea corespunzătoare a formelor;
- pentru evitarea apariției crăpăturilor la rece este indicată dezbaterea formelor la temperaturi mai mici de 150°C.

III.2.2. Influența condițiilor din exploatare asupra durabilității cilindrilor de laminare

Din cei 92 cilindri prezentați în tab. III.1, în exploatare au fost urmăriți și analizați un număr de 29 buc., deoarece aceștia și-au îndeplinit campaniile de laminare. Datorită faptului că au fost scoși din uz, pentru aceștia se cunosc, date privind comportarea și durabilitățile înregistrate în exploatare. Caracteristicile celor 29 cilindri (compoziție chimică, duritate, durabilitate în exploatare) sunt prezentate în tab. III.14.

III.2.2.1. Prelucrarea statistico-matematică a datelor analizate

Cu ajutorul datelor prezentate în tab. III.14. și cu ajutorul programului de calcul MATLAB, a fost efectuat un calcul statistico-matematic, în vederea analizei influenței compoziției chimice asupra durității cilindrilor de laminare, cu efect asupra durabilității în exploatare. MATLAB (MATrix LABoratory) este un pachet de programe de înaltă performanță, dedicat calculului numeric și reprezentărilor grafice [24]. Performanțele deosebite și timpul de instruire redus fac din acest pachet de programe unul din cele mai agreate "medii" de lucru pentru o mare diversitate de utilizatori.

Pentru cei 29 cilindri, în vederea efectuării calculului statistico-matematic, s-au luat în studiu compozițiile chimice și duritățile acestora. Corelațiile obținute, în urma rulării programului de calcul, sunt prezentate, în continuare, atât sub formă analitică cât și sub formă grafică. Reprezentările grafice sunt suprafețe care prezintă un punct staționar, fie punct extrem (de maxim sau de minim), fie punct șea, coordonatele acestora situându-se, uneori, în limitele tehnologice de variație pentru parametrii independenți, respectiv în limitele prevăzute de standarde pentru parametrul dependent, iar uneori destul de departe de limitele tehnologice, sau chiar în domeniul în care valorile parametrilor nu au sens tehnologic [24].

a). Variația durității cu conținuturile de C, Mn și Si, respectiv $HB=HB(C,Mn,Si)$ pentru cilindri luați în studiu.

Pentru aceasta programul de calcul determină valorile medii și abaterile medii pătratice ale variabilelor, respectiv:

	Valoare medie [%]	Abatere medie pătratică
C	1,8828	0,068526
Si	0,69069	0,082459
Mn	0,81724	0,043063
Duritate [HB]	382,17	19,508

În continuare, se prezintă rezultatele prelucrării multidimensionale a datelor experimentale. În acest scop, s-a căutat o modelare a variabilei dependente u funcție de variabilele independente x, y, z de forma:

$$u = c_1 \cdot x^2 + c_2 \cdot y^2 + c_3 \cdot z^2 + c_4 \cdot x \cdot y + c_5 \cdot y \cdot z + c_6 \cdot z \cdot x + c_7 \cdot x + c_8 \cdot y + c_9 \cdot z + c_{10} \quad (\text{III.10})$$

Ecuția modelării efectuate pe un eșantion de 29 de cilindri este:

$$HB = -249,9905 \cdot C^2 - 968,5799 \cdot Si^2 + 1,2254 \cdot Mn^2 + 1310,0881 \cdot C \cdot Si - 305,8805 \cdot Si \cdot Mn + 169,9657 \cdot Mn \cdot C + 121,6014 \cdot C - 955,5616 \cdot Si - 58,6473 \cdot Mn + 420,7182 \quad (\text{III.11})$$

Tabelul III. 14. Analiza cilindrilor de laminare urmăriți în exploatare.

Nr. crt.	Număr cilindru	Compoziția chimică [%]											Duritate* [HB]	T _{turnare} [°C]	Durabilitate [t/mm]
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti					
1	0574	1,92	0,85	0,70	0,010	0,025	1,16	1,67	0,34	-	-	395	1425	70	
2	0548	1,90	0,80	0,79	0,010	0,020	1,07	1,78	0,31	-	-	378	1430	50	
3	0549	1,90	0,80	0,79	0,010	0,020	1,07	1,78	0,31	-	-	380	1430	53	
4	0550	1,90	0,80	0,79	0,010	0,020	1,07	1,78	0,31	-	-	383	1430	64	
5	0551	1,90	0,80	0,79	0,010	0,020	1,07	1,78	0,31	-	-	389	1430	65	
6	0552	1,85	0,83	0,72	0,010	0,027	1,08	1,60	0,30	-	-	389	1435	65	
7	0553	1,85	0,83	0,72	0,010	0,027	1,08	1,60	0,30	-	-	384	1435	49	
8	0554	1,85	0,83	0,72	0,010	0,027	1,08	1,60	0,30	-	-	375	1435	49	
9	0525	1,82	0,83	0,75	0,012	0,035	1,06	1,77	0,33	-	-	373	1420	66	
10	0530	1,88	0,82	0,65	0,010	0,018	1,08	1,65	0,33	-	-	381	1430	58	
11	0537	2,00	0,87	0,75	0,008	0,028	1,28	1,73	0,39	-	-	408	1430	54	
12	0539	2,00	0,87	0,75	0,008	0,028	1,28	1,73	0,39	-	-	412	1430	69	
13	0540	1,98	0,80	0,72	0,010	0,030	1,05	1,62	0,35	-	-	400	1430	68	
14	0546	1,92	0,85	0,70	0,010	0,025	1,16	1,67	0,34	-	-	392	1430	60	
15	0553	1,85	0,83	0,72	0,010	0,027	1,08	1,60	0,30	-	-	378	1435	53	
16	0592	1,80	0,77	0,72	0,010	0,020	1,01	1,62	0,31	-	-	368	1430	49	
17	0607	1,82	0,84	0,63	0,010	0,028	1,10	1,66	0,35	-	-	370	1420	59	
18	0556	1,95	0,84	0,60	0,010	0,028	1,15	1,65	0,42	0,050	0,050	398	1440	61	
19	0555	1,85	0,80	0,70	0,015	0,030	1,10	1,64	0,30	0,040	0,040	380	1435	50	
20	0535	2,03	0,90	0,65	0,020	0,025	1,30	1,62	0,40	0,060	0,060	420	1420	66	
21	0564	1,90	0,90	0,76	0,010	0,022	1,16	1,70	0,30	0,055	0,055	383	1430	52	
22	0560	1,74	0,76	0,48	0,012	0,026	1,04	1,85	0,26	-	-	360	1435	62	
23	0580	1,80	0,78	0,60	0,014	0,020	1,04	1,65	0,33	-	-	368	1425	63	
24	0527	1,84	0,80	0,78	0,010	0,033	1,12	1,74	0,31	-	-	310	1420	42	
25	0559	1,94	0,75	0,67	0,015	0,028	1,10	1,70	0,32	0,060	0,060	396	1440	49	
26	0526	1,82	0,84	0,53	0,013	0,025	1,10	1,73	0,34	0,060	0,060	374	1420	67	
27	0524	1,82	0,70	0,60	0,008	0,032	1,00	1,55	0,26	0,030	0,030	369	1420	67	
28	0528	1,95	0,77	0,72	0,010	0,026	1,12	1,18	0,33	-	-	396	1440	68	
29	0605	1,82	0,84	0,53	0,013	0,025	1,10	1,73	0,34	0,040	0,040	374	1420	68	

* duritatea, pe fusuri, s-a încadrat, pentru toți cilindrii studiați, în intervalul 280...320HB

coeficientul de corelație are valoarea $r_f = 0,83543104870423$ iar abaterea de la suprafața de regresie este $s_f = 10.72142591019631$.

Această suprafață din spațiul cu patru dimensiuni admite un punct șea de coordonate:

$$C_s = 1,2739$$

$$Si_s = 0,50898$$

$$Mn_s = 0,89127$$

$$HB_s = 281,127$$

Existența acestui punct în interiorul domeniului tehnologic are o importanță deosebită deoarece asigură o stabilitate a procesului în vecinătatea acestui punct, stabilitate fie preferată, fie de evitat [24]. În acest caz, acest punct este de evitat, deoarece conținutul de carbon este $C_s = 1,2739\%$, valoare care nu aparține intervalului de compoziție prescris de standarde. Aceeași situație se înregistrează și pentru Mn și pentru Si, iar duritatea în acest punct HB_s are o valoare prea mică ($HB = 281,127$).

Comportamentul hipersuprafețelor de regresie în vecinătatea punctului șea se poate studia doar tabelar și anume atribuind valorilor independente valori pe sfere concentrice punctului studiat [24].

Deoarece această hipersuprafață nu poate fi reprezentată în spațiul cu 4 dimensiuni, s-a recurs la înlocuirea, succesiv, a câte unei variabile independente cu valoarea ei medie. În acest mod, s-au obținut suprafețele prezentate în fig. III.38, III.40, III.42. Pentru o analiză mai corectă s-au reprezentat, în fig. III.39, III.41, III.43, curbele de nivel corespunzătoare suprafețelor respective. Acestea s-au obținut prin intersecția suprafețelor de corelație cu plane paralele cu planul orizontal (plane de nivel). Astfel, aceste noi suprafețe obținute, care aparțin spațiului cu 3 dimensiuni, pot fi reprezentate și interpretate de tehnologi.

Legat de cilindrii de laminare turnați din oțel hipereutectoid, tip Adomit, literatura de specialitate indică următoarele [6],[87],[96],[121]:

- **conținutul de carbon ($C = 1,8...2,0\%$)** este principalul element care determină structura masei metalice de bază, cantitatea de cementită liberă, rezistența și duritatea crustei cilindrilor turnați;
- **conținutul de siliciu ($Si = 0,6...0,8\%$)** se găsește în limitele care asigură o dezoxidare completă a oțelului;
- **manganul ($0,70...0,90\%$)** joacă rol de dezoxidant, contribuind la creșterea, într-o oarecare măsură, a rezistenței cilindrilor pe baza alierii feritei.

În fig. III.38 este prezentată variația $HB = HB(C_{med}, Si, Mn)$ (menținându-se valoarea medie a conținutului de carbon, a fost trasată variația durității în funcție de conținuturile de siliciu și mangan), iar ecuația hipersuprafeței de regresie are forma:

$$HB_{C_{med}} = -968,5799 \cdot Si^2 + 1,2254 \cdot Mn^2 - 305,8805 \cdot Si \cdot Mn + 1511,018 \cdot Si + 261,3571 \cdot Mn - 236,4973$$

(III.12)

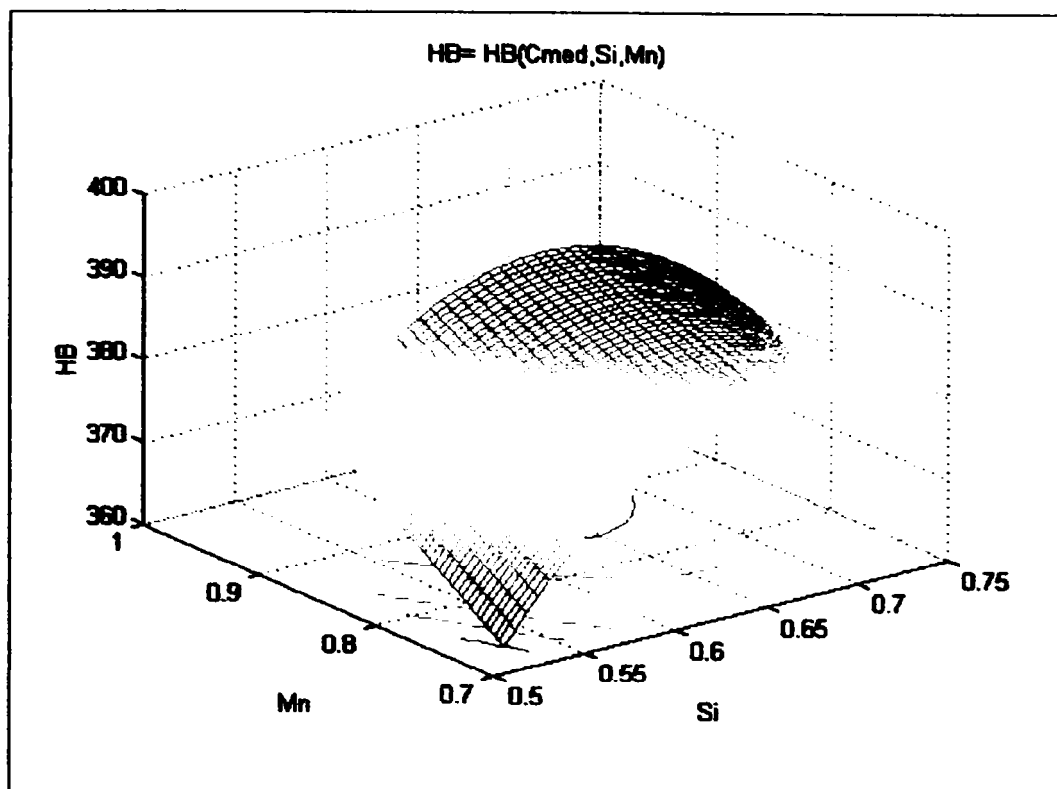


Figura III.38. Suprafața $HB = HB(C_{med}, Si, Mn)$

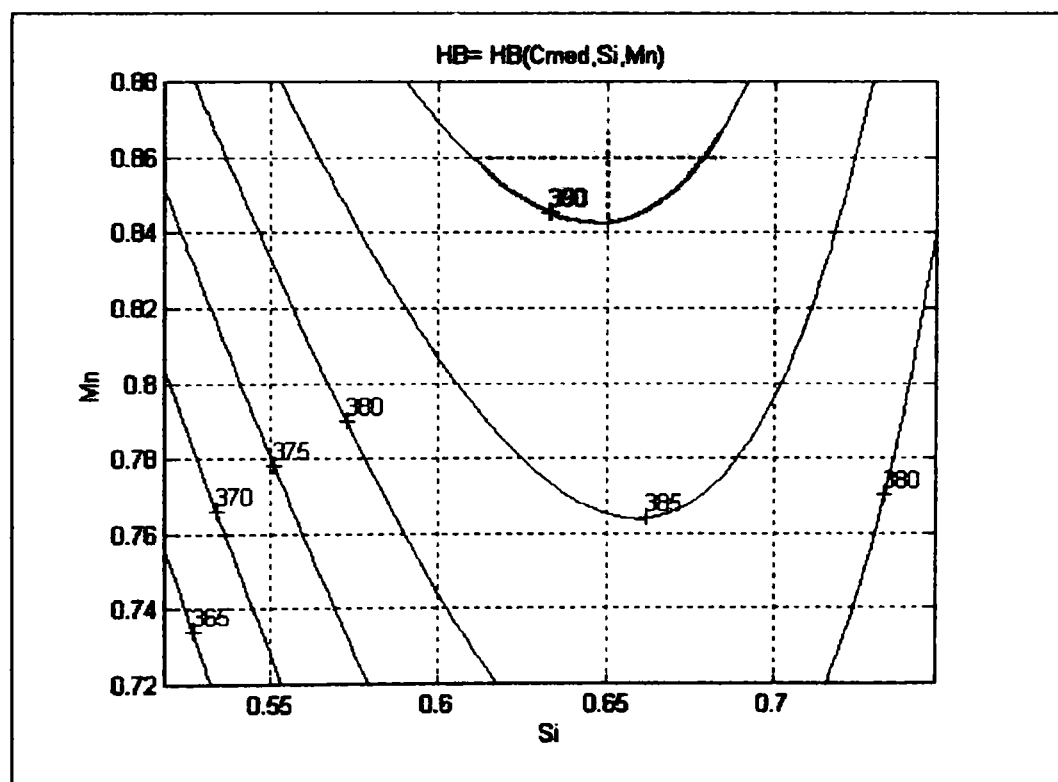


Figura III.39. Curbele de nivel ale variației $HB = HB(C_{med}, Si, Mn)$

Ținându-se cont de influența elementelor C, Mn, Si asupra durității cilindrilor turnați din oțel și, în urma analizei fig.III.38, III.39, se poate preciza că, la același conținut de carbon, indiferent de conținutul de siliciu, creșterea manganului duce la creșterea durității. Din analiza fig.III.38 se poate trage concluzia că, pentru o valoare medie a carbonului și o valoare optimă a siliciului, considerată ca fiind cuprinsă în intervalul, $Si_{optim} = 0,62...0,67\%$, duritatea se obține maximă (390HB) pentru un conținut de mangan, cuprins în intervalul $Mn_{optim} = 0,842$ și $0,864\%$.

În fig.III.40 este prezentată suprafața de regresie a variației $HB = HB(C, Si_{med}, Mn)$, a cărei ecuație are forma:

$$HB_{Si_{med}} = 1,2254 \cdot Mn^2 - 249,9905 \cdot C^2 + 169,9657 \cdot Mn \cdot C - 269,9158 \cdot Mn + 1026,4656 \cdot C - 701,3415, \quad (III.13)$$

iar în fig.III.41 se prezintă curbele de nivel ale variației respective.

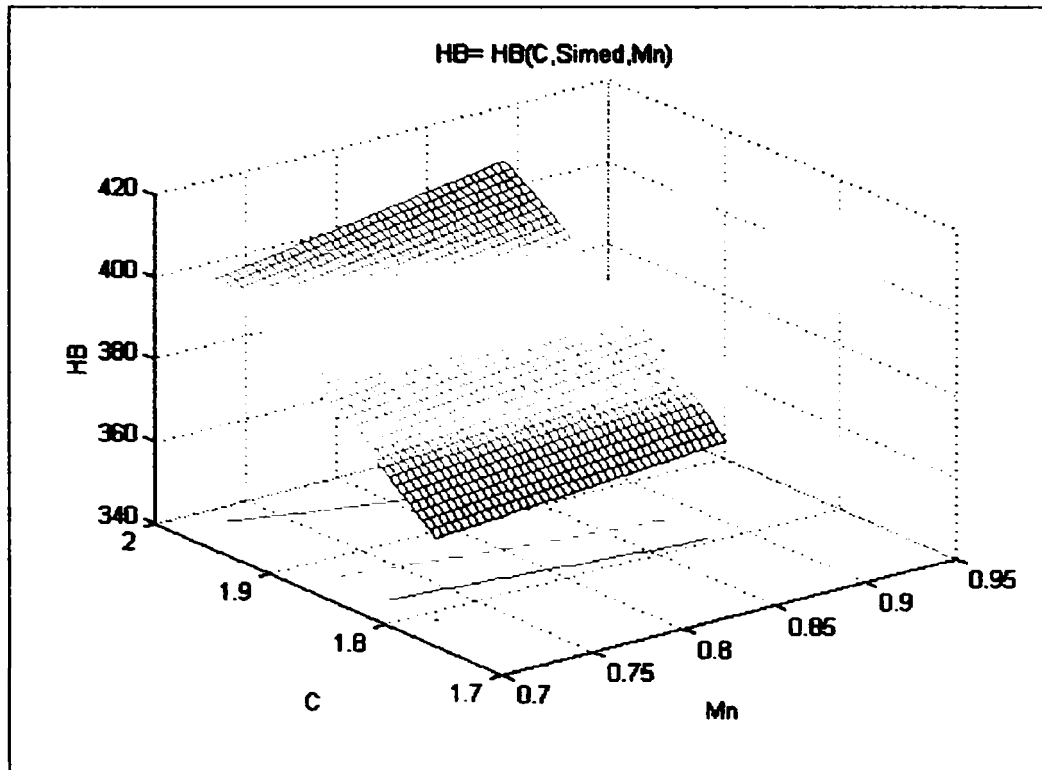


Figura III.40 Suprafața $HB = HB(C, Si_{med}, Mn)$

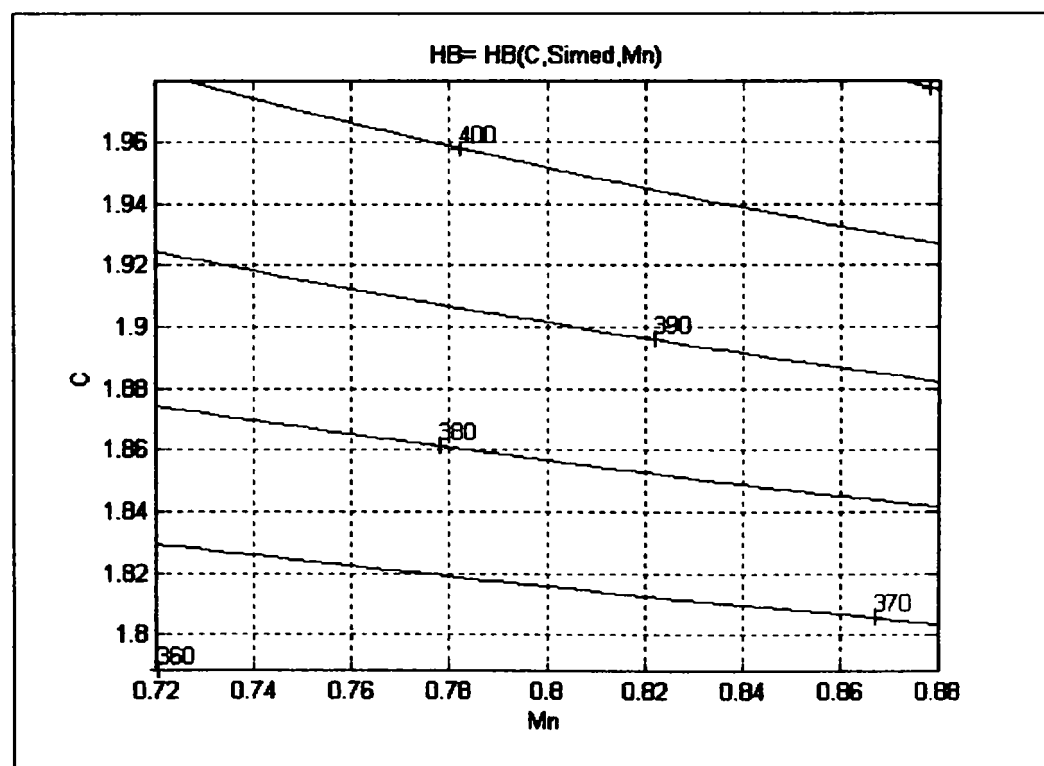


Figura III.41. Curbele de nivel ale variației $HB = HB(C, Si_{med}, Mn)$

Dacă se analizează cele două reprezentări se poate spune că, pentru același conținut de siliciu, creșterea carbonului și manganului duc la creșterea durității. Astfel, conform graficelor, rezultă:

- pentru limita minimă a manganului ($Mn = 0,7\%$) se poate asigura o duritate maximă (de 400HB), pentru un conținut al carbonului de 2%;
- pentru limita minimă a carbonului ($C = 1,8\%$) se atinge o duritate maximă de 370HB, pentru un conținut de mangan de aprox.0,89%.

În aceste condiții se poate spune că procentul de carbon trebuie să fie spre limita superioară iar cel de mangan spre limita inferioară.

Din raportul variațiilor $\frac{\Delta C}{\Delta Mn} = \frac{1,927 - 1,882}{0,89 - 0,72} = \frac{0,045}{0,17} \cong 0,3 = \frac{1}{3}$, rezultă $3 \cdot \Delta C = 1 \cdot \Delta Mn$,

adică 0,1% C se se poate înlocui cu 0,3%Mn pentru o duritate constantă.

Figurile III.42, III.43 prezintă graficele variației $HB = HB(C, Si, Mn_{med})$.

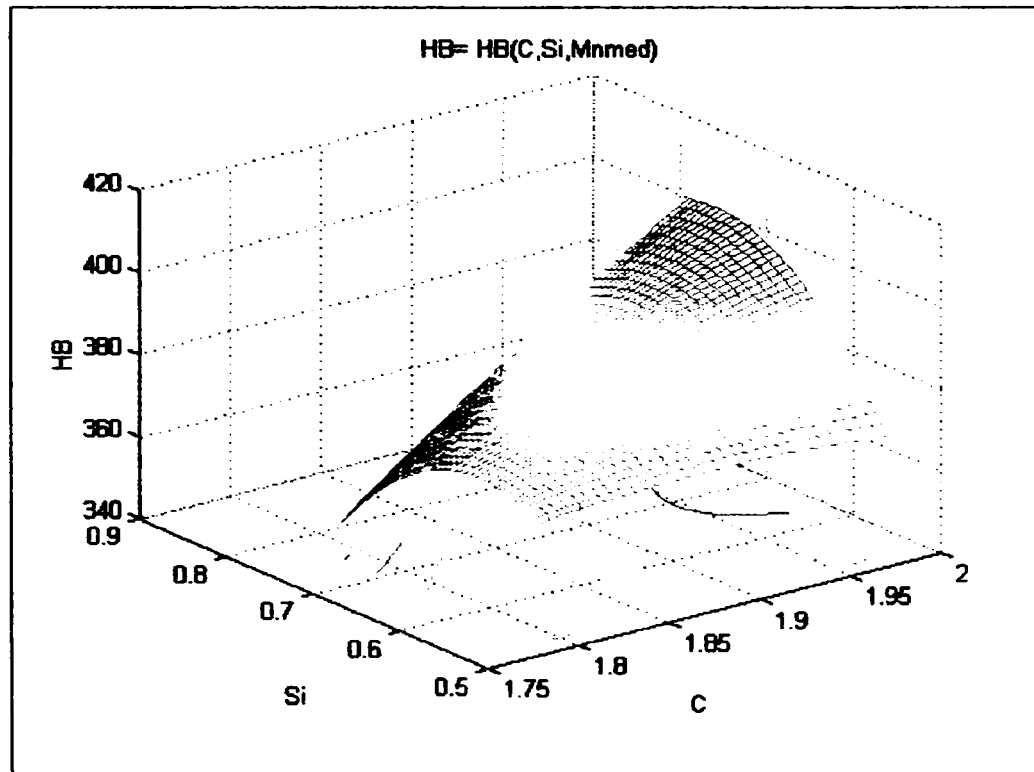


Figura III.42. Suprafața $HB = HB(C, Si, Mn_{med})$

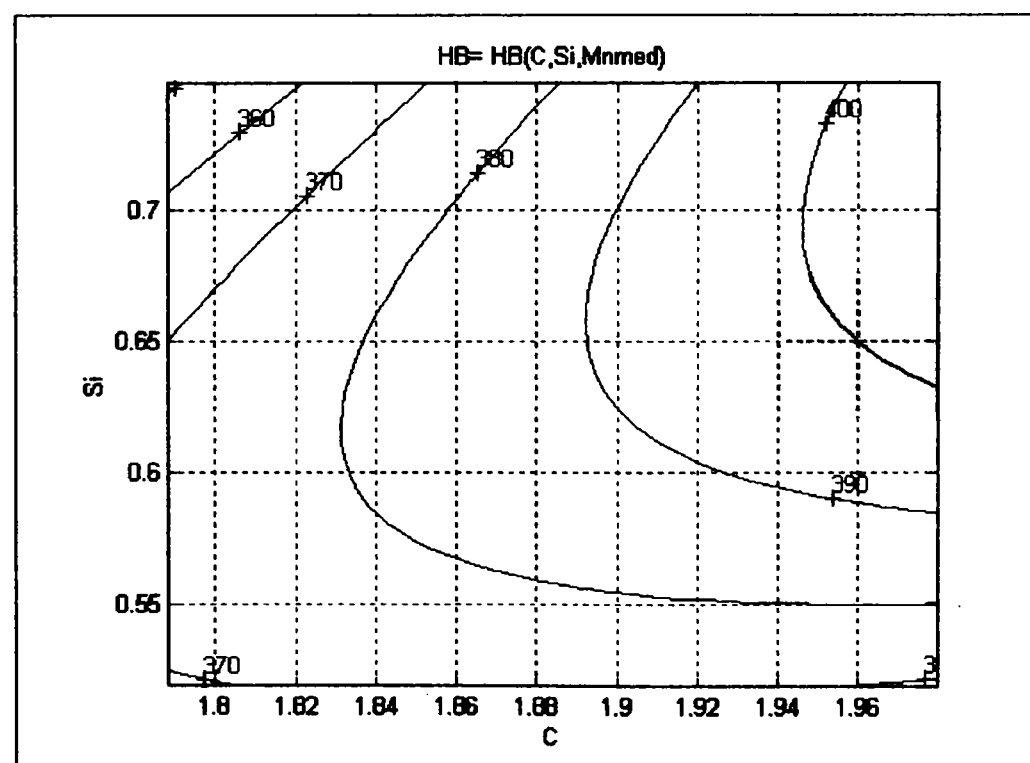


Figura III.43. Curbele de nivel ale variației $HB = HB(C, Si, Mn_{med})$

Ecuția de dependență a durității funcție de carbon și mangan considerată pentru o valoare medie a manganului, are forma:

$$HB_{\text{med}} = -249,9905 \cdot C^2 - 968,5799 \cdot Si^2 + 1310,0881 \cdot C \cdot Si + 260,5044 \cdot C - 1205,5398 \cdot Si + 373,6075 \quad (\text{III.14})$$

Din cele două grafice se poate trage concluzia că, pentru 1,96%C, duritatea se obține maximă la aprox. 0,65%Si sau, cu alte cuvinte, pentru conținuturi de mangan fixe (constante) menținerea siliciului între 0,60...0,67% asigură maximum durității la orice conținut de carbon.

Alierea cu Cr, Ni, Mo a oțelurilor hipereutectoide conduce la obținerea perlitei cu grad mai mare de dispersie și, prin aceasta, la creșterea durității și a rezistenței la uzare. Conform I.T.E.-607/92, valorile elementelor de aliere sunt cuprinse în intervalele [121]:

$$Cr = 1,0 \dots 1,2\%$$

$$Ni = 1,6 \dots 2,0\%$$

$$Mo = 0,3 \dots 0,5\%$$

Cromul este unul din cele mai active elemente stabilizatoare de carburi. Capacitatea cromului de a menține duritatea pe întreaga secțiune a cilindrilor are o mare importanță în cazul fabricării cilindrilor pentru profile, unde se cere o cădere mică a durității pe adâncimea calibrelor realizate prin prelucrarea mecanică. Cilindrii pentru profile sunt, de regulă, aliați cu crom în limitele 0,6...1,5%, indiferent de tipul acestora. În aceste cazuri, în mod obișnuit, se adaugă și nichel, al cărui conținut este cu 0,2...0,3% mai ridicat decât a conținutului de crom (un asemenea raport între crom și nichel asigură egalizarea durității pe secțiunea cilindrilor și micșorarea, în același timp, a fragilității acestora) [6].

Proprietatea de bază a **nichelului** constă în faptul că, în anumite limite, precis determinate, mărește duritatea masei metalice de bază pe seama scăderii punctului critic de transformare eutectoidă. Datorită acestei proprietăți, chiar în piese atât de masive cum sunt cilindrii de laminare, în condiții normale de răcire, se poate obține nu numai în crusta dură ci pe întreaga lor secțiune, întreaga gamă de structuri de tranziție (în funcție de conținutul de nichel) de la perlita lamelară fină până la martensită cu zone de austenită nedescompusă și, prin urmare, în conformitate cu aceasta, o gamă largă de durități.

La fabricarea majorității tipurilor de cilindrii turnați din oțel hipereutectoid, nichelul se adaugă în aceeași cantitate ca și cromul. Trebuie luat în considerare faptul că la turnarea cilindrilor din oțel cu conținuturi mai ridicate de nichel, la cristalizare se formează o structură cu granulație grosolană, care se poate finisa prin tratament termic.

Adăugarea **molibdenului** în aliajele pentru cilindri reprezintă una din metodele sigure de creștere a rezistențelor la uzare și la temperatură înaltă, precum și a rezistenței globale a acestora. La conținuturi de 0,25...0,50% Mo, în condițiile păstrării raporturilor dintre constituenții structurali, se obțin structuri dense cu granulație fină pe întreaga secțiune a cilindrilor, atât în crusta dură cât și în centrul acesteia, precum și în fusuri și trefle. În acest fel, se obține creșterea rezistențelor la uzare și la temperaturi ridicate ale crustei dure, a rezistenței mecanice și a durabilității în exploatare a cilindrilor. Chiar la conținuturi scăzute de molibden, acesta, dizolvându-se în ferita din perlită,

provoacă creșterea rezistenței masei metalice de bază și, prin urmare, și a rezistenței globale a cilindrilor. Turnarea cilindrilor cu conținuturi de molibden sub 0,25% nu este rațională deoarece nu conduce la îmbunătățirea vizibilă a structurii acestora [6], [87], [96].

Similar cu graficele obținute pentru C, Si și Mn a fost studiată variația durității cu conținuturile elementelor de aliere Cr, Ni, Mo. Și în acest caz, valorile medii și abaterea medii pătratice ale variabilelor, determinate de programul de calcul sunt:

	Valoare medie [%]	Abatere medie pătratică
Cr	1,1072	0,072488
Ni	1,6683	0,1168
Mo	0,3269	0,036587
Duritate [HB]	382,17	19,508

Ecuția de regresie a durității funcție de conținuturile de crom, nichel, molibden are forma:

$$HB = 815,1388 \cdot Cr^2 - 36,8481 \cdot Ni^2 + 762,8368 \cdot Mo^2 - 1280,475 \cdot Cr \cdot Ni + 1637,9158 \cdot Ni \cdot Mo - 828,9962 \cdot Mo \cdot Cr + 644,347 \cdot Cr + 965,1077 \cdot Ni - 2165,581 \cdot Mo - 442,5145$$

(III.15)

coeficientul de corelație are valoarea $r_f = 0.67430279119981$ iar abaterea de la suprafața de regresie este $s_f = 14.40567391377988$

Această suprafață din spațiul cu patru dimensiuni admite un punct șea de coordonate:

$$Cr_s = 0,97666;$$

$$Ni_s = 1,5876;$$

$$Mo_s = 0,24572;$$

$$HB_s = 372,1663.$$

După înlocuirea a câte unei variabile independente cu valoarea ei medie, s-au obținut trei ecuații ale căror suprafețe (care aparțin spațiului cu trei dimensiuni) sunt prezentate în fig. III.44, III.45, III.46, III.47, III.48, III.49.

Suprafața din fig. III.44, a cărei ecuație are forma

$$HB_{Cr_{med}} = -36,8481 \cdot Ni^2 + 762,8368 \cdot Mo^2 + 1637,9158 \cdot Ni \cdot Mo - 452,6872 \cdot Ni - 3083,4799 \cdot Mo + 1270,2798$$

(III16)

reprezintă suprafața variației durității cu conținuturile de nichel și molibden, la un conținut de crom mediu constant, respectiv $HB = HB(Cr_{med}, Ni, Mo)$.

Analizând cele două grafice prezentate în fig. III.44, III.45, se poate preciza faptul că, pentru asigurarea unor durități de valori ridicate, nichelul și molibdenul trebuie menținute la valori mari (peste 1,55%Ni și 0,35%Mo).

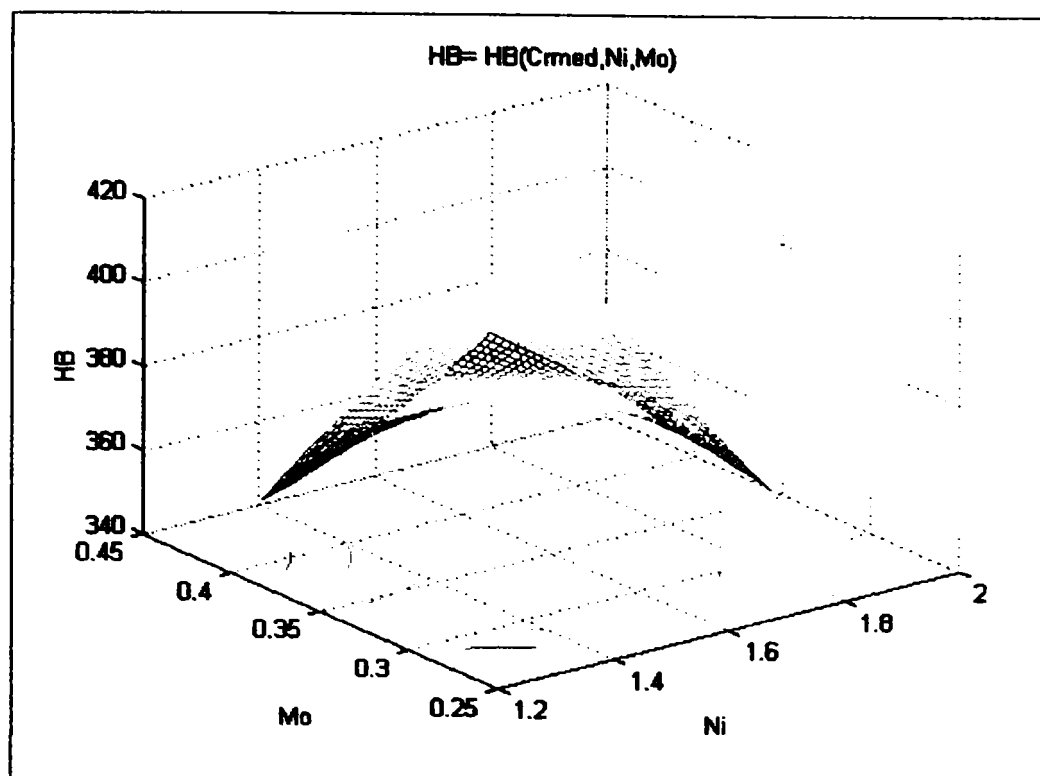


Figura III.44 Suprafața
 $HB = HB(Cr_{med}, Ni, Mo)$

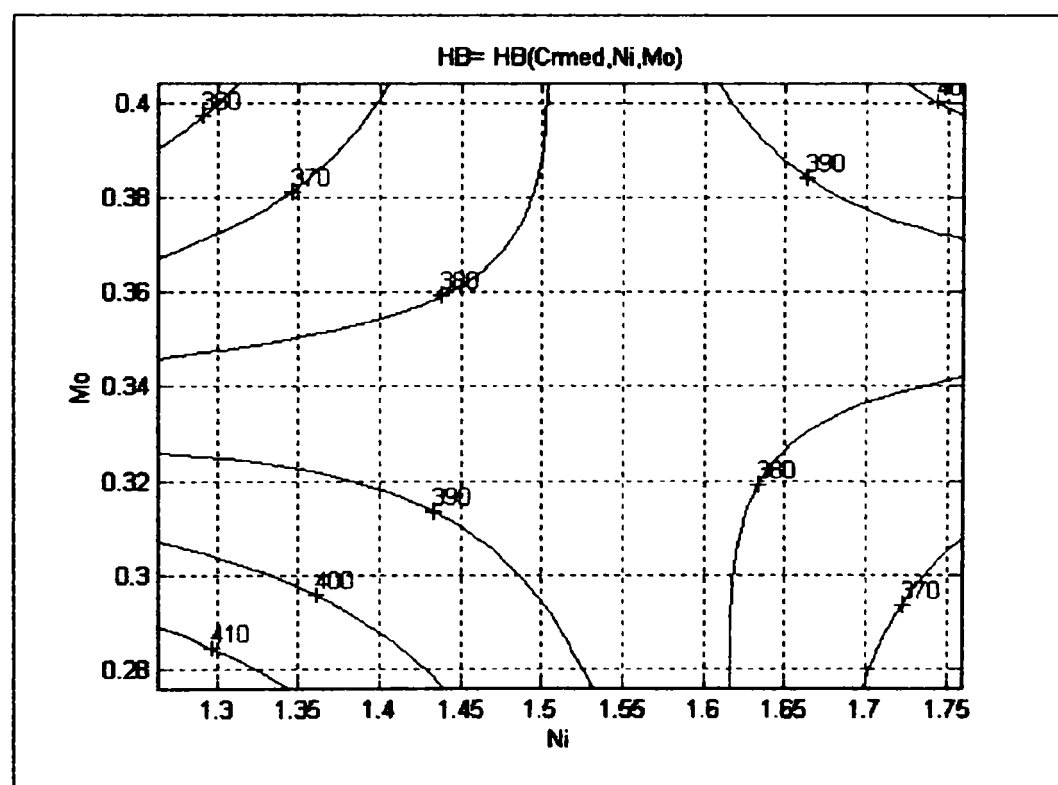


Figura III.45. Curbele de
 nivel ale variației
 $HB = HB(Cr_{med}, Ni, Mo)$

Dacă, în plus, se analizează și fig III.46, III.47, se observă că, pentru un nichel cuprins în intervalul 1,55...1,70% și un molibden constant, creșterea cromului, începând de la 1,09%, duce la creșterea durității. Din grafic mai rezultă că:

- pentru $Cr = 1,09\%$ și $Ni = 1,3\%$ se obține o duritate de 380HB
- pentru $Cr = 1,139\%$ și $Ni = 1,4\%$ se obține o duritate de 400HB
- pentru $Cr = 1,2\%$ și $Ni = 1,325\%$ se obține o duritate de 440HB (dar nichelul nu se încadrează în valorile cuprinse în standarde); în schimb pentru pentru $Cr = 1,2\%$ și $Ni = 1,61\%$ se obține o duritate de 400HB
- pentru $Cr = 1,22\%$ și $Ni = 1,64\%$ se obține o duritate de 400HB.

Astfel, pentru obținerea unei durități corespunzătoare, intervalul optim pentru nichel (considerat la un Mo_{med}) este 1,55...1,70% și pentru un $Cr = 1,0...1,2\%$.

Ecuția care descrie cele două suprafețe prezentate în fig.III.46, III.47 este:

$$HB_{Ni_{med}} = 762,8386 \cdot Mo^2 + 815,1388 \cdot Cr^2 - 828,9962 \cdot Mo \cdot Cr + 566,9144 \cdot Mo - 1491,8385 \cdot Cr + 1064,9978 \quad (III.17)$$

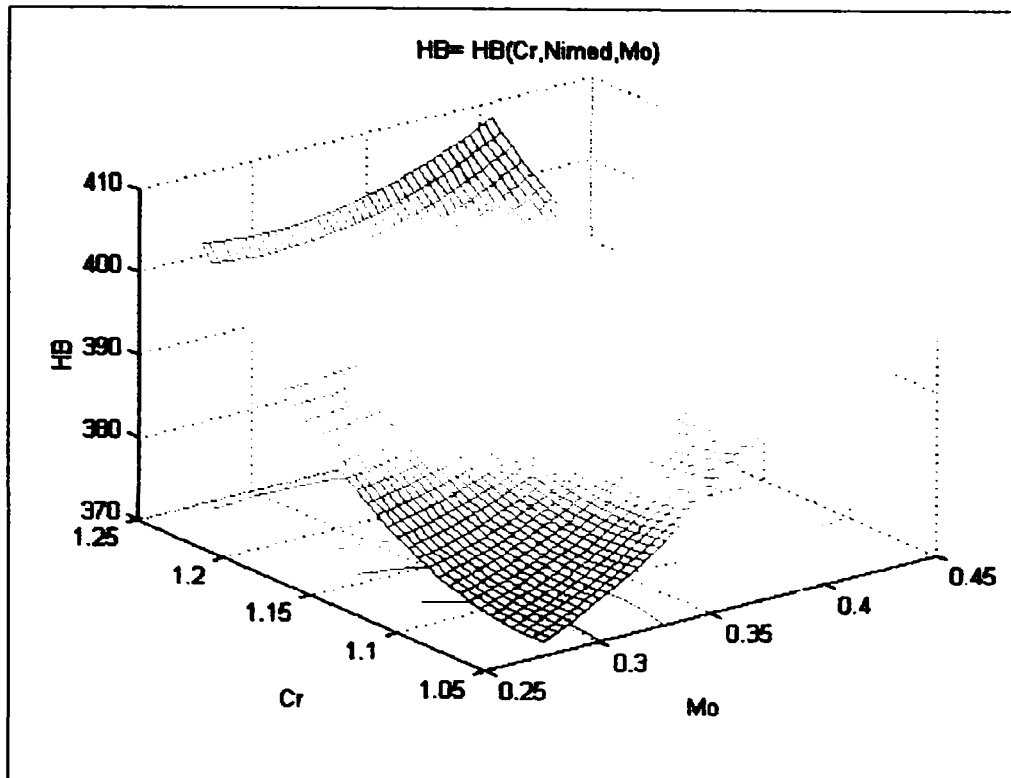


Figura III.46. Suprafața $HB = HB(Cr, Ni_{med}, Mo)$

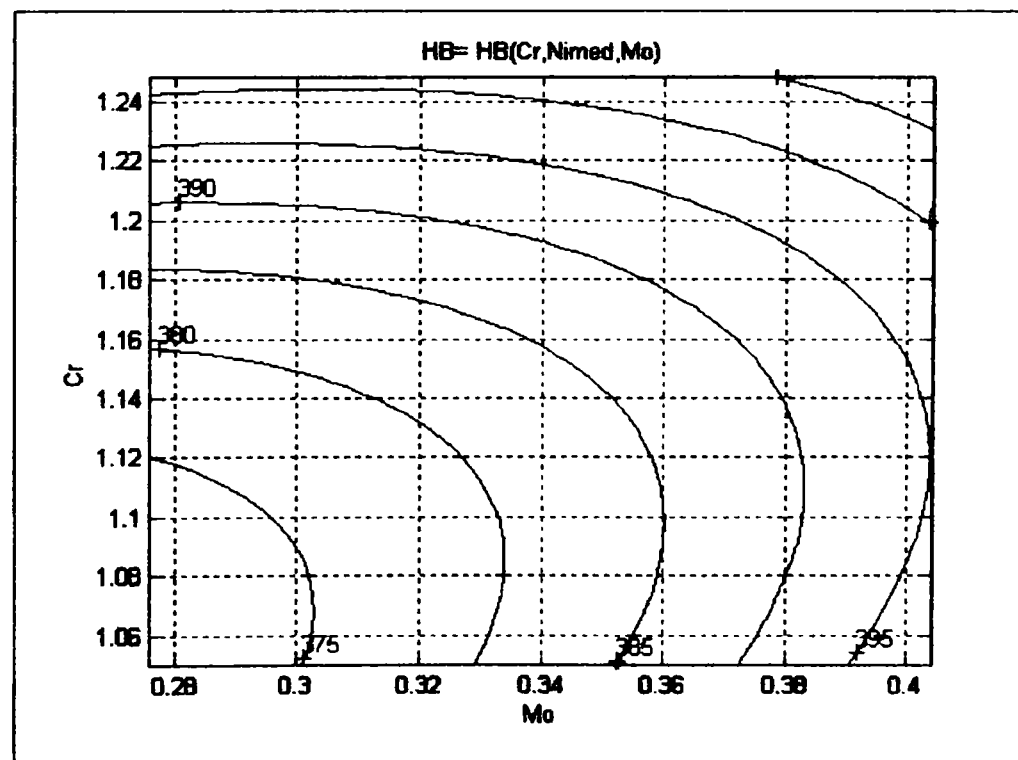


Figura III.47. Curbele de nivel ale variației $HB = HB(Cr, Ni_{med}, Mo)$

Pentru determinarea variației durității în funcție de crom și molibden, pentru o valoare medie a nichelului considerată constantă, respectiv $HB = HB(Cr, Ni_{med}, Mo)$, s-a utilizat ecuația

$$HB_{Mo_{med}} = 815,1388 \cdot Cr^2 - 36,8481 \cdot Ni^2 - 1280,475 \cdot Cr \cdot Ni + 373,351 \cdot Cr + 1500,5367 \cdot Ni - 1068,9177, \quad (III.18)$$

și au rezultate graficele din fig.III.48, III.49. În urma analizei atente a fig.III.49 se constată faptul că maximele curbelor de duritate se obțin în intervalul 1,00...1,12%Cr. Creșterea conținutului de molibden duce la creșterea durității, astfel încât pentru 0,42%Mo și 1,12%Cr se obține duritatea maximă (395HB).

O duritate de 400 HB se obține pentru 0,3%Mo și 1,24%Cr.

În concluzie, se poate spune că pentru (0,375...0,405)%Mo și 1,2%Cr se obține o duritate maximă, de aprox.400HB.

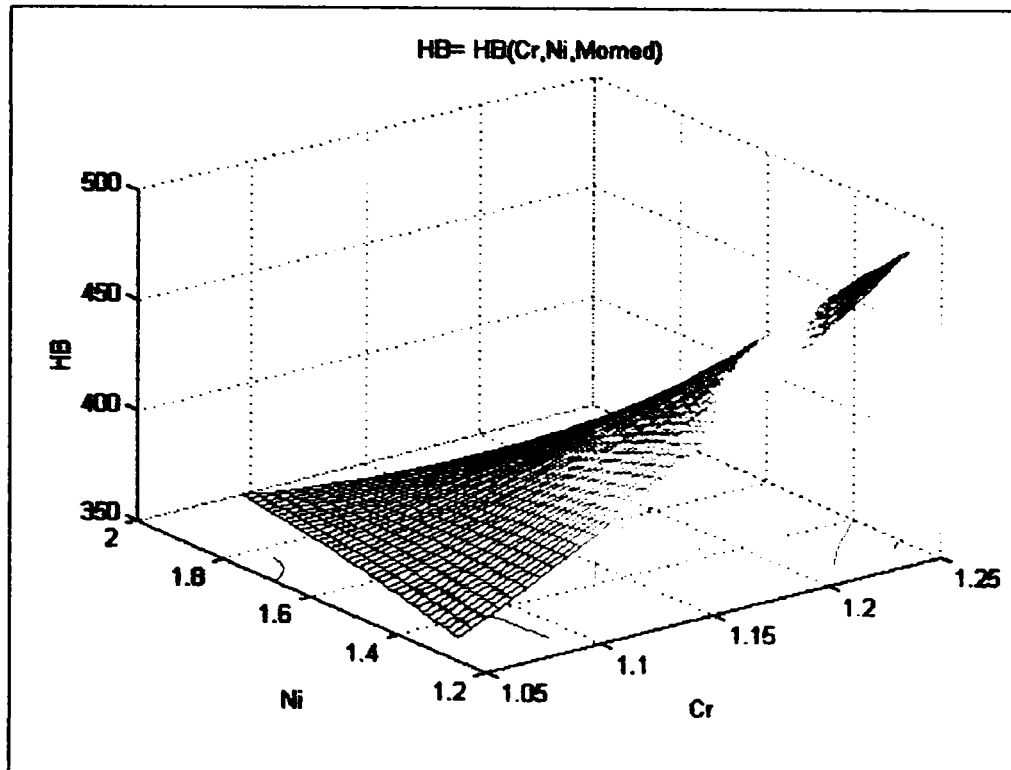


Figura III.48 Suprafața
HB = HB(Cr, Ni, Mo_{med})

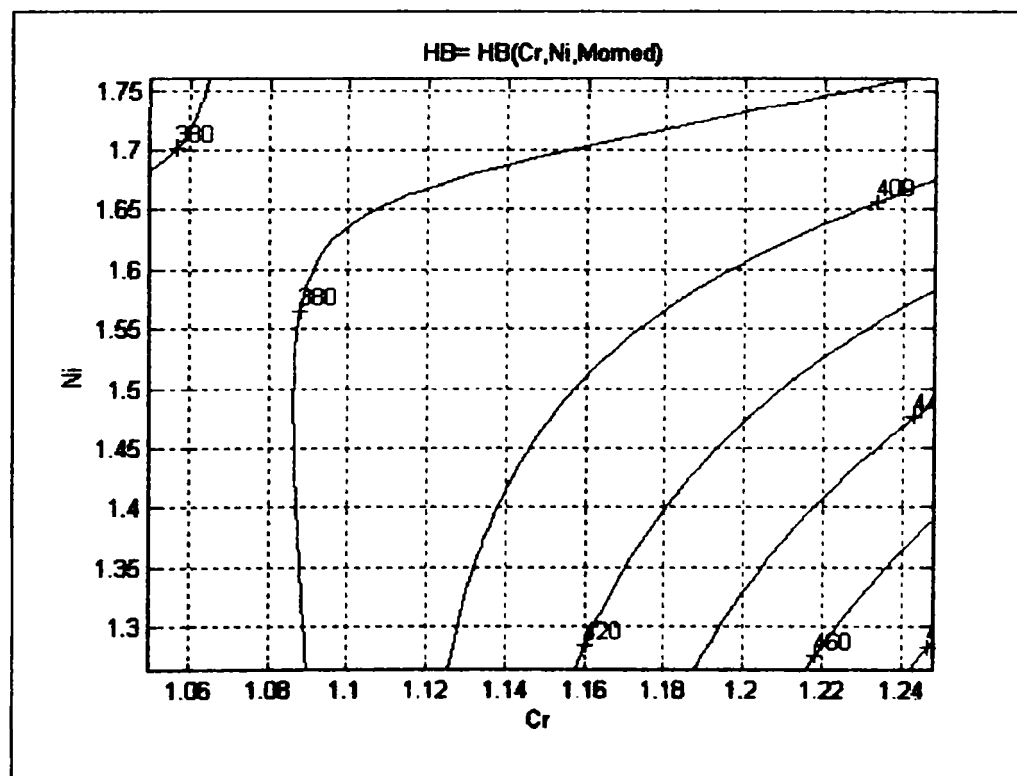


Figura III.49.Curbele de
nivel ale variației
HB = HB(Cr, Ni, Mo_{med})

Privit în ansamblu, se poate spune că pentru creșterea durtății este necesar ca elementele de aliere să se încadreze în intervalele următoare (au fost restrânse domeniile de variație pentru Ni și Mo, conform fig.III.50):

- Ni = 1,55...1,70%
- Cr = 1,0...1,2% (la conținuturi ridicate de carbon, stabilitatea cementitei poate fi mărită prin creșterea conținutului de crom în limitele 0,9...1,3%)
- Mo = 0,375-0,405%

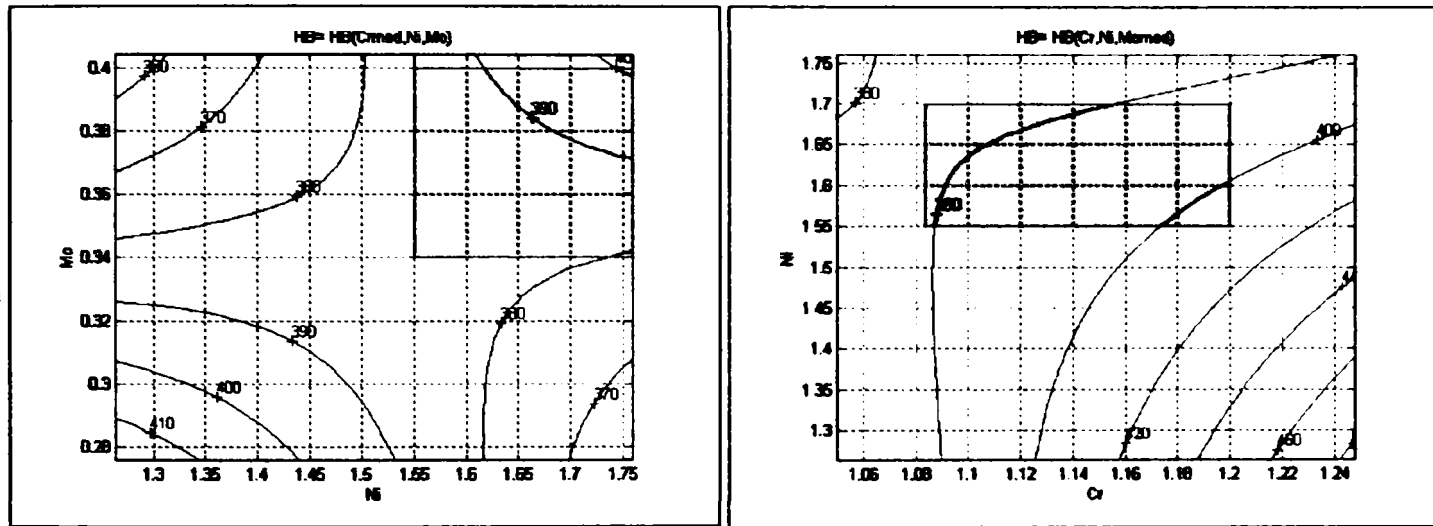


Figura III.50. Prezentarea domeniilor restrânse pentru conținuturile de Cr, Ni, Mo.

În Anexa III.2.2. sunt prezentate graficele duble pentru C, Mn, Si, Cr, Ni, Mo. Graficele duble pot fi reprezentate doar dacă unul din parametri devine constant (de regulă se acordă valoarea medie, o valoare peste medie și una sub medie). Cu alte cuvinte, se poate presupune existența a două drepte paralele, planul de bază situându-se la mijloc, astfel că, în zona dintre suprafețe se poate spune că există o zonă de stabilitate.

În Anexa III.2.3 este prezentat programul de calcul MATLAB.

III.2.2.2. Analiza comportării în exploatare a cilindrilor studiați

În tabelul III.14. sunt prezentate, pe lângă compoziția chimică, duritatea, temperatura de turnare și durabilitatea înregistrată în exploatare pentru cei 29 cilindri.

Analiza influenței compoziției chimice asupra durității cilindrilor a fost prezentată în detaliu în paragraful III.2.2.1, urmând ca, în acest subcapitol, să se prezinte problemele legate de durabilitate. Pentru aceasta tabelul III.14 a fost completat cu date înregistrate în exploatare, respectiv cu cantitățile ce au fost laminate în timpul celor patru campanii la care sunt supuși cilindri, în cadrul secției Laminoare de Profile Mijlocii, de la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara (tab.III.15).

Durabilitatea se socotește, de regulă, prin raportul dintre cantitatea de material laminată (în tone) și grosimea minimă a crustei de lucru care se îndepărtează prin restrunjire (în mm), în vederea restabilirii profilului inițial al suprafeței cilindrilor. Literatura de specialitate indică faptul că există o strânsă legătură între duritatea crustei de lucru și valoarea înregistrată a durabilității. Durabilitatea în exploatare este determinată de rezistența la uzare a cilindrilor, astfel încât se poate spune că la o duritate mare a crustei de lucru, uzura este redusă, însă nu există o dependență directă între aceste două caracteristici [6].

Consumul de cilindri de laminare are o mare influență asupra costului laminatelor și, deci, micșorarea acestuia duce la creșterea eficienței economice a secțiilor de laminare

Din datele prezentate în tab. III.15 rezultă că valorile înregistrate pentru durabilitate sunt destul de scăzute, ceea ce induce obligativitatea analizelor critice în vederea înlăturării cauzelor care conduc la obținerea, în exploatare, a rezultatelor nesatisfăcătoare, din punct de vedere al comportării în exploatare a cilindrilor de laminare.

Pentru aceasta, pentru fiecare cilindru sunt prezentate, în tab.III.10, cantitățile de material laminat pentru fiecare campanie de laminare. Cantitatea laminată *inițial* reprezintă campania I de laminare, respectiv cantitatea de material laminată (în tone) până la uzarea calibrelor, după care cilindrii sunt recalibrați, în vederea restabilirii profilului. În general, pentru cilindrii studiați, se îndepărtează, la o recalibrare, 16 mm din diametrul cilindrului. Campania a II-a de laminare este evidențiată în graficul din fig.III.45 ca fiind curba notată *Restrunjire 1*, campania a III-a este reprezentată de curba *Restrunjire 2*, iar campania a IV-a, de curba *Restrunjire 3*. Astfel, se poate preciza faptul că, la ultima campanie au fost îndepărtați 48 mm din diametrul total al cilindrilor. Cu alte cuvinte, etapele de restrunjire se consideră că sunt aplicabile la 16, 32, 48 mm, de la suprafața cilindrului inițial.

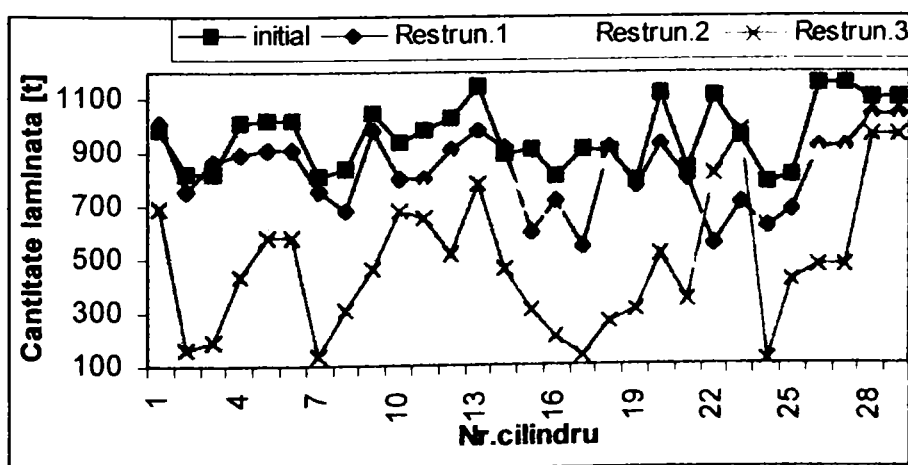


Figura.III.51. Cantitatea laminată, în cele patru campanii de laminare, pentru cilindri analizați.

Tabelul III.15 Analiza cilindrilor de laminare urmăriți în exploatare.

Nr. cil.	Compoziție chimică [%]										Duritate tăblice [HB]	Cantitate laminată [t]				Durabilitate [t/mm]
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	Ti	Inițial (0 mm)		Restrunjire 1 (16mm)*	Restrunjire 2 (32mm)*	Restrunjire 3 (48mm)*		
1	1,92	0,85	0,70	0,010	0,025	1,16	1,67	0,34	-	395	1010	890	490	70		
2	1,90	0,80	0,79	0,010	0,020	1,07	1,78	0,31	-	378	756	650	160	50		
3	1,90	0,80	0,79	0,010	0,020	1,07	1,78	0,31	-	380	860	730	195	53		
4	1,90	0,80	0,79	0,010	0,020	1,07	1,78	0,31	-	383	890	732	435	64		
5	1,90	0,80	0,79	0,010	0,020	1,07	1,78	0,31	-	389	910	690	480	65		
6	1,85	0,83	0,72	0,010	0,027	1,08	1,60	0,30	-	389	910	690	480	65		
7	1,85	0,83	0,72	0,010	0,027	1,08	1,60	0,30	-	384	756	650	140	49		
8	1,85	0,83	0,72	0,010	0,027	1,08	1,60	0,30	-	375	680	530	310	49		
9	1,82	0,83	0,75	0,012	0,035	1,06	1,77	0,33	-	373	980	790	360	66		
10	1,88	0,82	0,65	0,010	0,018	1,08	1,65	0,33	-	381	800	712	320	58		
11	2,00	0,87	0,75	0,008	0,028	1,28	1,73	0,39	-	408	796	652	176	54		
12	2,00	0,87	0,75	0,008	0,028	1,28	1,73	0,39	-	412	910	860	510	69		
13	1,98	0,80	0,72	0,010	0,030	1,05	1,62	0,35	-	400	980	690	420	68		
14	1,92	0,85	0,70	0,010	0,025	1,16	1,67	0,34	-	392	918	830	290	60		
15	1,85	0,83	0,72	0,010	0,027	1,08	1,60	0,30	-	378	600	712	310	53		
16	1,80	0,77	0,72	0,010	0,020	1,01	1,62	0,31	-	368	720	630	208	49		
17	1,82	0,84	0,63	0,010	0,028	1,10	1,66	0,35	-	370	944	832	133	59		
18	1,95	0,84	0,60	0,010	0,028	1,15	1,65	0,42	0,050	398	920	860	260	61		
19	1,85	0,80	0,70	0,015	0,030	1,10	1,64	0,30	0,040	380	773	541	308	50		
20	2,03	0,90	0,65	0,020	0,025	1,30	1,62	0,40	0,060	420	927	885	230	66		
21	1,90	0,90	0,76	0,010	0,022	1,16	1,70	0,30	0,055	383	803	494	343	52		
22	1,74	0,76	0,48	0,012	0,026	1,04	1,85	0,26	-	360	958	720	205	62		
23	1,80	0,78	0,60	0,014	0,020	1,04	1,65	0,33	-	368	980	796	345	63		
24	1,84	0,80	0,78	0,010	0,033	1,12	1,74	0,31	-	310	620	510	120	42		
25	1,94	0,75	0,67	0,015	0,028	1,10	1,70	0,32	0,060	396	684	535	330	49		
26	1,82	0,84	0,53	0,013	0,025	1,10	1,73	0,34	0,060	374	917	895	260	67		
27	1,82	0,70	0,60	0,008	0,032	1,00	1,55	0,26	0,030	369	917	895	260	67		
28	1,95	0,77	0,72	0,010	0,026	1,12	1,18	0,33	-	396	1035	762	380	68		
29	1,82	0,84	0,53	0,013	0,025	1,10	1,73	0,34	0,040	374	1035	762	380	68		
Valorile medii ale înregistrărilor sunt											953,6207	861,6897	721,5517	304,7586	59	

* 16, 32, 48 mm reprezintă [mm] restrunjiți, considerați de la suprafața cilindrului.

Din graficul prezentat în fig.III.51, rezultă faptul că pentru fiecare cilindru studiat se observă scăderea de cantitate laminată odată cu restrunzirile efectuate, fapt care se datorează scăderii durității pe secțiunea cilindrului. Cu mici excepții (fig.III.52), se observă o ușoară creștere a cantității de material laminat după prima restrunzire. Acest fapt se datorează stratului superficial ușor decarburat.

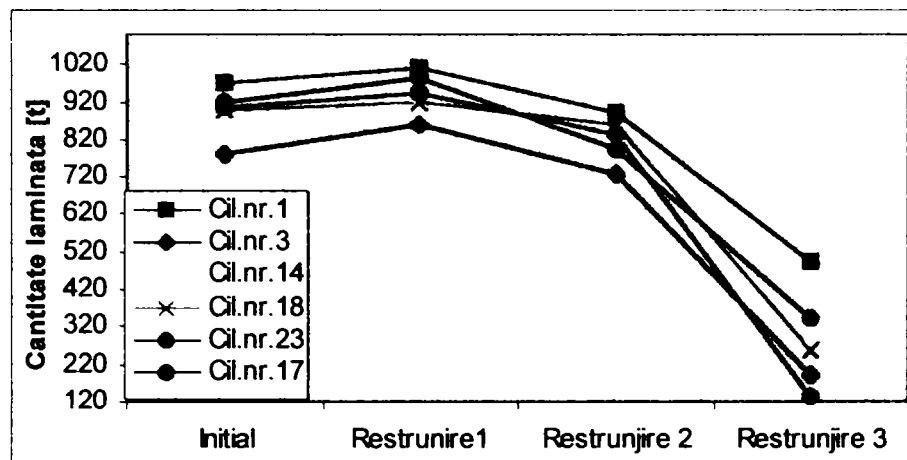


Figura III.52. Cantitățile de material laminat pentru cilindrii cu nr. 1,3,14,17,18,23.

Dacă se trasează diagrama duritate funcție de durabilitate (fig.III.48), se observă următoarele:

- cele mai multe valori ale durităților se înregistrează în intervalul 350...420HB, fapt care este conform cu standardele în vigoare.
- odată cu creșterea durității crește și durabilitatea în exploatare (în cele mai multe din cazuri)
- ponderea înregistrărilor de durabilitate în intervalul 40...65 t/mm de cca.68,96% din totalul înregistrărilor nu este deloc încurajatoare, dacă se ține cont și de faptul că media de durabilitate pentru cele 29 înregistrări este de 59 t/mm (care este o valoare destul de mică).

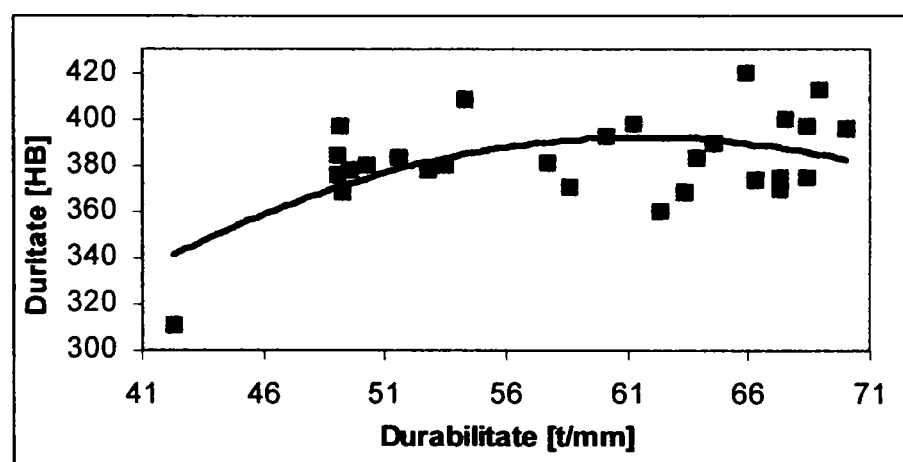


Figura III.53. Dependența durabilității de duritate.

Pentru a putea avea o imagine generală a situațiilor înregistrate pentru cei 29 cilindri a fost trasată histograma campaniilor de laminare (fig. III.54).

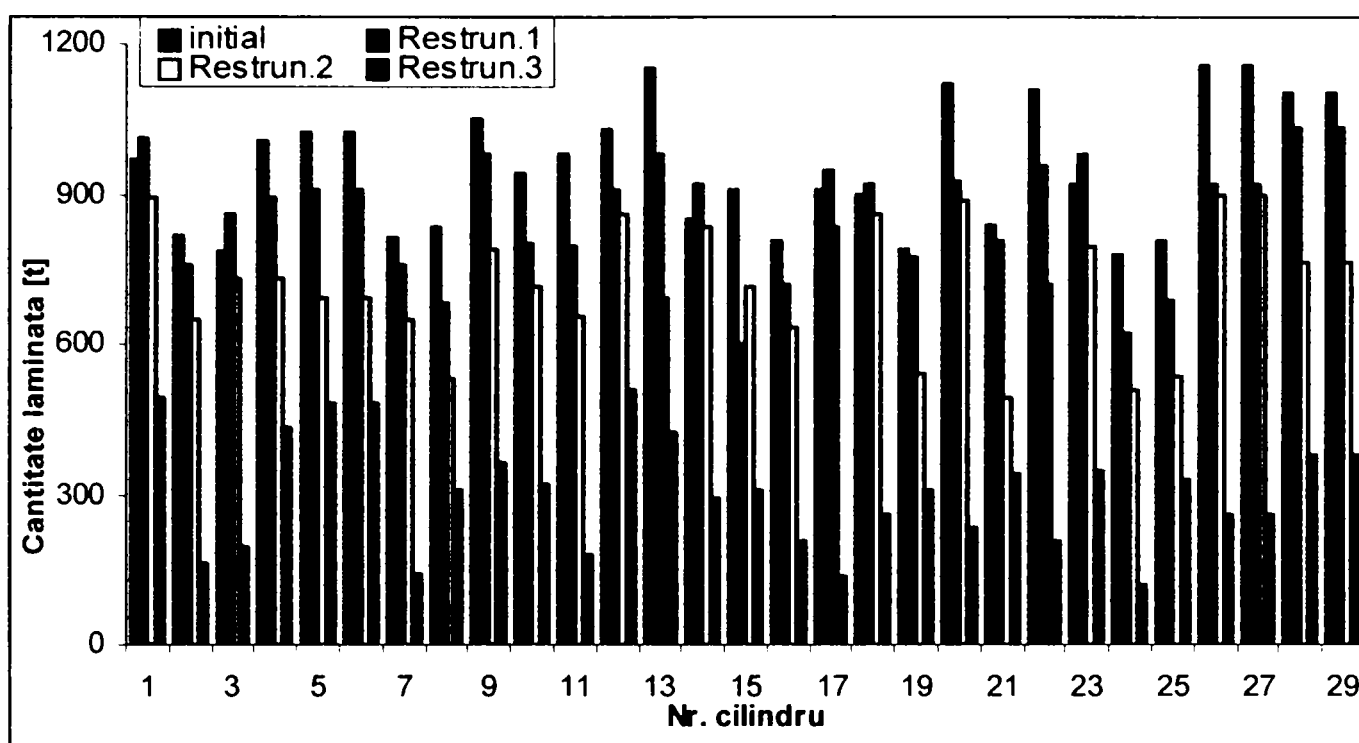


Figura III. 54. Histograma valorilor înregistrate pentru cantitatea laminată pentru cei 29 cilindri studiați.

Din tab.III.15, se observă faptul că pentru 8 cilindri s-a experimentat adaosul, la elaborare, de titan. **Titanul** adăugat în aliajele pentru cilindri în cantități de până la 0,1% acționează ca un element stabilizator de carburi, mărind adâncimea zonei albe și, într-o oarecare măsură, și duritatea acesteia. Fiecare 0,04% adaos de titan mărește adâncimea de albire cu 1 mm. La adaosul înainte de turnare până la 0,10% Ti se mărește tenacitatea zonei albe chiar în cazul unor durități ridicate ale acesteia [6].

Adaosul de titan la turnarea cilindrilor are un caracter limitat și, de obicei, nu depășește 0,2%. Titanul este dezoxidant foarte activ. Oxizii formați constituie germeni de cristalizare a grafitului și, de aceea, adaosuri mici de până la 0,1%Ti pot provoca micșorarea adâncimii zonei albe.

Dacă se trasează graficul dependenței durității de conținutul de titan (fig.III.55) se observă faptul că, odată cu creșterea conținutului de titan, la valori cuprinse în intervalul 0,03...0,06%, crește și duritatea între 369...420 HB.

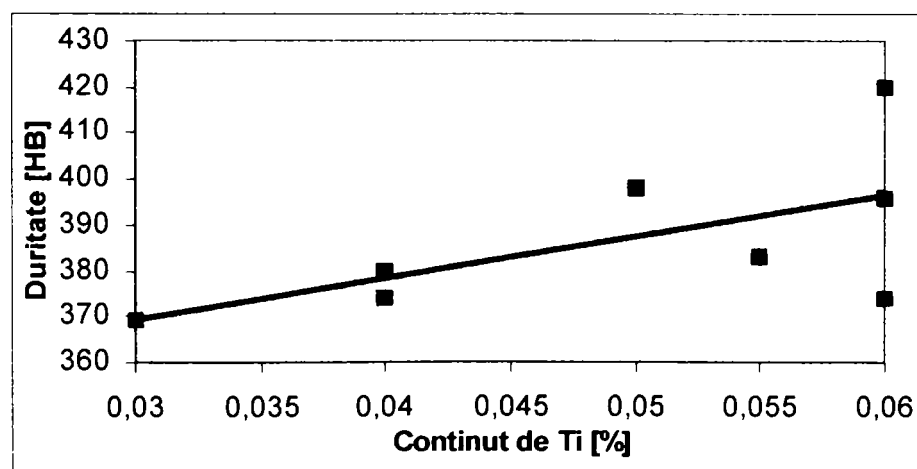


Figura III.55. Influența adaosului de Ti asupra durității cilindrilor de laminare.

Deoarece cifrele privind durabilitatea cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid tip Adomit (OTA) obținute în exploatare nu sunt satisfăcătoare, au fost analizate cauzele și s-a încercat aplicarea unor soluții pentru îmbunătățirea acestui aspect.

Principalele cauze care au efect direct asupra obținerii unor valori scăzute pentru durabilitate sunt:

- distribuirea neuniformă a apei de răcire pulverizată pe suprafața cilindrilor în timpul laminării sau chiar întreruperile accidentale a pulverizării acesteia conduce la ruperea cilindrilor înainte de a fi parcurs campaniile de laminare. La S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, Laminorul de Profile Mijlocii, caja M14, apa de răcire se aplică pe două suprafețe (una pe cilindrul superior și una pe cilindrul inferior)
- prinderea, între cilindrii, a laminatului cu o temperatură necorespunzătoare duce la ruperea cilindrilor.

Analiza diferențelor de temperatură dintre semifabricat și apa de răcire, în timpul procesului de laminare, va fi detaliată cu ajutorul simulării, în cadrul cap. IV.

- se cunoaște că, dacă prin cifrele statistice obținute, un calibru trebuie schimbat după 100 bare laminate, aceasta înseamnă că 5...10 bare laminate în plus determină o scădere bruscă a rezistenței la uzare, ceea ce face ca, la recalibrarea cilindrilor respectivi, cantitatea de material îndepărtat prin restrunjire să fie mai mare decât valoarea admisă.

Datorită durabilității scăzute a cilindrilor din OTA, consumurile de cilindri planificate la secția Laminor Profile Mijlocii au fost depășite, de unde rezultă creșterea cheltuielilor secției. Evoluția consumului de cilindri la oțel, cantitativ, este redată, pentru trei ani consecutivi, în tab.III.16.

Tabelul III.16. Evoluția consumului de cilindri din oțel la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara

Anul	Plan [kg]	Realizat [kg]	Diferență [kg], ±
1999	265800	318730	+ 52930
2000	370450	432372	+ 61992
2001	346925	415124	+ 68199

Cifrele de durabilitate realizate la Laminorul de Profile Mijlocii, din cadrul S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, cu cilindrii din OTA, proveniți de la mai mulți furnizori sunt elocvente (tab.III.17). Aceste cifre au fost extrase pentru caja finisoare M14, fiind cea mai reprezentativă (pentru toți furnizorii) și numai pentru cilindrii care au ieșit din uz (minusul maxim admis: -48mm).

Tabelul III.17. Durabilitatea realizată la Laminorul de Profile Mijlocii.

FURNIZOR PROFIL		Durabilitate [tone laminate /1 mm cilindru restrunjit]		
		Japonia (1972-1978)	Iugoslavia (1980-1984)	Hunedoara (1999-2001)
Profil I	I 80	71	46	46
	I 100	98	88	62
	I 120	149	116	54
Profil U	U 65	178	110	57
	U 80	141	93	62
	U 100	156	96	70
	U 120	182	95	51

Pentru evidențierea diferențelor existente între durabilitățile înregistrate în exploatare, pentru cilindrii proveniți de la diferiți furnizori, s-a întocmit histograma din fig.III.56.

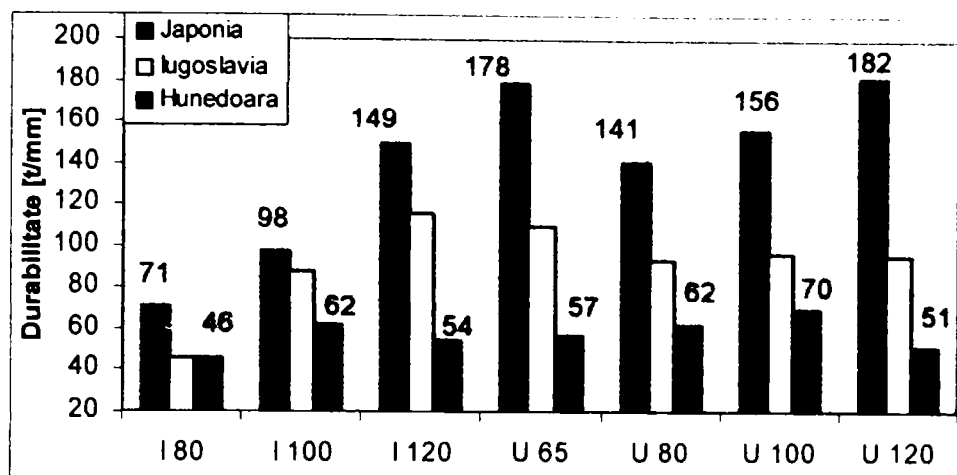


Figura III.56. Durabilitatea medie pentru cilindrii turnați din oțel tip Admit (Laminare Profile Mijlocii, caja M14)

În scopul creșterii durabilității în exploatare a cilindrilor turnați din oțel tip Admit, s-au propus unele măsuri a căror aplicabilitate este rațională, și anume:

- precalibrarea cilindrilor în vederea durificării pe adâncime a conturului calibrelor;
- respectarea modului de exploatare a cilindrilor: schimbarea calibrelor la laminare atunci când s-a laminat numărul de bare planificat;
- asigurarea unei răciri corespunzătoare a cilindrilor, respectiv, aplicarea apei de răcire pe patru suprafețe ale cilindrilor. Acest fenomen a fost simulat, iar rezultatele simulării sunt prezentate în cap.IV.

Experimentarea precalibrării cilindrilor înainte de tratamentul termic secundar s-a efectuat pe 24 cilindri (12 garnituri), destinați obținerii profilelor I 80, I 100, I 120, caja 14. În vederea experimentării s-au pregătit 4 garnituri pentru profilul I 80, 6 garnituri pentru profilul I 100 și 2 garnituri pentru profilul I 120. După tratamentul termic primar cei 24 cilindri au fost eboșați în mod obișnuit. Dar, înainte de a se trimite la tratamentul termic secundar s-a executat o precalibrare, după modelul din fig.III.57, III.58 (ex. I 120, M 14), în ideea ca și conturul viitoarelor calibre să fie influențat de tratamentul termic secundar.

În urma precalibrării, în cadrul operației de finisare este necesară înlăturarea doar a unui strat foarte subțire din calibrul.

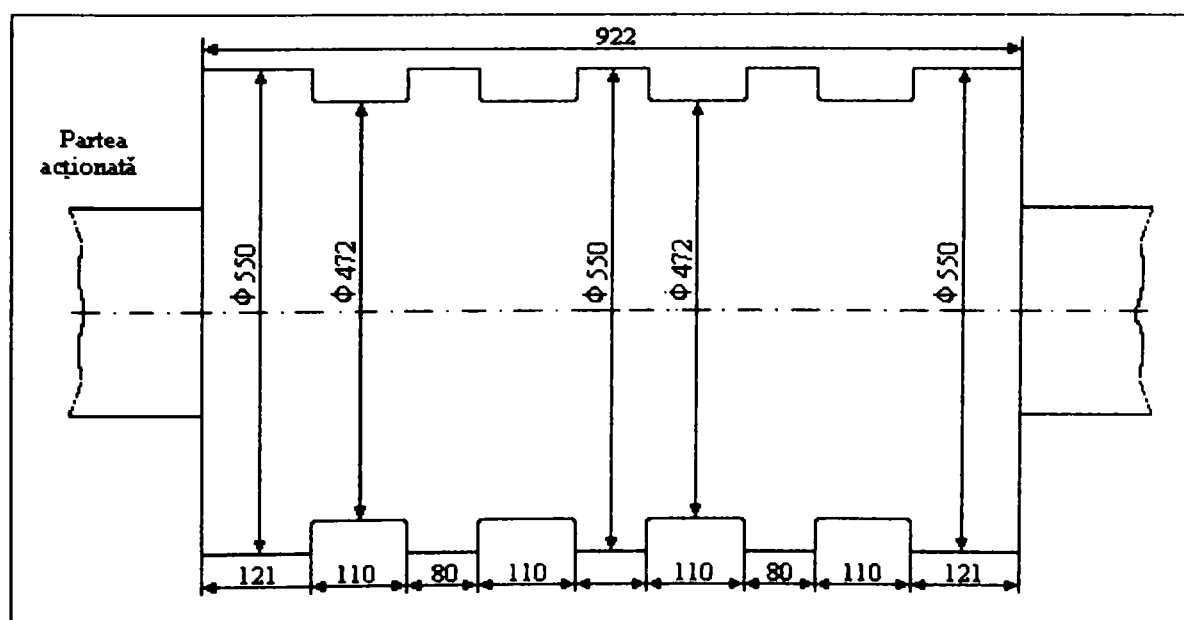
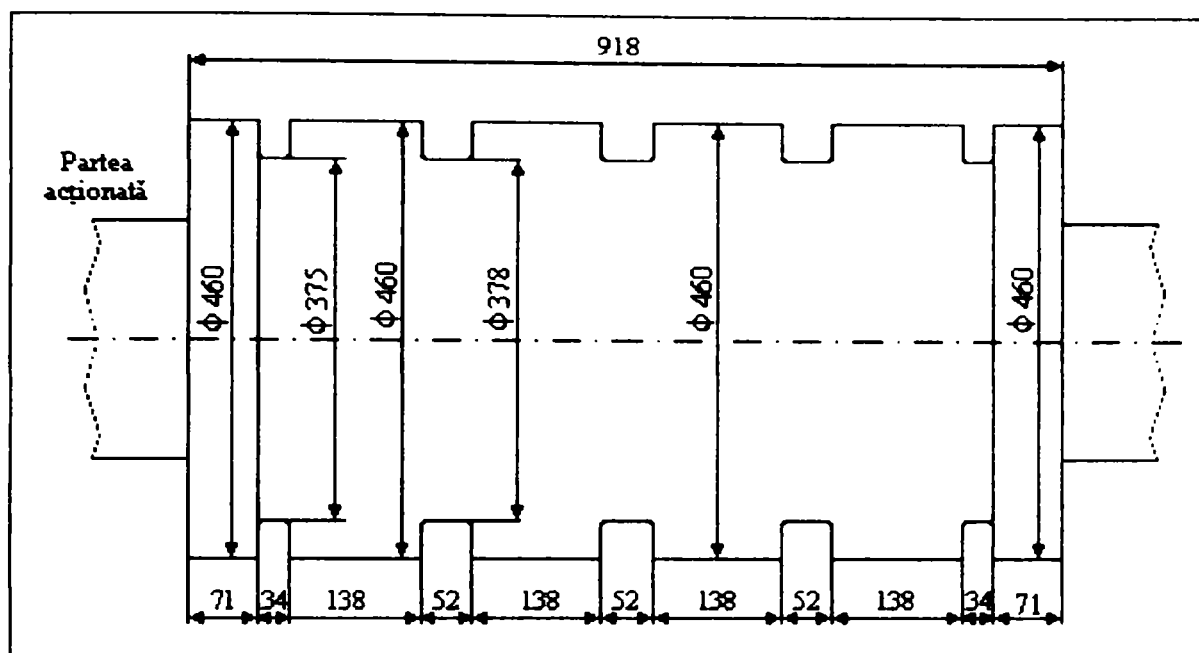


Figura III.57. Schiță de precalibrare la eboșare (cilindru inferior $\phi 550 \times 992$).

Figura III.58. Schiță de precalibrare la eboșare (cilindru superior $\phi 460 \times 918$).

În tabelul III.18 sunt prezentate rezultatele obținute pentru cele 12 perechi de cilindri, iar valoarea medie obținută pentru fiecare profil este comparată cu valoarea medie a 12 perechi de cilindri care au funcționat în aceleași condiții.

Tabelul III.18. Rezultatele înregistrate pentru cilindrii experimentali.

Nr. crt.	Profil	Notare garnitură	Durabilitate înregistrată pe cil. experimentali [t/mm]	Durabilitate medie pe cilindri clasici. [t/mm]	
				Cilindri experimentali	Cilindri clasici
1	Profil I80	A	54	54,75	46
2		B	56		
3		C	55		
4		D	54		
5	Profil I100	E	73	73,33	62
6		F	72		
7		G	76		
8		H	74		
9		I	70		
10		J	75		
11	Profil I120	K	81	80,5	54
12		L	80		

Această măsură s-a dovedit a fi realistă, iar rezultatele au fost încurajatoare. Cifrele privind durabilitatea realizată au crescut, dovadă că **precalibrarea cilindrilor poate fi introdusă ca etapă în fluxul de fabricație al cilindrilor.**

III.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Analiza factorilor de influență asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, a fost realizată pe baza studiului bibliografic referitor la următoarele probleme:

- influența tehnologiei de elaborare-turnare-tratament termic asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare
- influența condițiilor de exploatare asupra durabilității cilindrilor
- folosirea programelor de calcul în procesele industriale și de prelucrare statistică a datelor experimentale

În urma analizei efectuate în cadrul acestui capitol au rezultat următoarele concluzii:

- încărcătura metalică a agregatului de elaborare a oțelului tip Adamit, destinat turnării cilindrilor de laminare, constă din 91...95% deșeuri Adamit, față de 60% cât prevede literatura de specialitate, iar dozarea și asimilarea în baia metalică a materialului pentru carburare (cocs) este imprecisă
- nu se stăpânește variația conținuturilor de carbon în toate fazele procesului de elaborare, fapt pentru care se practică recarburarea după topire, la sfârșitul perioadei de afinare și chiar corecția carbonului final prin adaos de grafit în oala de turnare
- este indicată limitarea temperaturii de barbotare, la $T_{\min \text{ barbotare}} = 1450^{\circ}\text{C}$
- este indicată creșterea temperaturii de turnare cu cca. 10°C (la $1430..1440^{\circ}\text{C}$), datorită apariției, la turnare, a unor defecte de tipul "pete dure", acestea fiind zone cu proporție mult mai mare de cementită și ledeburită, apărute pe fondul unor aglomerări de incluziuni nemetalice care favorizează stabilitatea carburilor
- valorile scăzute ale durabilităților în exploatare înregistrate se datorează, de cele mai multe ori, laminării unei cantități mai mari de material decât cea prevăzută, datorită distribuției neuniforme a apei de răcire pulverizate pe suprafața cilindrilor de laminare în timpul exploatării sau chiar întreruperea acesteia, precum și datorită temperaturii prea scăzute a laminatului

Drept contribuții originale se menționează:

- crearea unei baze de date, cu ajutorul programului SGBD al Microsoft Access, în scopul stocării și accesării cu ușurință a datelor înregistrate pe întregul flux de fabricație al cilindrilor de laminare, pornind de la elaborarea aliajului lichid și turnarea cilindrului și până la scoaterea din uz a acestuia. Baza de date a fost concepută și realizată de așa manieră încât aceasta poate fi folosită, cu succes, în practica industrială, ținându-se cont de tendința de informatizare a fiecărui sector al întreprinderii.
- prelucrarea datelor înregistrate la elaborare-turnare, folosind analiza statistico-matematică, în vederea punerii în evidență a influenței proceselor de elaborare-turnare, a compoziției chimice și temperaturii de turnare asupra durității cilindrilor de laminare și verificarea repartiției datelor înregistrate în practica industrială

- prelucrarea statistică, cu ajutorul programelor de calcul MATLAB și EXCEL, a datelor privitoare la influența compoziției chimice asupra durității și durabilității cilindrilor de laminare. În urma prelucrării datelor se poate spune că, pentru orientarea favorabilă a procesului de elaborare, este indicat să se cunoască preferințele pentru valorile minime sau maxime ale fiecărui element și, totodată, se poate stabili un domeniul tehnologic optim de compoziție chimică, care să asigure valori cât mai ridicate ale durității.

Astfel:

- carbonul prescris $C = 1,8 \dots 2,0\%$ (se recomandă $1,9 \dots 1,95\%$);
- siliciul (este indicată limita inferioară): $Si = 0,62 \dots 0,67\%$;
- manganul (se recomandă limita superioară): $Mn = 0,842 \dots 0,864\%$;
- nichelul și molibdenul: $Ni = 1,55 \dots 1,75\%$, $Mo = 0,34 \dots 0,4\%$;
- cromul (se recomandă limita inferioară): $Cr = 1,08 \dots 1,2\%$;
- fosfor și sulf (sunt indicate valori cât mai mici posibil): $P = \max.0,04\%$; $S = \max.0,02\%$.
- prezentarea și exemplificarea celor mai întâlnite defecte, atât la turnare cât și în exploatare, și determinarea ponderii acestora cu ajutorul programelor de calcul
- prezentarea datelor obținute în urma experimentării precalibrării cilindrilor de laminare, înainte de aplicarea tratamentului termic secundar.

Această operație are drept scop, obținerea, pe toată adâncimea calibrelor, a structurii de tratament termic necesară asigurării caracteristicilor impuse de condițiile de exploatare, ceea ce duce, conform datelor experimentale, la creșterea semnificativă a durabilității în exploatare. În aceste condiții, după aplicarea tratamentului termic este necesară îndepărtarea doar a unui strat foarte subțire de material. În urma experimentărilor efectuate se poate trage concluzia că precalibrarea poate fi introdusă ca etapă în fluxul de fabricație a cilindrilor de laminare, turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit.

CAPITOLUL IV

SIMULAREA NUMERICĂ A COMPORTĂRII ÎN EXPLOATARE A CILINDRILOR DE LAMINARE, FOLOSIND METODA ELEMENTULUI FINIT

Capitolul de față își propune analiza comparativă a unor probleme legate de distribuția tensiunilor termice și mecanice în interiorul cilindrilor de laminare, precum și a câmpurilor termice înregistrate în timpul laminării. La baza acestui studiu se află rezultatele înregistrate în practica industrială.

Plecând de la aceste date concrete s-a construit un model analitic al fenomenului studiat, pe baza căruia s-a încercat o simulare numerică, cu ajutorul metodei elementului finit, a distribuției temperaturilor înregistrate în cilindri, în timpul procesului de laminare și a tensiunilor mecanice și termice, apărute în aceștia. Simularea s-a realizat cu ajutorul pachetului de programe COSMOS/M, ce rulează pe un calculator PC, de tipul Pentium 4 (P4), la o frecvență de 2000 MHz, 256 DDRAM, HDD 40GB.

Mediul COSMOS/M folosește metoda elementelor finite, care este un instrument deosebit de eficient de cercetare științifică și de proiectare, cu aplicații multiple și extrem de variate, fiind totodată o componentă principală a cercetării și proiectării asistate de calculator. Fiind o metodă de calcul bazată pe folosirea calculatoarelor electronice, metoda elementelor finite s-a dezvoltat odată cu perfecționarea și înmulțirea sistemelor de calcul electronic și cu creșterea numărului și a disponibilității produselor software de calcul cu elemente finite [104].

IV.1. METODA ELEMENTULUI FINIT. NOȚIUNI INTRODUCATIVE

Calculul moderne din aproape orice domeniu de activitate nu mai pot fi concepute fără utilizarea metodelor numerice de calcul, aceasta fiind o consecință firească a progreselor obținute în domeniul calculatoarelor electronice, atât în domeniul hardware cât și software.

Metoda elementului finit sau analiza cu elemente finite a apărut ca o consecință a necesității de a calcula structuri de rezistență complexe, pentru care metodele analitice de calcul nu sunt operabile. Această metodă se bazează pe conceptul construirii obiectelor complicate din obiecte mai simple, sau divizarea obiectelor complicate în obiecte mai simple, pentru care se pot aplica scheme de calcul cunoscute. *Ideea de bază în metoda elementului finit este de a găsi soluția unei probleme complicate înlocuind-o prin alta mai simplă* [21],[22],[62].

Eficacitatea metodei constă în următorul fapt: în cazul în care structura se împarte în mai multe părți (numite "**elemente finite**"), pentru fiecare din acestea se pot aplica teoriile de calcul corespunzătoare schematizării adoptate (teoria de placă, bară sau masiv). Împărțirea întregului în părți de dimensiuni mai mici, operație care poartă denumirea consacrată de "**discretizare**", va avea

drept efect obținerea de forme simple pentru elementele finite componente ale structurii. Modelul de calcul utilizat în analiza cu elemente finite este un model aproximativ, obținut prin asamblarea elementelor finite componente, ținând cont de geometria structurii. Conectarea elementelor finite se realizează numai în anumite puncte, numite puncte nodale sau "**noduri**", nodurile reprezentând punctele de intersecție ale liniilor de contur rectilinii sau curbe ale elementelor finite [21]

Discretizarea structurii trebuie să se facă astfel încât în zonele de interes, cum sunt, de exemplu, zonele cu concentratori de tensiune sau în alte zone în care dorim un calcul cât mai exact, dimensiunile elementelor finite trebuie să fie cât mai mici. Trecerea de la zonele cu elemente finite de dimensiuni mici la elementele finite de dimensiuni mari trebuie să se facă prin intermediul elementelor finite de trecere progresive, în scopul eliminării distorsiunilor care se produc la trecerile bruște, conform fig.IV.1.

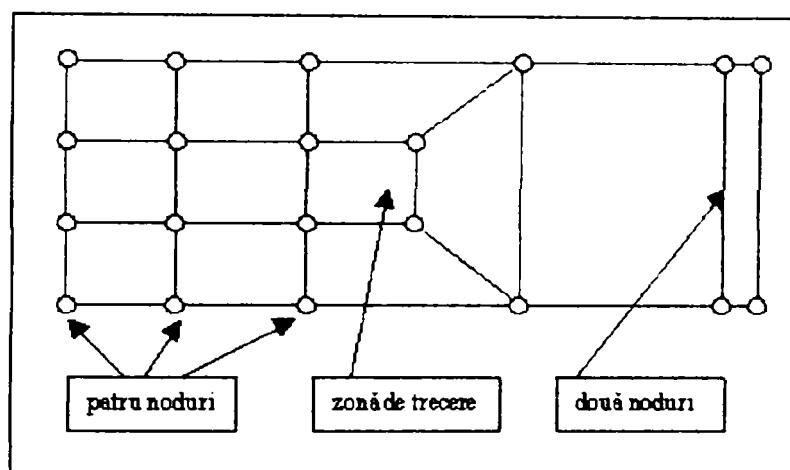


Figura IV.1. Trecerea de la elemente finite cu patru noduri la elemente finite cu două noduri.

Conceptul de *discretizare* are la bază ideea de descompunere unei structuri în părțile ei componente. Aceste elemente fizice componente, prin modelare matematică, devin *elemente finite*.

În fig.IV.2. sunt prezentate câteva tipuri reprezentative de elemente finite. Astfel, din punctul de vedere al configurației geometrice, elementele finite se împart în următoarele categorii [21], [23], [52]:

a). *Elemente finite unidimensionale* (fig. IV.2,a) - sunt cele mai simple elemente finite și au o configurație rectilinie sau curbilinie pentru care la capete sunt plasate nodurile externe sau principale, prin intermediul cărora elementele finite se conectează cu elementele finite învecinate.

b). *Elemente finite bidimensionale* (fig. IV.2,b) - sunt elemente la care configurația geometrică și parametrii asociați se definesc în funcție de două coordonate independente (cel mai simplu element finit bidimensional este elementul finit triunghiular).

c). *Elemente finite tridimensionale* - reprezintă categoria elementelor finite utilizate pentru studiul structurilor de tip masiv sau a altor structuri cu pereți groși, care nu pot fi modelate cu elementele finite enumerate anterior. Acestea pot fi tetraedrale sau hexaedrale (fig. IV.2,c).

Deși se recomandă folosirea aceluiași tip de elemente finite pentru discretizarea unui domeniu de analiză, uneori se pot folosi mai multe tipuri de elemente finite.

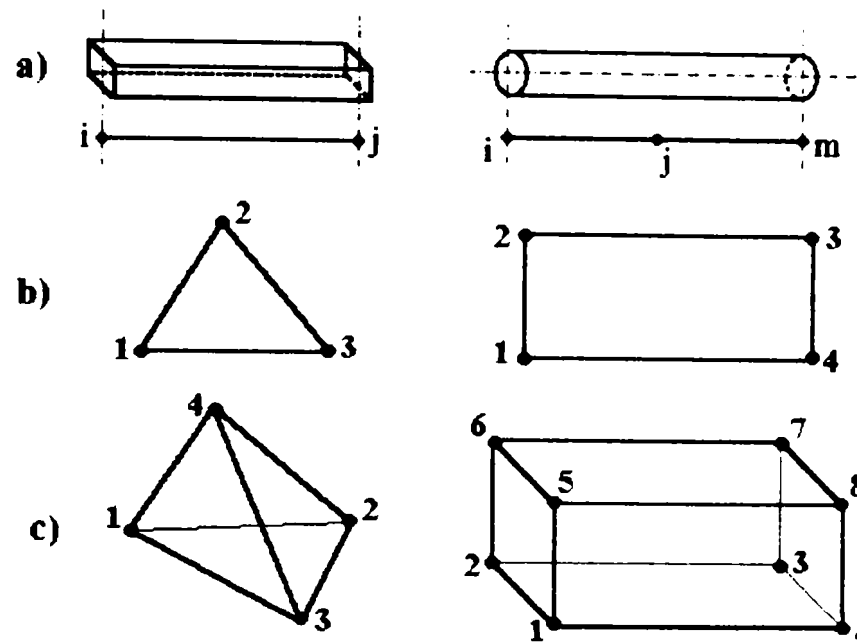


Fig. IV.2. Tipuri de elemente finite:
a). unidimensionale: b). bidimensionale: c). tridimensionale.

În general, nodurile sunt plasate, pe contururile elementului unde elementele adiacente sunt conectate între ele. Caracterul aproximativ al metodei elementului finit rezultă ca urmare a faptului că geometria reală este întotdeauna înlocuită cu o rețea de elemente finite care urmărește forma reală, dar nu o poate reda cu exactitate decât numai pentru anumite geometrii particulare (datorită numărului finit de elemente), iar mărimile necunoscute ale problemei sunt calculate numai în nodurile structurii. Astfel, rezultă, următoarea concluzie: *precizia de calcul crește odată cu creșterea numărului de elemente finite.*

Ca regulă generală, creșterea numărului de elemente conduce la îmbunătățirea soluției problemei. În fig. IV.3. se observă că soluția numerică tinde asimptotic spre soluția exactă, fapt pentru care creșterea numărului de elemente peste o anumită limită N_0 nu mai conduce la o îmbunătățire semnificativă a soluției numerice, deși efortul de calcul poate crește foarte mult.

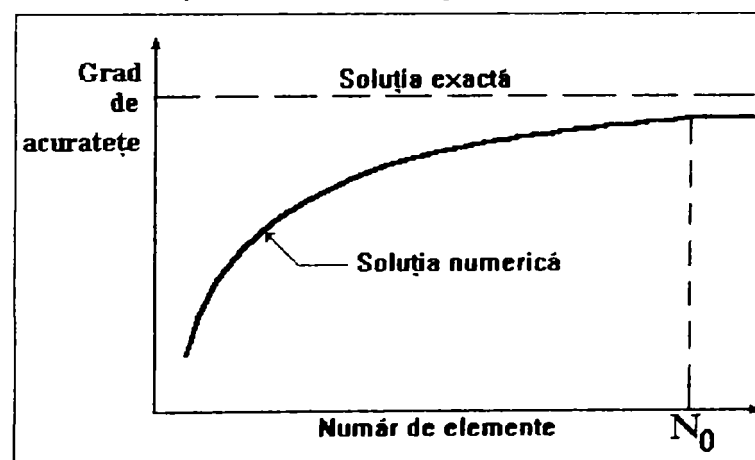


Fig. IV.3. Efectul creșterii numărului de elemente.

IV.1.1. Aplicații ingineresti ale metodei elementului finit

Deși metoda elementelor finite a fost utilizată pe scară largă în domeniul mecanicii structurale, ea poate fi aplicată cu succes și pentru rezolvarea altor tipuri de probleme de inginerie ca, de exemplu, în domeniul conductibilității termice, dinamicii fluidelor, curgerilor de infiltrație și

câmpurilor electro-magnetice. Aplicarea metodei elementelor finite s-a impus ca urmare a faptului că poate rezolva cu ușurință probleme a căror complexitate este dată de configurații geometrice complicate, neomogenități de material, anizotropiei materialelor, materiale compozite, etc.

Datorită performanțelor sale ridicate, metoda elementelor finite a devenit aproape o metodă standard de analiză și proiectare în ingineria construcțiilor, ingineria aerospațială și cea nucleară. Mai mult decât atât, prin posibilitatea de a determina distribuții spațiale ale parametrilor studiați în diferitele corpuri, precum și variația acestora în timp, modelarea numerică cu elemente finite contribuie și la formarea unui nou mod de gândire a analizei ingineresti, aceasta datorită, în principal, posibilității de a vedea în spațiu prin intermediul calculatorului [52].

Se poate spune cu certitudine că o problemă deosebit de importantă în aplicarea metodei elementelor finite este legată de alegerea celei mai potrivite discretizări și a celor mai potrivite tipuri de elemente finite care să conducă la elaborarea unui model de calcul care să asigure posibilitatea obținerii unor rezultate cât mai apropiate de fenomenul real.

IV.1.2. Elemente finite tridimensionale

În vederea efectuării simulării numerice, în continuare, în lucrarea de față, se vor folosi **elemente finite tridimensionale**, mai exact, **elemente finite tetraedrice**. Alegerea elementelor finite tridimensionale (tetraedrice) este justificată deoarece folosirea acestui tip de elemente finite conduce la elaborarea unui model de calcul care asigură posibilitatea obținerii unor rezultate cât mai apropiate de fenomenul real.

Dacă în problemele de elasticitate plană cele mai simple elemente finite sunt elementele triunghiulare, în problemele de elasticitate spațială, similar acestora sunt elementele finite de tip tetraedru cu patru noduri (fig. IV.4).

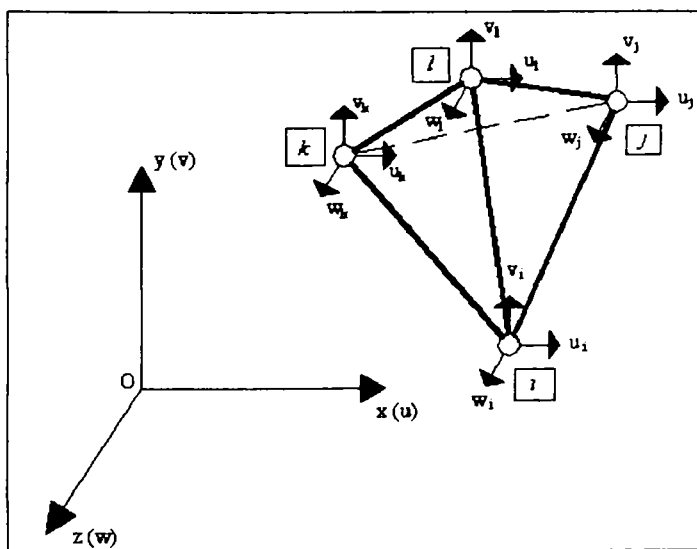


Figura IV.4. Element finit de tip tetraedru, cu patru noduri.

Se impun drept grade de libertate în noduri componentele deplasărilor u, v, w , după cele trei axe ale sistemului cartezian x, y, z . Dacă se admit, pentru aproximarea deplasărilor pe domeniul elementului finit, polinoame de gradul întâi de forma [21]:

$$\begin{aligned} u &= c_1 + c_2x + c_3y + c_4z \\ v &= c_5 + c_6x + c_7y + c_8z \\ w &= c_9 + c_{10}x + c_{11}y + c_{12}z \end{aligned} \tag{IV.1}$$

coeficienții c_1, c_2, \dots, c_{12} , se determină punând următoarele condiții [21]:

$$u(x_i, y_i, z_i) = u_i$$

$$v(x_i, y_i, z_i) = v_i \quad (IV.2)$$

$$w(x_i, y_i, z_i) = w_i$$

unde (x_i, y_i, z_i) reprezintă coordonatele nodului i . Se obține următorul sistem de ecuații [21]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_i = c_1 + c_2 x_i + c_3 y_i + c_4 z_i \\ u_j = c_1 + c_2 x_j + c_3 y_j + c_4 z_j \\ u_k = c_1 + c_2 x_k + c_3 y_k + c_4 z_k \\ u_l = c_1 + c_2 x_l + c_3 y_l + c_4 z_l \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ w_i = c_9 + c_{10} x_i + c_{11} y_i + c_{12} z_i \\ w_j = c_9 + c_{10} x_j + c_{11} y_j + c_{12} z_j \\ w_k = c_9 + c_{10} x_k + c_{11} y_k + c_{12} z_k \\ w_l = c_9 + c_{10} x_l + c_{11} y_l + c_{12} z_l \end{array} \right. \quad (IV.3)$$

Cu notațiile:

$$\{U_e\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ u_l \\ \vdots \\ \vdots \\ w_l \end{Bmatrix}; \quad \{c\} = \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ \vdots \\ \vdots \\ c_{12} \end{Bmatrix}; \quad (IV.4)$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_j & y_j & z_j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_k & y_k & z_k & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & x_l & y_l & z_l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i & z_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j & z_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k & z_k & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_l & y_l & z_l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_i & y_i & z_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_j & y_j & z_j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_k & y_k & z_k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x_l & y_l & z_l \end{bmatrix}, \quad (IV.5)$$

se obține ecuația matriceală cunoscută [21]:

$$\{U_e\} = [A] \cdot \{c\} \quad (IV.6)$$

Putem scrie:

$$\{c\} = [A]^{-1} \cdot \{U_e\} \quad (IV.7)$$

Rezolvarea ecuației matriceale de forma (IV.7) este dificilă, mai ales în cazul elementelor finite cu un număr mare de noduri. Conform relațiilor (IV.1) pentru calculul deplasărilor pe domeniul elementului finit s-au folosit polinoame de interpolare de gradul unu, de forma [21], [23]:

$$f(x, y, z) = c_1 + c_2x + c_3y + c_4z \quad (IV.8)$$

Presupunând cunoscute deplasările din noduri, se pot scrie condiții de forma $f_i = f(x_i, y_i, z_i)$. Se obține următorul sistem de ecuații [13]:

$$\begin{aligned} f_i &= c_1 + c_2x_i + c_3y_i + c_4z_i \\ f_j &= c_1 + c_2x_j + c_3y_j + c_4z_j \\ f_k &= c_1 + c_2x_k + c_3y_k + c_4z_k \\ f_l &= c_1 + c_2x_l + c_3y_l + c_4z_l \end{aligned} \quad (IV.9)$$

Din rezolvarea sistemului de ecuații (IV.9) se obțin coeficienții c_i , unde $i = 1,2,3,4$, ai polinomului (IV.8), sub forma [21]:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{1}{6V} (\alpha_i f_i + \alpha_j f_j + \alpha_k f_k + \alpha_l f_l) & c_3 &= \frac{1}{6V} (\gamma_i f_i + \gamma_j f_j + \gamma_k f_k + \gamma_l f_l) \\ c_2 &= \frac{1}{6V} (\beta_i f_i + \beta_j f_j + \beta_k f_k + \beta_l f_l) & c_4 &= \frac{1}{6V} (\mu_i f_i + \mu_j f_j + \mu_k f_k + \mu_l f_l) \end{aligned} \quad (IV.10)$$

unde:

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix} \quad (IV.11)$$

$$\alpha_i = \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_k & y_k & z_k \\ x_l & y_l & z_l \end{vmatrix}; \beta_i = -\begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_k & z_k \\ 1 & y_l & z_l \end{vmatrix}; \gamma_i = -\begin{vmatrix} x_j & 1 & z_j \\ x_k & 1 & z_k \\ x_l & 1 & z_l \end{vmatrix}; \mu_i = \begin{vmatrix} x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \\ x_l & y_l & 1 \end{vmatrix} \quad (IV.12)$$

Prin permutări circulare se obțin ceilalți coeficienți din relațiile (IV.10). Înlocuind soluțiile (IV.10) în relația (IV.8) se obține următoarea expresie a funcției de interpolare [21]:

$$f(x, y, z) = N_i(x, y, z) \cdot f_i + N_j(x, y, z) \cdot f_j + N_k(x, y, z) \cdot f_k + N_l(x, y, z) \cdot f_l \quad (IV.13)$$

unde:

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{6V} (\alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y + \mu_i z) \\ N_j &= \frac{1}{6V} (\alpha_j + \beta_j x + \gamma_j y + \mu_j z) \\ N_k &= \frac{1}{6V} (\alpha_k + \beta_k x + \gamma_k y + \mu_k z) \\ N_l &= \frac{1}{6V} (\alpha_l + \beta_l x + \gamma_l y + \mu_l z) \end{aligned} \quad (IV.14)$$

Utilizând relația (IV.13), se pot obține expresiile finale ale funcțiilor de deplasare date de relația (IV.1), care vor fi [21]:

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= N_i u_i + N_j u_j + N_k u_k + N_l u_l \\ v(x, y, z) &= N_i v_i + N_j v_j + N_k v_k + N_l v_l \\ w(x, y, z) &= N_i w_i + N_j w_j + N_k w_k + N_l w_l \end{aligned} \quad (IV.15)$$

Vectorul funcțiilor de deplasare pe element, $\{U\}$, este [13]:

$$\{U\} = \begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = [N] \cdot \{U_e\}$$

După înlocuiri, rezultă:

$$\{U\} = \begin{bmatrix} N_i & N_j & N_k & N_l & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_i & N_j & N_k & N_l & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & N_i & N_j & N_k & N_l \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ u_l \\ v_i \\ \cdot \\ \cdot \\ w_l \end{Bmatrix} \quad (IV.16)$$

Pentru problemele de elasticitate spațială, vectorul deformație specifică și vectorul tensiune au forma [21]:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix}; \quad \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} \quad (IV.17)$$

Ținând cont că funcțiile N_i date de relațiile (IV.14) sunt funcții de variabilele x, y, z , iar vectorul $\{U_e\}$ nu depinde de aceste variabile, rezultă:

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{U_e\} \quad (IV.18)$$

unde:

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \frac{\partial N_3}{\partial z} & \frac{\partial N_4}{\partial z} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (IV.19)$$

reprezintă matricea de interpolare a deformațiilor specifice pe element.

Matricea $[K_e]$ de rigiditate a elementului se calculează cu relația cunoscută [21]:

$$[K] = \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot [B] \cdot dV \quad (IV.20)$$

iar tensiunile vor fi:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} = [D] \cdot [B] \cdot \{U_e\} \quad (IV.21)$$

unde matricea $[D]$, reprezintă matricea ce elasticitate a materialului pentru starea de tensiune triaxială, sau matricea de rigiditate a materialului, care este dată de relația:

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.22}).$$

În aplicațiile practice, metoda elementelor finite conduce la sisteme cu un număr foarte mare de ecuații (mergând până la dimensiuni de ordinul 10 000). Este evident că pentru rezolvarea unor asemenea sisteme, este nevoie pe de o parte de calculatoare electronice cu o capacitate corespunzătoare, pe de altă parte de metode numerice speciale.

Deși se pot realiza programe proprii de analiză cu elemente finite, este de dorit ca să se utilizeze programe de firmă eficiente (cum sunt SAP, ANSYS, COSMOS, TERMIC-2N, etc.) care au avantajul utilizării unor:

- tipuri de elemente eficiente (în funcție de specificul problemei analizate);
- metode de programare eficiente și exploatarea cu maximum de eficiență a posibilităților oferite de echipamentele de calcul;
- tehnici numerice adecvate.

IV.2. OBTINEREA MODELULUI NUMERIC, CU AJUTORUL METODEI ELEMENTULUI FINIT, A DISTRIBUȚIEI TENSIUNILOR TERMICE ȘI MECANICE ÎN INTERIORUL CILINDRULUI DE LAMINARE, PRECUM ȘI A CÂMPULUI TERMIC PE PERIOADA LAMINĂRII

Folosită la început în domeniul calculului mecanic al structurilor, în special în industria aeronautică, metoda elementelor finite și-a extins ulterior aria de utilizare în întreaga sferă de activitate a inginerului, fiind folosită azi cu succes la soluționarea tuturor problemelor continuului material.

Reflectarea cât mai fidelă a comportării structurilor și materialelor este o exigență majoră cerută de proiectanții metodelor de calcul pe care le folosesc, constituind condiția principală pentru dimensionarea riguroasă și realizarea, pe această cale, a unor economii importante de materiale, energie și manoperă. Metoda elementelor finite este, din acest punct de vedere, superioară celorlalte metode de calcul. Posibilitatea investigării mai precise a comportării materialelor a încurajat, de asemenea, studierea și răspândirea materialelor înlocuitoare, ceea ce constituie un alt avantaj economic al acestei metode.

Interesul pentru metoda elementului finit este reflectat, printre altele, și de creșterea numărului de publicații și de manifestări științifice care îi sunt consacrate în întreaga lume. Semnificativă este și creșterea numărului programelor de calcul cu elemente finite, faptul că firmele elaboratoare de soft se preocupă de furnizarea acestor produse odată cu echipamentele de calcul în

calitate de soft de bază și, de asemenea, apariția calculatoarelor specializate pentru calculul de elemente finite și a componentelor hardware, cu programe încorporate, care fac apte calculatoarele de uz general pentru calculul cu elemente finite, prin simpla instalare a acestor componente în calculatoare.

Un moment semnificativ în evoluția folosirii metodei este cel actual, caracterizat prin răspândirea microcalculatoarelor și a calculatoarelor personale. Datorită disponibilității lor mult mai mari față de sistemele puternice de calcul, calculatoarele mici pot contribui, simultan, la extinderea, în continuare, a utilizării metodei și la însușirea ei de către cei interesați.

IV.2.1. Etapele obținerii modelului numeric în vederea determinării câmpurilor termice, a distribuției tensiunilor termice și mecanice în interiorul cilindrilor, pe perioada laminării

În rezolvarea numerică a distribuției tensiunilor mecanice și termice în interiorul cilindrului, precum și a distribuției câmpului termic pe perioada laminării prin metoda elementului finit se parcurg anumite etape bine determinate, și anume:

➤ **Etapa de preprocesare a modelului numeric**, care furnizează datele de intrare pentru programul COSMOS/M. Această etapă cuprinde următorii pași:

- *stabilirea domeniului de analiză*

În această etapă, ne propunem să determinăm distribuția tensiunilor mecanice și termice în interiorul cilindrului, precum și distribuția câmpului termic pe perioada laminării.

- *generarea geometriei domeniului de analiză ales* cu ajutorul modulului GEOSTAR
- *discretizarea domeniului de analiză în elemente finite*, ceea ce presupune alegerea tipului de element finit, a constantelor caracteristice, stabilirea numărului de noduri pentru fiecare element și, în final, generarea rețelei de discretizare.
- *stabilirea proprietăților termo-fizice de material*, ținând cont de materialul din care sunt turnați cilindrii de laminare, precum și materialul ce urmează a se lamina.
- *implementarea condițiilor la limită*

➤ **Etapa de postprocesare a modelului numeric**, care include lansarea în execuție a programului și afișarea rezultatelor obținute sub formă calitativă și cantitativă.

IV.2.1.1. Etapa de preprocesare a modelului numeric

În cadrul etapei de preprocesare este stabilit, în primul rând, domeniul de analiză, în vederea determinării distribuției tensiunilor mecanice și termice în interiorul cilindrului, precum și distribuția câmpului termic pe perioada laminării.

Analiza a fost efectuată pe cilindrii de laminare, turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, utilizați la laminarea profilului I, pe Laminorul de profile mijlocii, din cadrul S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara.

Cei doi cilindri, precum și secvența de laminare studiată este prezentată în fig. IV.5.



Figura IV.5. Laminarea profilului I.

Alegerea tipului de element finit potrivit analizei ce urmează a se efectua se face ținând cont de forma geometrică ce urmează a se discretiza, precum și de lista de elemente disponibile în programul COSMOS/M. De cele mai multe ori, tipul elementelor finite care urmează a fi folosite derivă din tipul problemei de rezolvat și structura domeniului de analiză a acesteia [52].

Deoarece domeniul de analiză este unul spațial, vom alege ca tip de element finit pentru discretizare unul din categoria "Elemente finite de volum (tridimensionale)" și anume **TETRA4** (element tip solid tetraedral cu 4 noduri). Mărimea elementelor finite și, implicit, desimea rețelei de discretizare influențează în mod direct convergența soluției și deci trebuie aleasă cu mult discernământ. Dacă mărimea elementelor este mică (rețea foarte deasă), se anticipează o soluție finală mai bună, dar și un timp de calcul mai ridicat. Uneori, pentru discretizarea domeniului de analiză se folosesc elemente finite de mărimi diferite. Ca regulă generală, elementele mai mici se aleg pentru zonele cu variații mari ale mărimilor de câmp.

a). Generarea rețelei de discretizare

Generarea rețelei de discretizare se face pe suprafețe definite anterior, ținându-se cont de faptul că toate nodurile și elementele rețelei sunt numerotate. Este de reținut faptul că s-au obținut, la discretizare, un număr total de **253613 elemente** și **49768 noduri**, repartizate astfel:

- **la discretizarea cilindrilor de laminare:**
 - **238207 elemente**
 - **45985 noduri**
- **la discretizarea semifabricatului (profilului I):**
 - **15406 elemente**
 - **3783 noduri**

Discretizarea plană a cilindrilor de laminare și a profilului laminat este prezentată în fig.IV.6, iar discretizarea spațială în fig. IV.7.

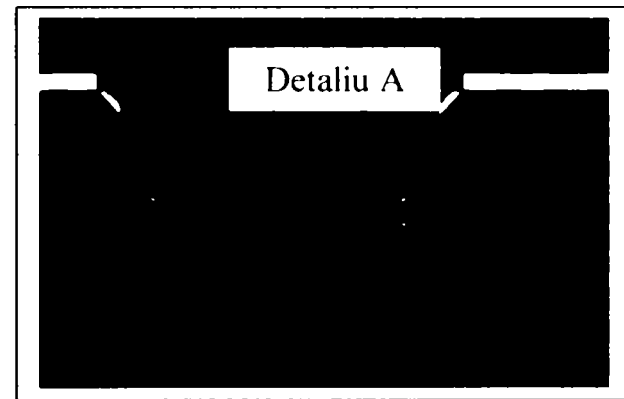
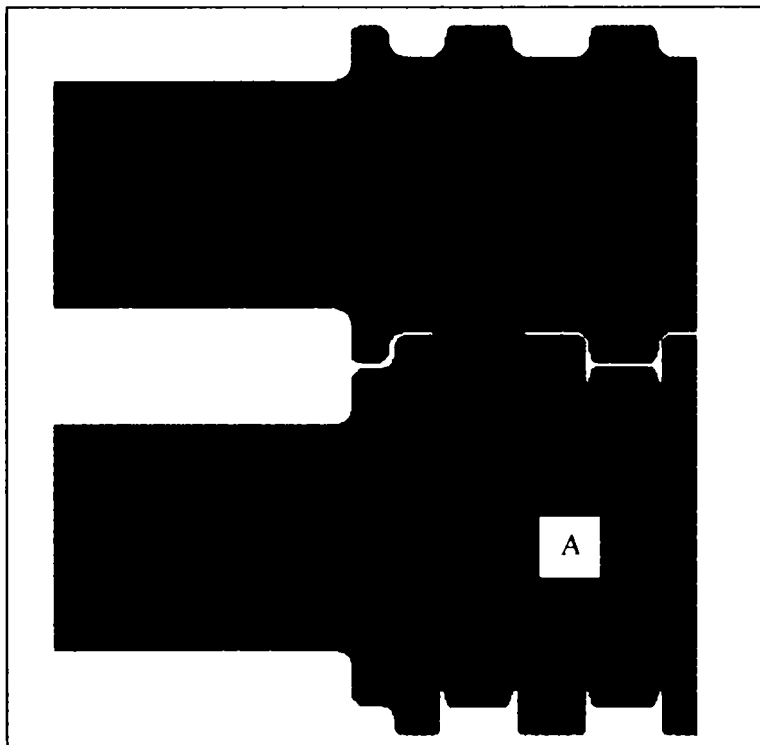


Figura IV.6. Schița modelării plane a cilindrilor de laminare și a profilului I laminat.

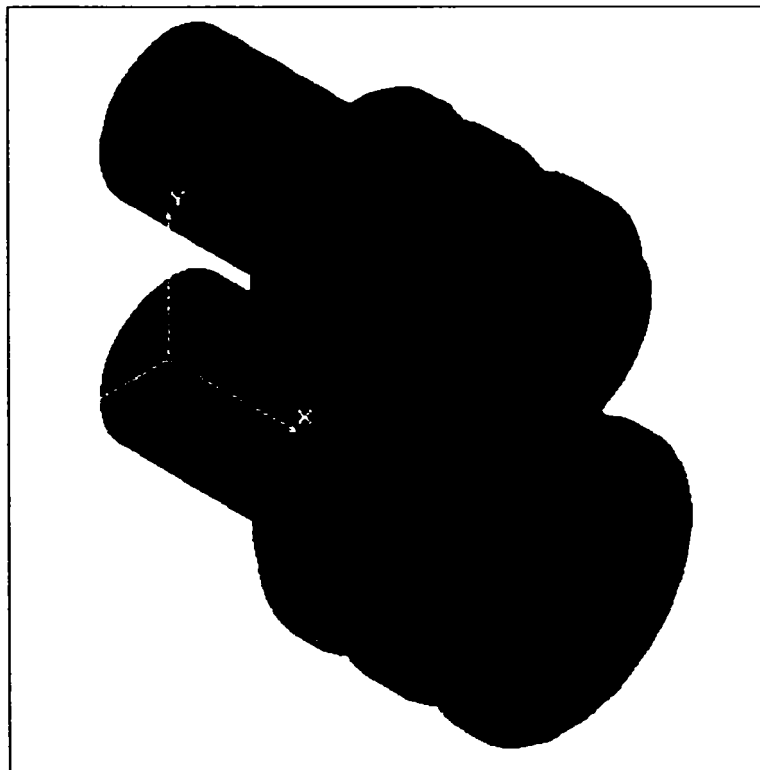


Figura IV.7. Schița modelării spațiale a cilindrilor de laminare.

Numărul mare de elemente finite tetraedrale în care a fost discretizată structura de rezistență a cilindrilor de laminare, respectiv a profilului I, a permis o modelare foarte apropiată de geometria reală a cilindrilor de laminare. În vederea stabilirii proprietăților termo-fizice de material, se ține cont de faptul că oțelul din care sunt turnați cilindrii de laminare este un oțel hipereutectoid tip Adamit, marca OT-A3, având compoziția chimică prezentată în tab. IV.1 [122].

Tabelul IV.1. Compoziția chimică a oțelului hipereutectoid tip Adamit (I.T.E.770-89) [122].

Oțel marca	Compoziție chimică, %									
	C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Ni _{max}	Mo	Cu _{max}	Ti _{max}
OTA3	1,8-2,0	0,6-0,8	0,7-0,9	0,04	0,02	1,0-1,2	1,6-2,0	0,3-0,5	0,2	0,06

Proprietățile termo-fizice și de material ale oțelului hipereutectoid, tip Adamit, din care sunt turnați cilindrii de laminare sunt:

- coeficientul de dilatare liniară: $\alpha = 13 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$
- conductivitatea termică: $\lambda = 31 \frac{W}{m \cdot K}$;
- căldura specifică: $c_p = 620 \frac{J}{kg \cdot K}$;
- rezistența la oboseală: $\sigma_{ob} = 35 daN/mm^2$;
- regim de funcționare (nr. cicluri până la uzare): 400 cicluri;
- temperatura inițială: $T_{inițială} = 20^\circ C$.

Oțelul care se laminează, luat în studiu în prezenta simulare, este un oțel cu destinație generală (OL 37), având compoziția chimică prezentată în tab. IV.2 [11].

Tabelul IV.2. Compoziția chimică a oțelului care se laminează.

Marca de oțel	Compoziția chimică, [%]				
	C	Mn	Si	P _{max}	S _{max}
OL 37 (STAS 500/1,2 - 80)	max. 0,20	max. 0,80	max. 0,07	0,06	0,06

Proprietățile termo-fizice și de material ale oțelului care se laminează (OL37), respectiv ale profilului I, sunt [11]:

- coeficientul de dilatare liniară: $\alpha_{100^\circ C} = 12,2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$; $\alpha_{700^\circ C} = 14,9 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$;
- conductivitatea termică: $\lambda_{20^\circ C} = 50 \frac{W}{m \cdot K}$; $\lambda_{800^\circ C} = 25 \frac{W}{m \cdot K}$;
- căldura specifică: $c_{p20^\circ C} = 452 \frac{J}{kg \cdot K}$; $c_{p600^\circ C} = 753,3 \frac{J}{kg \cdot K}$; $c_{p800^\circ C} = 933,3 \frac{J}{kg \cdot K}$;
- temperatura inițială (de laminare): $T_{laminare} = 800,850^\circ C$.

b). Stabilirea deplasărilor impuse pe contur, în vederea elaborării modelului de calcul

Pentru efectuarea cu succes a simulării propuse este necesară impunerea unor condiții la limită pentru cei doi cilindrii de laminare, precum și pentru profilul laminat.

Pentru modelare se ține cont de faptul că cei doi cilindrii reprezintă două corpuri solide situate în planul tridimensional. Pentru a putea fi efectuată simularea se impun condițiile la limită (respectiv, așa numitele "deplasări împiedicate"), prezentate, schematic, în fig. IV.8 și IV.9.

- pentru cilindrul superior, deplasările de-a lungul axelor OX și OZ nu sunt posibile (sunt "împiedicate"), adică $UX = 0$, respectiv $UZ = 0$, datorită faptului că cilindrul este fixat în lagăre; deplasarea de-a lungul axei OY se consideră posibilă datorită faptului că asupra cilindrilor va acționa forța de laminare, permițându-i deplasarea de-a lungul acestei axe ($UY \neq 0$);
- pentru cilindrul inferior, deplasările sunt imposibile de-a lungul celor trei axe de coordonate, adică $UX = 0$, $UY = 0$ și $UZ = 0$;

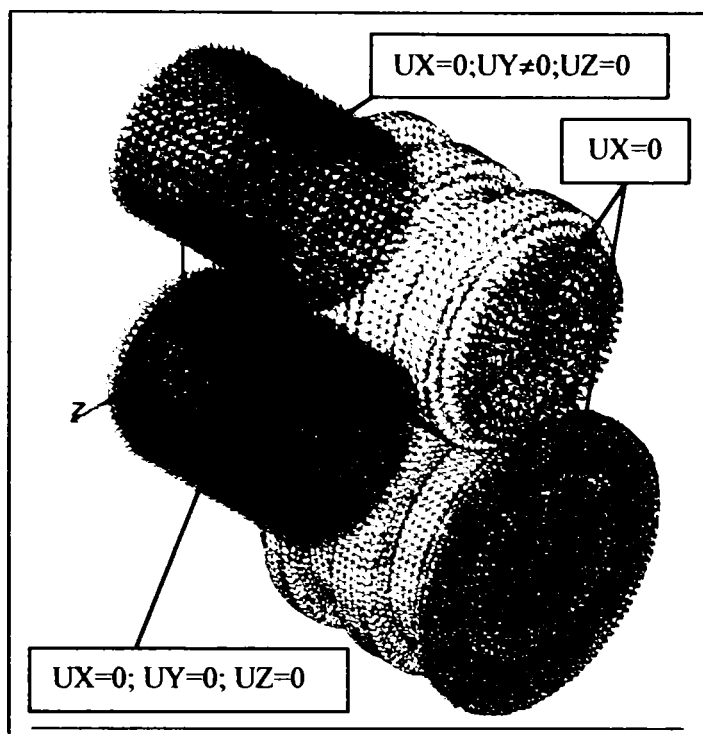


Figura IV.8. Prezentarea spațială a deplasărilor impuse.

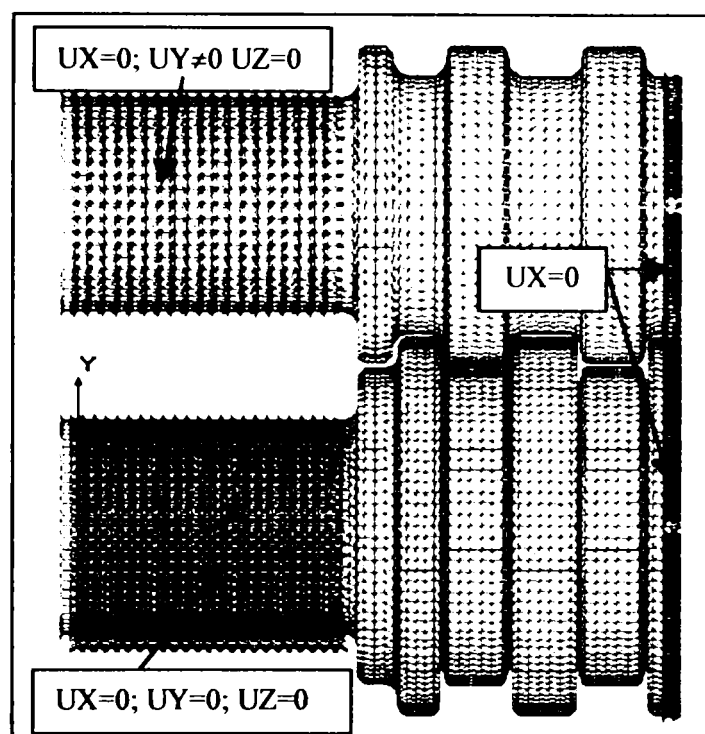


Figura IV.9. Prezentarea în plan a deplasărilor impuse.

IV.2.1.2. Etapa de postprocesare a modelului numeric. Obținerea rezultatelor

Etapa de postprocesare a modelului numeric include lansarea în execuție a programului COSMOS/M 2.5. Programul COSMOS/M permite vizualizarea rezultatelor finale în două moduri: calitativ și cantitativ [104].

Modalitatea de vizualizare *calitativă* a rezultatelor implică o reprezentare în hărți de culori a câmpului termic studiat, permițând o viziune globală asupra acestuia la un moment dat a încălzirii sau asupra evoluției în timp a temperaturilor în întreg domeniul de analiză.

Modalitatea de vizualizare *cantitativă* presupune furnizarea datelor, sub formă tabelară, în fiecare nod al rețelei de discretizare sau în anumite noduri specificate anterior. Această modalitate permite trasarea unor grafice de variație a mărimilor studiate și compararea rezultatelor cu cele obținute pe cale experimentală. Se pot stabili, astfel, cu mare exactitate, erorile care apar în modelul numeric față de valorile obținute experimental și proveniența acestor erori (datorită ipotezelor simplificatoare, a modelului numeric, a rețelei de discretizare etc.) Această modalitate este cea care permite validarea "în profunzime" a metodologiei alese.

IV.2.2. Analiza distribuției de temperatură (câmpuri termice) în cilindrii de laminare

După cum s-a prezentat în capitolele anterioare, cunoașterea distribuției de temperatură în cilindri de laminare, în timpul exploatării, este deosebit de importantă, deoarece are o influență pronunțată asupra durabilității în exploatare, respectiv asupra distribuției microstructurii, a caracteristicilor mecanice, a deformațiilor și a temperaturilor [55].

În general, pentru calculul temperaturii pe parcursul încălzirii sau răcirii pieselor cu forme geometrice simple există binecunoscutele nomograme. Apariția și răspândirea tehnicii de calcul relativ ieftine sub forma PC-urilor (Personal Computer), pune la îndemâna inginerului un instrument de calcul foarte valoros, care poate oferi rezultate mult mai rapid și mult mai precise. Folosind avantajele oferite de puterea de calcul electronic se pot rezolva prin metode numerice de aproximare, problemele de transfer de căldură, folosind metoda diferențelor finite sau cea a elementelor finite, în funcție de complexitatea geometriei corpului studiat.

Pentru determinarea distribuției de temperatură, în cazul cilindrilor utilizați la laminarea profilului I, datorită formei destul de complicate a cilindrilor calibrați, precum și a semifabricatului (profilul I), am optat pentru programul COSMOS/M versiunea 2.5, care utilizează metoda elementului finit, acesta fiind un program specializat care dispune de baze de date detaliate cu privire la proprietățile termofizice și mecanice.

Influența distribuției de temperatură în cilindrii de laminare asupra durabilității în exploatare se datorează faptului că între cilindrii de laminare și semifabricatul care se laminează există o diferență mare de temperatură (datorită faptului că cilindrii sunt răciți cu apă iar semifabricatul, în timpul procesului de laminare, are o temperatură ridicată). În aceste condiții, un rol deosebit în menținerea integrității cilindrilor în timpul procesului de laminare îl are răcirea acestora cu apă. Nerespectarea regimului de răcire poate determina apariția unor tensiuni termice în cilindri.

La S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, în cazul laminoarelor de profile mijlocii, caja finisoare (M14), răcirea se aplică pe două suprafețe (fig.IV.10) iar laminatul ajunge la această cajă cu o temperatură cuprinsă în intervalul 830...845°C, fapt pentru care în exploatare s-au înregistrat o serie întreagă de cilindri ruși datorită distribuției neuniforme a apei de răcire (sau, uneori, chiar lipsa acesteia), precum și din cauza temperaturii prea scăzute cu care laminatul ajunge la această cajă.

Datorită acestor situații înregistrate în practica industrială, consider utilă simularea procesului, cu ajutorul metodei elementului finit, în vederea cunoașterii fenomenelor care au loc în timpul laminării și a putea aplica corecții acolo unde este cazul.

Astfel, pentru a simula procesul care are loc în practica industrială se consideră cazurile de încărcare cu temperaturi de 800 și 850°C (pentru a cuprinde întreg intervalul de temperaturi cu care ajunge laminatul la caja M14), cu apa de răcire aplicată pe două suprafețe.

În procesul de laminare la cald, suprafața cilindrilor de lucru este încălzită și răcită periodic la fiecare rotație a cilindrului de lucru. În fig.IV.10 se prezintă schema principiului de deformare plastică în procesul de laminare.

Laminatul 1, în stare incandescentă, se laminează între cilindrul superior 2 și cel inferior 3, conform schemei de laminare. În timpul laminării cilindrii sunt răciți cu jeturile de apă 5, transmisă prin colectoarele 4, pe care sunt montate duze de pulverizare.

Din analiza logică a procesului de laminare rezultă că se poate cunoaște principiul de repartizare a temperaturii pe suprafața cilindrului de lucru, atât în zona în care se produce deformarea plastică a metalului, cât și pe porțiunile de pe suprafața cilindrului care nu sunt în contact direct cu metalul incandescent care se laminează. Dacă se consideră un punct material sau o suprafață elementară pe tăblia cilindrului, aceasta își modifică temperatura în timpul unei rotații, în

funcție de unghiul φ pe care îl parcurge în procesul de laminare. Variația temperaturii în timpul rotației cilindrilor se repetă ciclic cu aceleași valori în condiții identice de exploatare, când cilindrii de laminare ajung în regim termic staționar sau cvasistaționar și cu valori diferite în cazul regimului termic nestaționar.

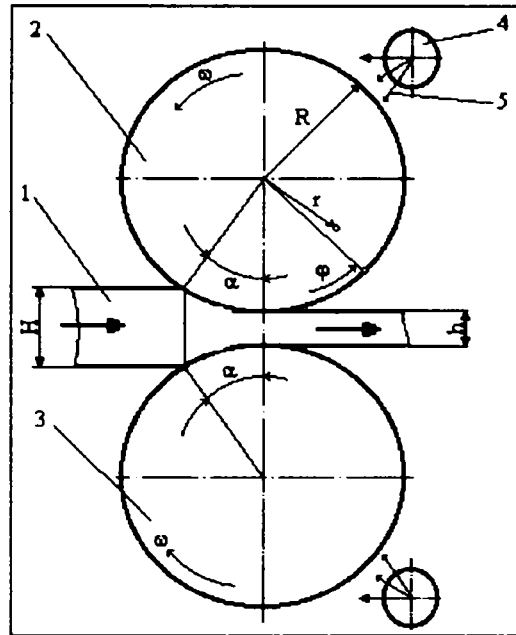


Figura IV.10. Schema principiului de deformare plastică în procesul de laminare la cald

IV.2.2.1. Determinarea distribuției de temperatură în cazul aplicării apei de răcire pe două suprafețe

În vederea determinării distribuției de temperatură în cilindri, în timpul procesului de laminare la cald, în fig.IV.11. sunt prezentate suprafețele pe care este aplicată apa de răcire. Conform programului de simulare, acestesuprafețe sunt numerotate cu 179 și 68.

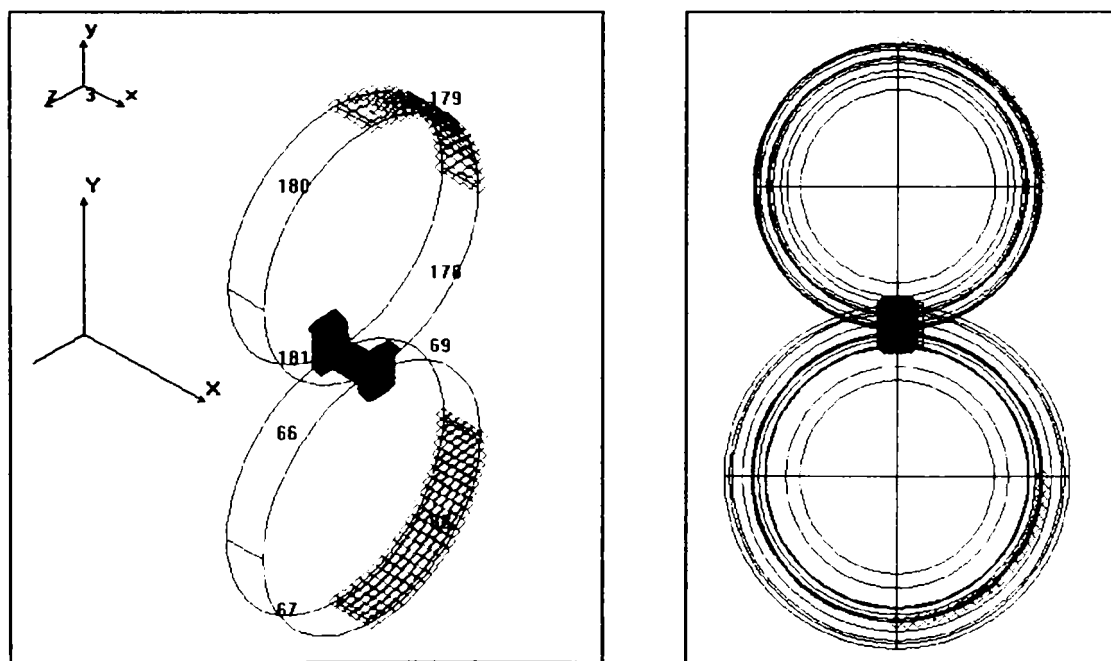
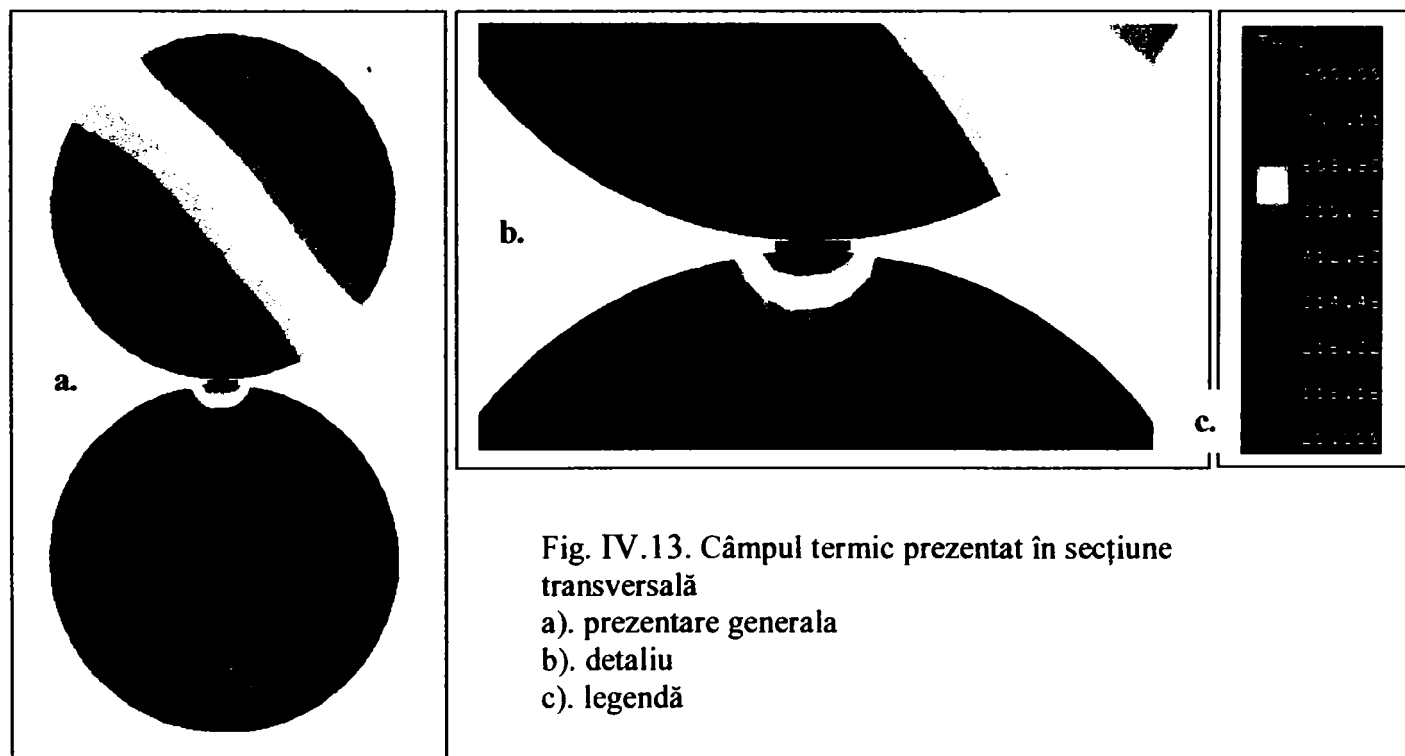
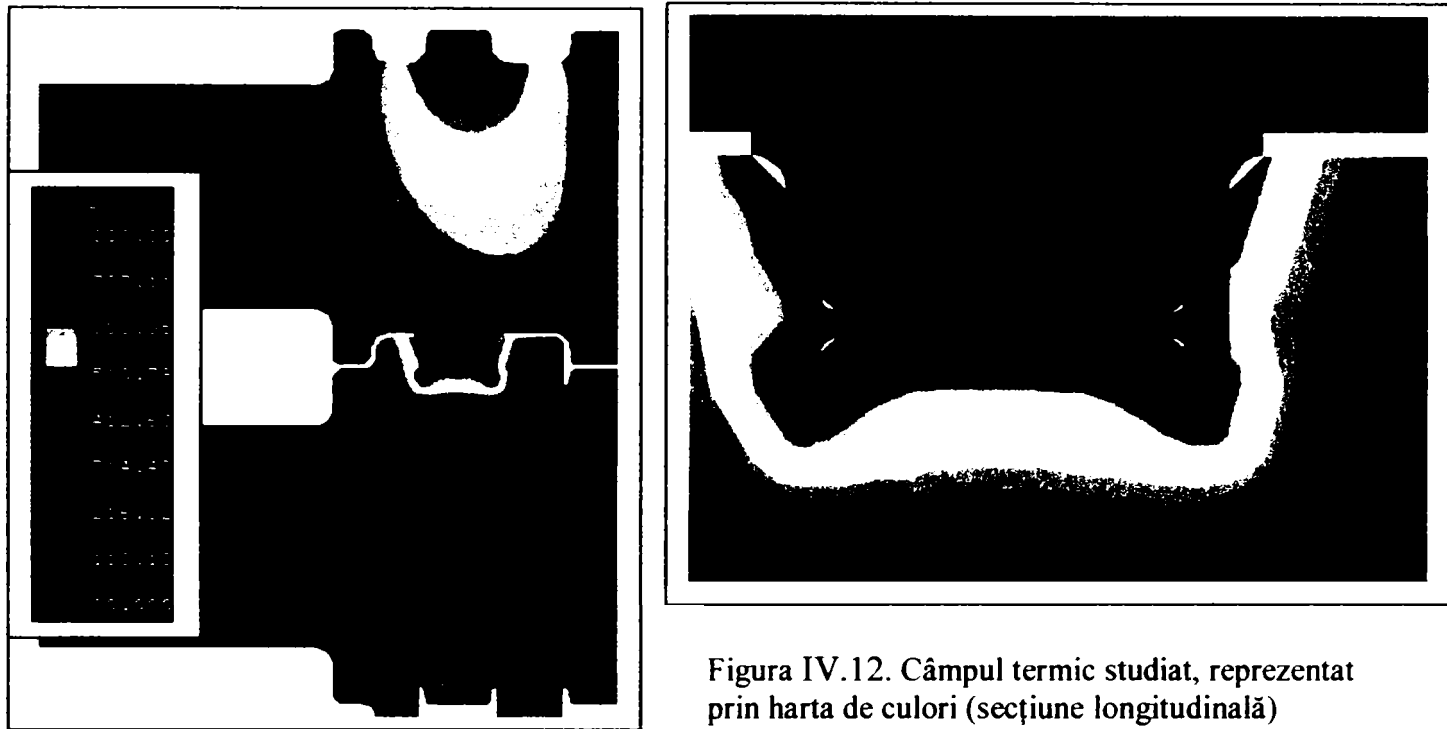


Figura IV.11. Prezentare suprafețelor de aplicare a apei de răcire.

a). Cazul I - temperatura de laminare este 800°C

Primul caz de simulare folosește, ca și date inițiale, temperatura laminatului (profilului I), respectiv $T_{\text{laminat}} = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$, și a apei de răcire $T_{\text{apă răcire}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

În fig. IV.12, IV.13, sunt prezentate secțiunile longitudinale și transversale ale cilindrilor de laminare, cu scopul de a se pune în evidență câmpul termic (prin vizualizare calitativă)



Cu ajutorul programului de simulare a fost trasat, prin intermediul nodurilor situate pe circumferința cilindrului, graficul variației de temperatură. Nodurile pentru care a fost trasat acest grafic sunt prezentate în fig. IV.14 și IV.15.

Distanța dintre primul și ultimul nod reprezintă lungimea coardei care leagă cele două puncte și are valoarea calculată de 185,1947 mm (ceea ce în grafic se regăsește ca fiind egală cu unitatea). Din graficul prezentat în figură se poate observa faptul că, pentru nodul 35126, temperatura a fost de 676,61°C, în timp ce pentru nodul 35156, aceasta a scăzut până la 528,86°C.

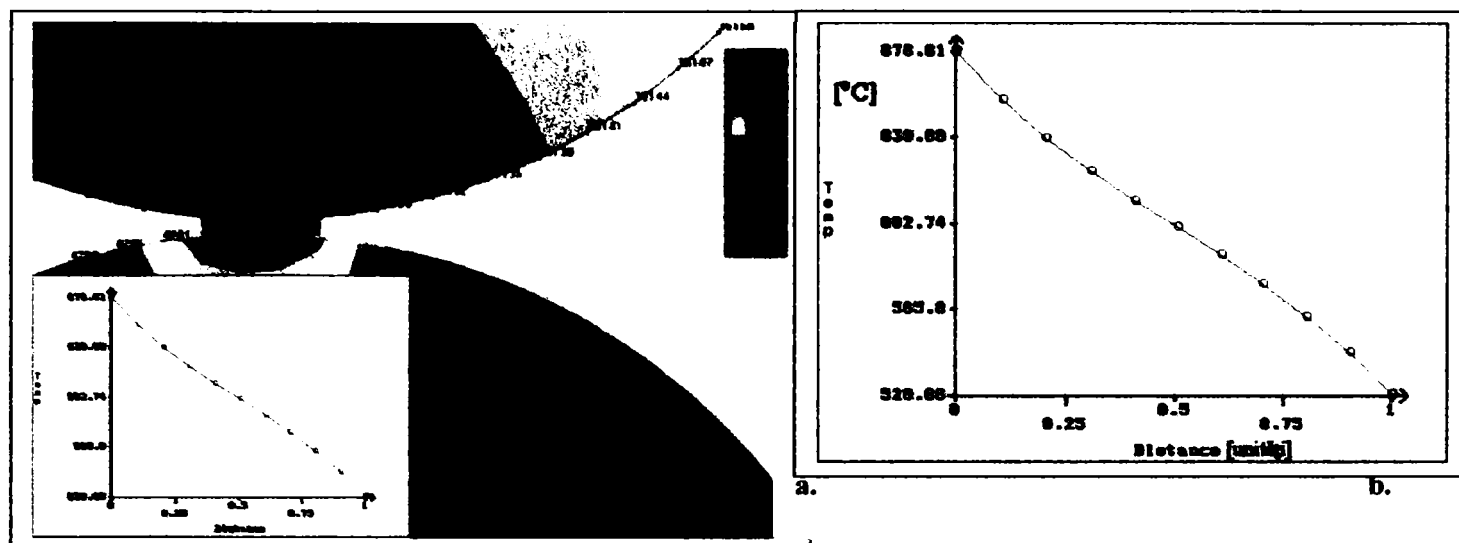


Figura IV.14. Variația de temperatură în cazul laminării la temperatura de 800°C, cu aplicarea apei de răcire pe două suprafețe: *a* - harta de culori; *b* - graficul prin puncte.

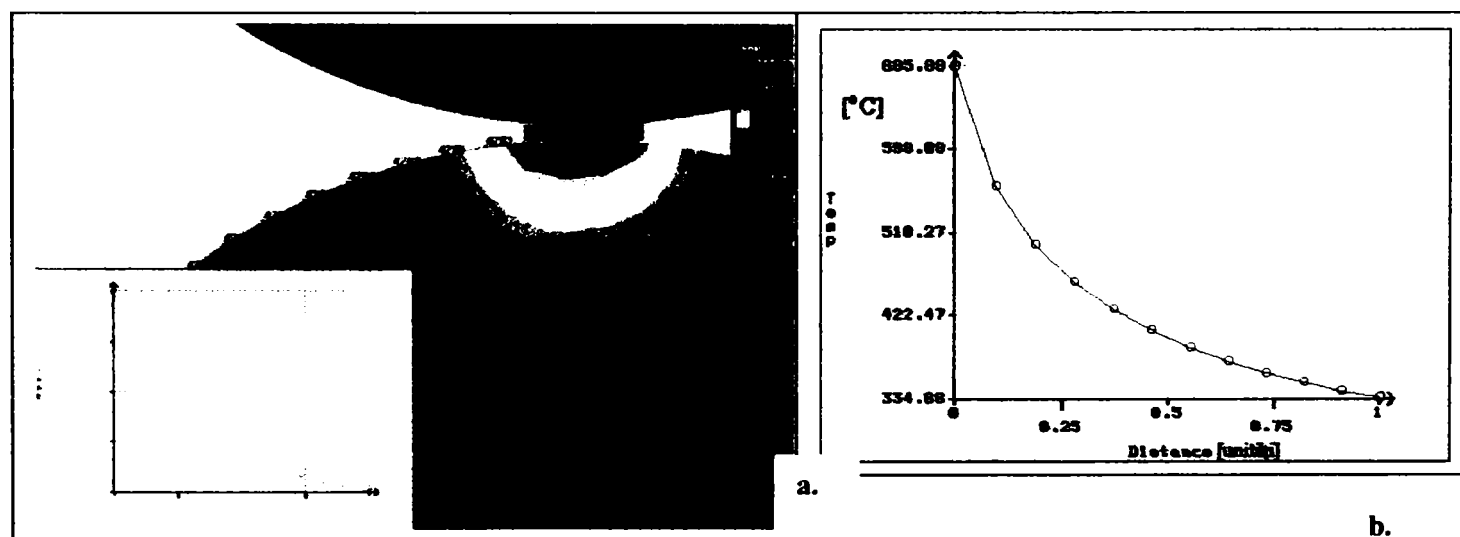


Figura IV.15 Variația de temperatură în cazul laminării la temperatura de 800°C, cu aplicarea apei de răcire pe două suprafețe: *a* - harta de culori; *b* - graficul prin puncte.

b). Cazul II - temperatura de laminare este 850°C

Pentru cel de-al doilea caz de simulare temperatura laminatului este $T_{\text{laminat}} = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$, iar apa de răcire $T_{\text{apă răcire}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

În fig. IV.16, IV.17, sunt prezentate secțiunile longitudinale și transversale ale cilindrilor de laminare, cu scopul de a se pune în evidență câmpul termic (prin vizualizare calitativă)

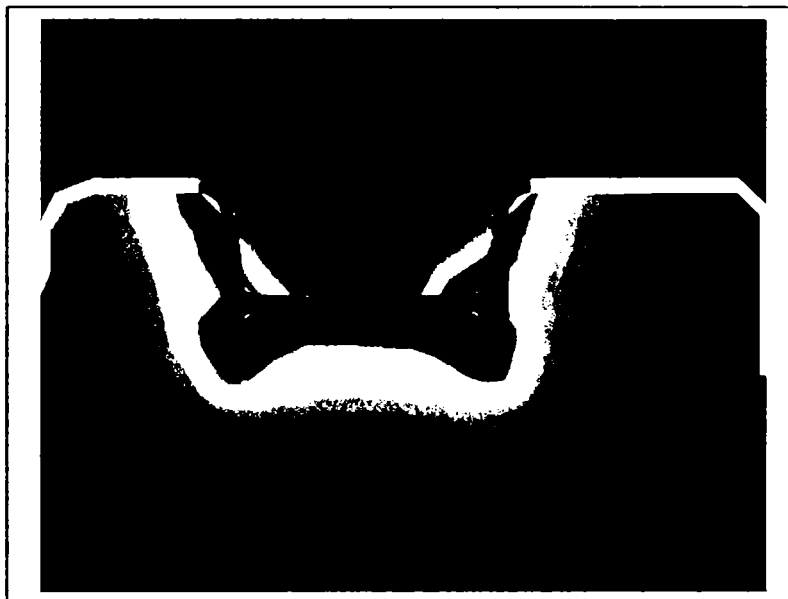
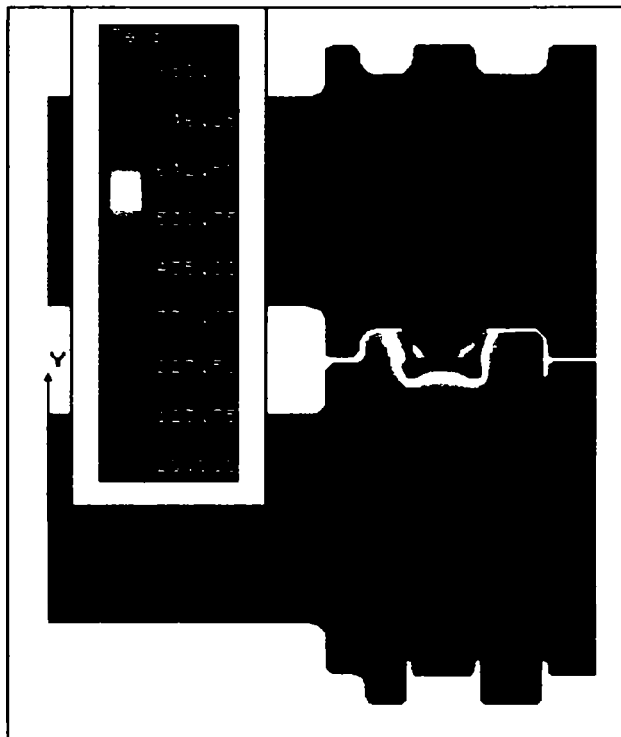


Figura IV.16. Câmpul termic studiat, reprezentat prin harta de culori (secțiune longitudinală)

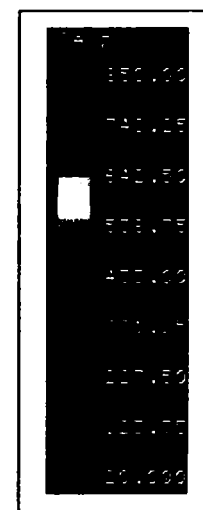
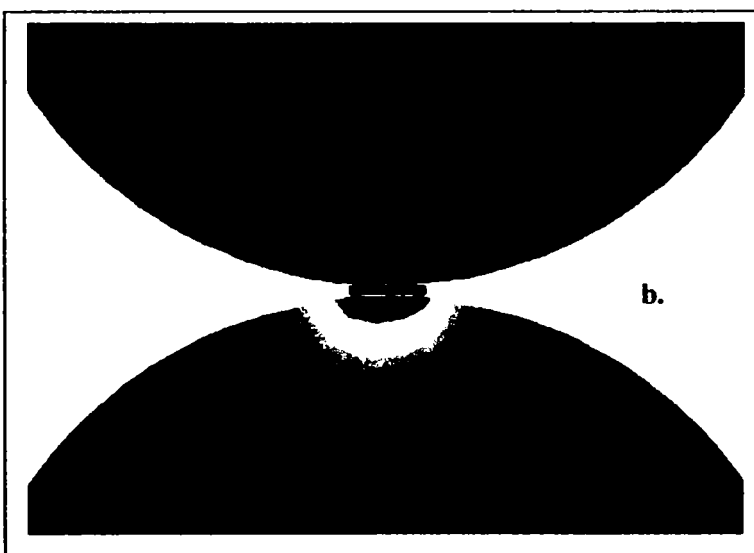
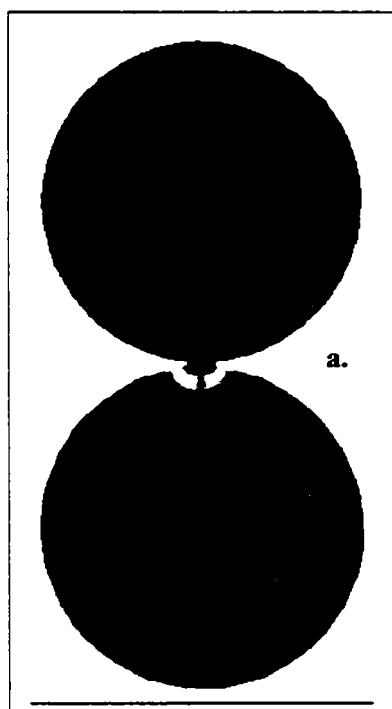


Figura IV.17. Câmpul termic prezentat în secțiune transversală:
a).prezentare generala; b). detaliu; c). legendă.

Ținându-se cont de rezultatele obținute în urma simulării procesului de laminare a profilului I, înregistrat la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, precum și de neajunsurile înregistrate în practica industrială (respectiv ruperea cilindrilor, înainte de a-și fi parcurs campaniile de laminare, datorită distribuirii neuniforme a apei de răcire sau chiar întreruperea pulverizării acesteia, precum și prinderea între cilindrii a laminatului cu o temperatură necorespunzătoare), consider oportună aplicarea apei de răcire pe patru suprafețe (pe două suprafețe pe cilindrul superior și pe două suprafețe pe cilindrul inferior, conform fig.IV.18) și creșterea temperaturii laminatului, astfel încât la caja 14 acesta să ajungă cu o temperatură de aprox. 850°C .

Similar cu cazul prezentat mai sus, este efectuată simularea procesului de laminare pentru cazul temperaturii laminatului la 850°C și răcirea aplicată pe patru suprafețe (fig.IV.18).

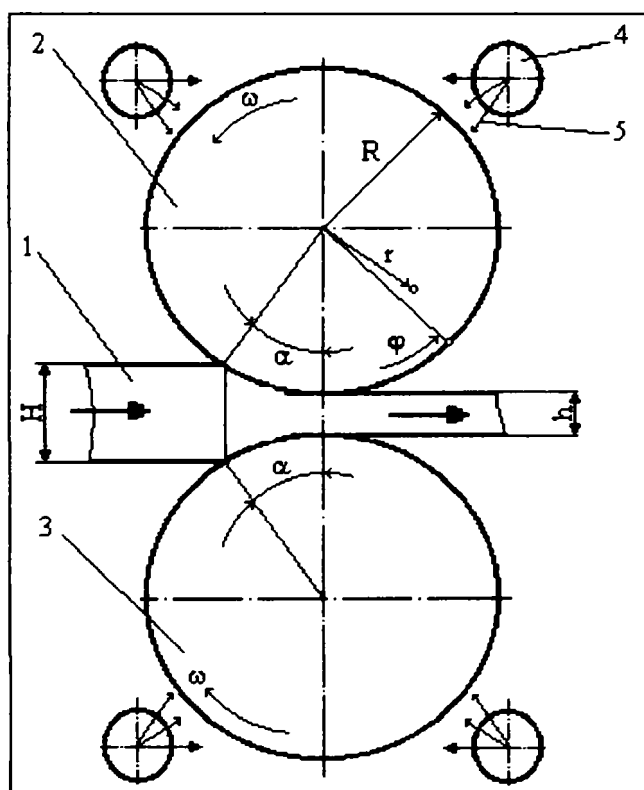


Figura IV.18. Schema principiului de deformare plastică în procesul de laminare la cald: 1-laminat; 2 - cilindru superior; 3 - cilindru inferior; 4 - colectoare; 5 - jeturi de apă pentru răcire.

După reprezentările din fig.IV.19, în zona suprafeței de contact, respectiv zona focarului de deformare, delimitată de unghiul de prindere $\varphi_1 = \alpha_{\text{prindere}}$, în punctele de contact I-II temperatura punctului material sau a suprafeței elementare de contact crește, fiind maximă în punctul II.

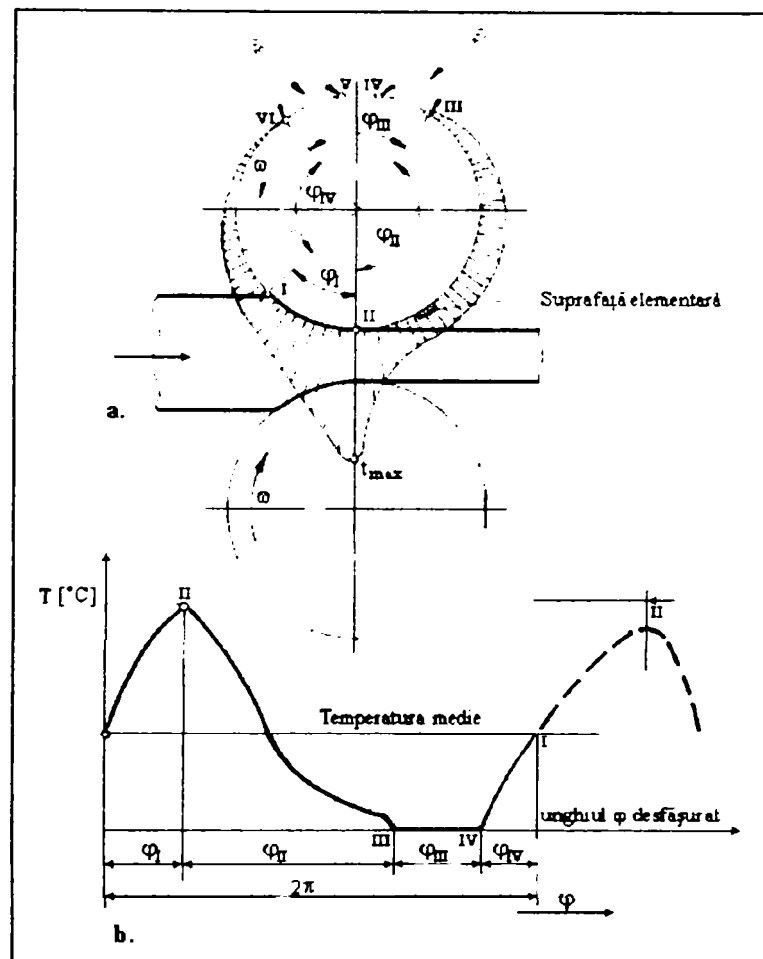
Când această suprafață elementară părăsește contactul cu laminatul, respectiv părăsește focarul de deformare, îndepărtându-se de el, temperatura începe să scadă după o curbă exponențială oarecare până în punctul III, când temperatura acestei suprafețe elementare devine, în mod teoretic, aproape egală cu temperatura apei de răcire, menținându-se la acest nivel în toată zona jeturilor de apă cuprinsă în intervalul unghiului φ_{III} (punctele III, IV, V, VI).

În zona unghiului φ_{IV} temperatura pe suprafața cilindrului începe să crească, cu o viteză relativ mică, datorită radiației laminatului, până în punctul de contact I, când suprafața elementară ajunge din nou în contact cu laminatul și, în consecință, ciclul se repetă.

Dacă se analizează curba exponențială de variație a temperaturii pe suprafața cilindrilor de laminare în timpul unei rotații, respectiv în intervalul unghiului $\varphi = 2\pi$, aceasta are o limită maximă

t_{\max} (cu valori mai mici decât temperatura laminatului) și o limită minimă t_{\min} (cu valoarea aproape egală cu temperatura apei de răcire).

Figura IV.19. Variația temperaturii pe suprafața cilindrului de laminare, rezultată din analiza logică a laminării la cald: a-reprezentarea temperaturii pe circumferința calibrului de laminare, b- curba exponențială de variație a temperaturii pe suprafața cilindrului, reprezentată într-un sistem de axe de coordonate, funcție de unghiul φ desfășurat



IV.2.2.2. Distribuția de temperatură în cazul laminării la 850°C, cu aplicarea apei de răcire pe patru suprafețe

În vederea efectuării simulării numerice cu ajutorul programului COSMOS/M 2.5. a distribuției de temperatură, în cazul laminării la temperatura de 850°C, cu aplicarea apei de răcire pe patru suprafețe s-au impus următoarele condiții inițiale:

- $T_{\text{laminat}} = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- $T_{\text{apă răcire}} = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$;
- suprafețele pe care se aplică apa de răcire sunt:
 - pentru cilindrul superior: 179 și 180;
 - pentru cilindrul inferior: 67 și 68.

În fig.IV.20, sunt prezentate suprafețele pe care este aplicată apa de răcire, în timpul procesului de laminare, iar în fig. IV.21, IV.22, sunt prezentate secțiunile longitudinale și transversale ale cilindrilor de laminare, cu scopul de a se pune în evidență câmpul termic (prin vizualizare calitativă).

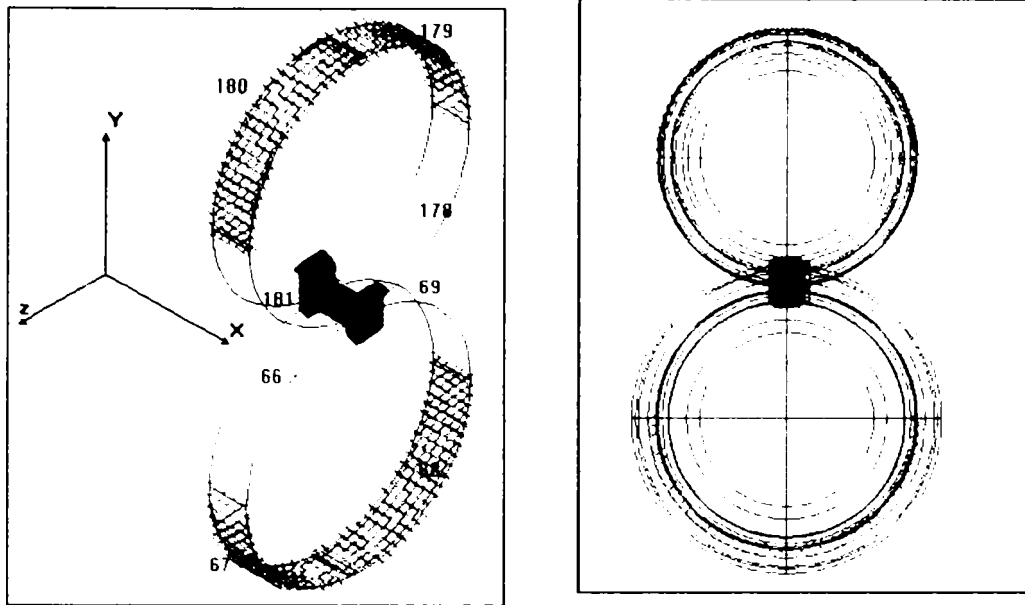


Figura IV.20. Suprafețele de aplicare a apei de răcire: 179, 180 și 67,68 ($T_{\text{laminat}} = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\text{apă răcire}} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

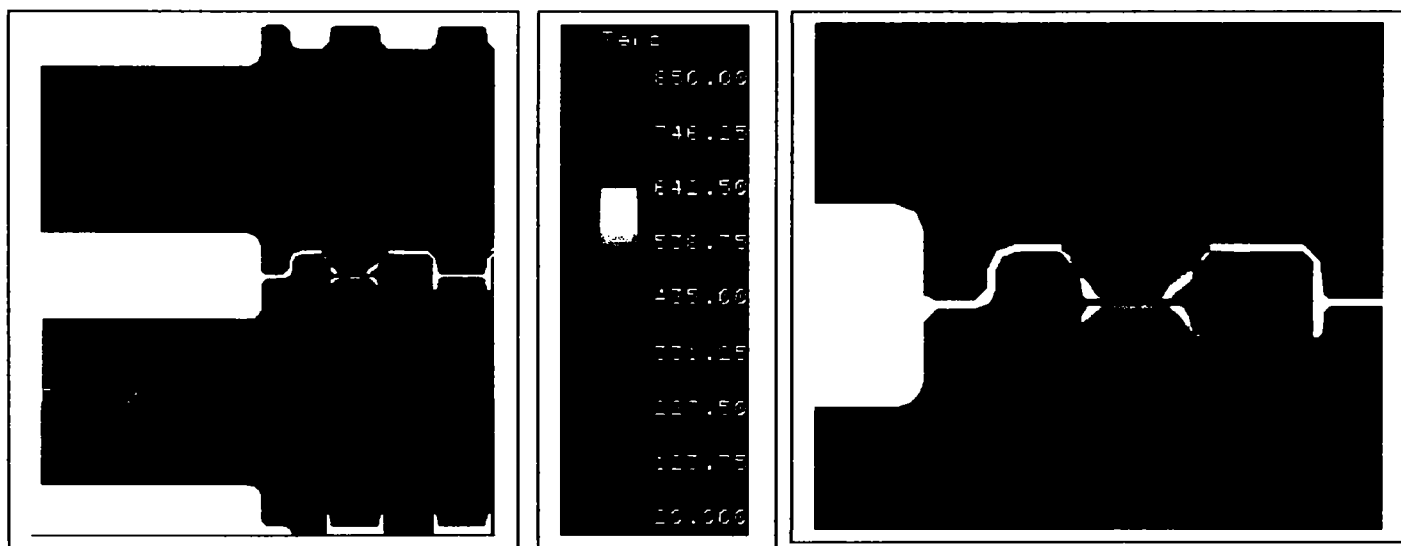
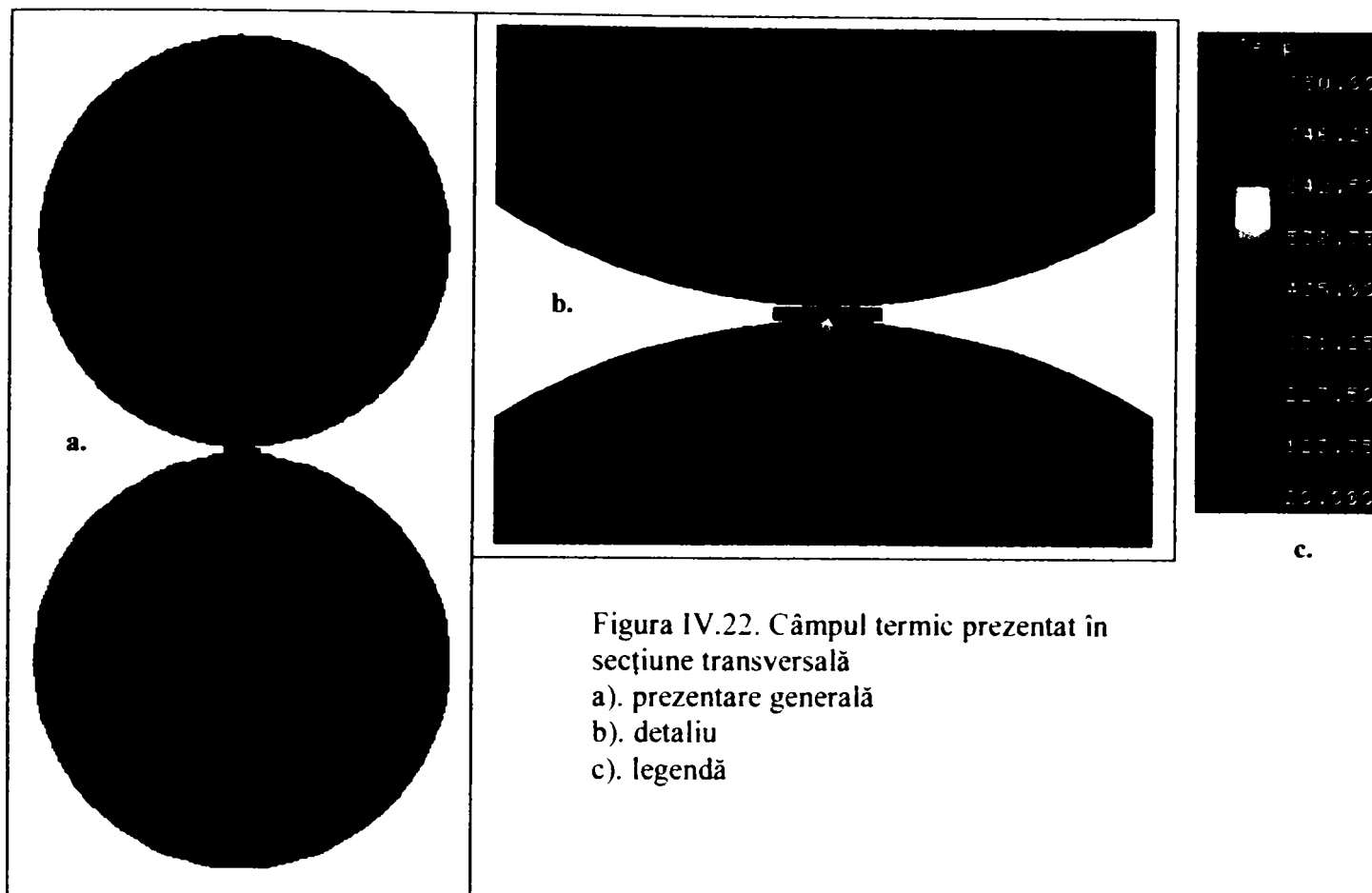


Figura IV.21. Câmpul termic studiat, reprezentat prin harta de culori, în secțiune longitudinală (este prezentat ansamblul general, legenda și un detaliu din poziția semifabricatului).

Din figurile IV.21, IV.22 se observă faptul că, în cazul aplicării apei de răcire pe patru suprafețe ale cilindrilor de laminare, repartitia câmpul termic în cilindrii de laminare în timpul procesului de laminare este uniformă și simetrică, fapt care influențează pozitiv durabilitatea în exploatare.



În tabelul IV.3 sunt prezentate temperaturile obținute, în urma rulării programului, pentru simularea cazului de aplicare a apei de răcire pe două suprafețe în două cazuri, și anume la 800 și la 850°C, respectiv optimizarea procesului și anume, cazul aplicării apei de răcire patru suprafețe, la o temperatură de 850°C. Din analiza datelor prezentate în tabel, rezultă valorile maxime ale temperaturilor:

- pentru 800°C și aplicarea apei de răcire pe două suprafețe, valoarea maximă a temperaturii este cuprinsă în intervalul (676,61...684,9)°C, pentru cilindrul superior și (628,3...685,9)°C, pentru cilindrul inferior;
- pentru 850°C și aplicarea apei de răcire pe două suprafețe, valoarea maximă a temperaturii este cuprinsă în intervalul (730,5...740,3)°C, pentru cilindrul superior și (740,1...725,3)°C, pentru cilindrul inferior;
- pentru 850°C și aplicarea apei de răcire pe patru suprafețe, valoarea maximă a temperaturii este cuprinsă în intervalul (415,6...414,2)°C, pentru cilindrul superior și (413,8...414,2)°C, pentru cilindrul inferior.

Din această analiză rezultă faptul că, *chiar pentru o temperatură mai ridicată a laminatului, de 850°C, dar cu aplicarea apei de răcire pe patru suprafețe, distribuția de temperatură în cilindru, în timpul procesului de laminare la cald este mai uniformă iar valoarea maximă a temperaturilor în interiorul cilindrilor scade simțitor, fapt ce duce la îmbunătățirea condițiilor de exploatare și, implicit, la creșterea durabilității cilindrilor de laminare.*

Tabelul IV.3. Temperaturile înregistrate în cilindrii de laminare în timpul simulării procesului de laminare la cald.

Nr. crt.	Nr. nodului situat pe circumferința cilindrului	Temperatura laminatului [°C]/ mod de răcire		
		Răcire aplicată pe două suprafețe		Răcire aplicată pe patru suprafețe
		800°C	850°C	850°C
1	35126	676,61	730,5	414,2
2	35129	658,04	710,2	372,7
3	35132	639,88	690,3	331,2
4	35135	624,3	675,2	310,4
5	35138	610,82	660,4	289,7
6	35141	602,74	652,4	248,2
7	35144	589,62	640,1	206,7
8	35147	575,78	626,2	185,9
9	35150	552,02	600,3	165,2
10	35153	547,37	598,6	143,4
11	35156	528,86	575,8	123,7
12	35242	684,9	740,3	415,6
13	35239	680,6	730,2	373,2
14	35236	672,8	729,9	330,2
15	35233	670,6	724,6	312,4
16	35230	662,9	709,6	290,2
17	35227	660,6	706,1	248,6
18	35224	658,6	703,1	203,9
19	35221	655,6	700,6	186,1
20	35218	651,2	698,6	165,2
21	35215	648,3	695,3	142,2
22	4321	334,66	385,2	414,2
23	4317	356,61	410,1	372,6
24	4313	373,5	424,6	330,9
25	4309	384,56	435,6	310
26	4297	405,4	460,9	289,3
27	4295	425,5	478,4	248,4
28	4289	450,39	502,4	207,1
29	4285	496,32	547,6	184,9
30	4281	554,17	608,7	166,1
31	4277	685,89	740,1	143,3
32	4467	628,3	725,3	413,8
33	4463	560,6	660,4	373,5
34	4459	502,8	602,3	331,2
35	4455	460,3	573,6	310,4
36	4451	432,6	542,8	290,1
37	4447	408,2	510,6	249,3
38	4443	380,3	491,3	206,9
39	4439	369,6	470,6	185,2
40	4435	340,8	440,9	166,2
41	4431	312,4	415,8	143,1
42	4427	293,1	396,8	122,8
43	4423	375,21	362,2	100,6

IV.2.3. Determinarea stării de tensiune datorită variației de temperatură. Calculul tensiunilor termice produse în cilindrii de laminare

O problemă deosebit de actuală în întreprinderile metalurgice este *durabilitatea scăzută în exploatare* a cilindrilor de laminare, aceștia fiind cele mai solicitate piese din ansamblul cajelor de lucru ale laminoarelor.

Cilindrii de laminare lucrează la cald, în condițiile unor solicitări variabile compuse, datorate procesului de laminare și care se repetă la intervale regulate de timp. În general, cilindrii de laminare se calculează ținându-se cont doar de acțiunea forțelor statice (care rămân constante în timp), ipoteză considerată doar parțial satisfăcătoare și corespunzătoare cu condițiile practice din exploatare. Acest calcul este pe deplin justificat numai pentru determinarea diametrului cilindrilor și dimensionarea laminatului. Dacă, însă, studiul rezistenței cilindrilor se extinde și asupra durabilității acestora, atunci trebuie să se țină seama de întregul complex de tensiuni cu influențe mecano-termice [81].

Tăblia calibrelor cilindrilor de laminare lucrează în condiții de solicitări compuse, cum sunt [81], [94]:

- tensiunile de încovoiere produse de forțele de laminare;
- tensiunile de răsucire, produse de momentele de laminare;
- tensiuni datorate presiunii de contact ce apar în zona focarului de deformare;
- tensiuni termice, produse de variațiile de temperaturi din cilindrii de laminare care, pe de o parte, se încălzesc, fiind în contact cu laminatul incandescent și, pe de altă parte, se răcesc cu jeturi de apă.

Acțiunea în ansamblu a tensiunilor enunțate mai sus este specifică procesului de exploatare a cilindrilor de laminare la cald. Eforturile unitare într-un element material al cilindrului pot fi reprezentate, vectorial, conform reprezentărilor din fig. IV.23.

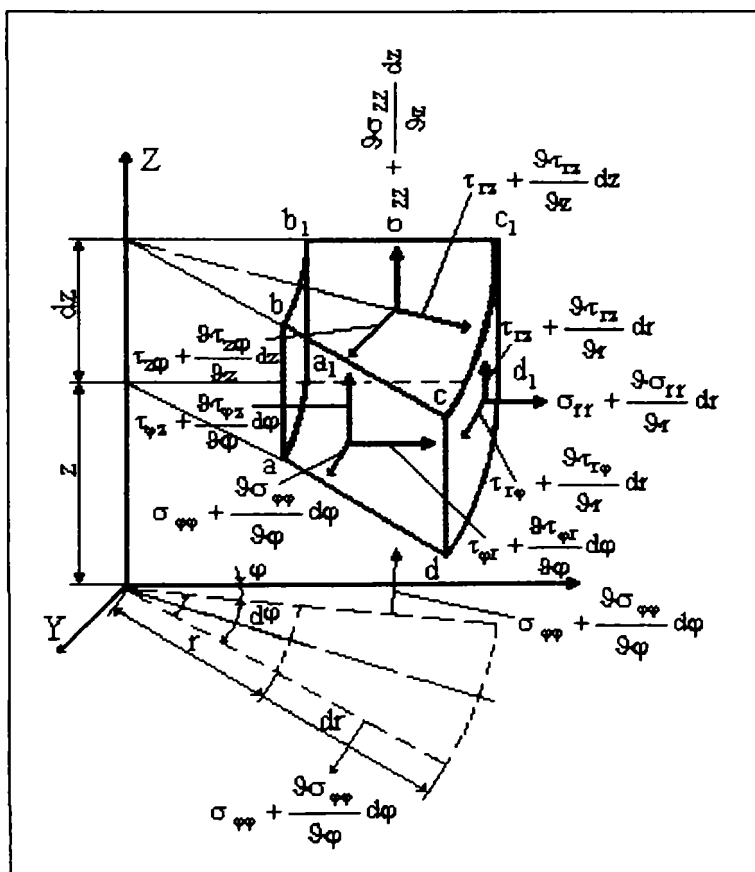


Figura IV.23. Reprezentarea vectorială, în coordonate cilindrice, a eforturilor unitare normale și tangențiale ce acționează într-un element material al cilindrului de laminare:

- σ_{rr} -efortul unitar normal radial, care acționează în direcția radială, perpendicular pe patrulaterul abb_1a_1 și dcc_1d_1 ;
- σ_{zz} -efortul unitar normal axial, care acționează în direcția axei OZ, perpendicular pe patrulaterul bb_1c_1c și $aa_1d_1d_1$;
- $\sigma_{\phi\phi}$ -efortul unitar normal circumferențial care acționează pe patrulaterul $abcd$ și $a_1b_1c_1d_1$;
- τ_{rz} -efort unitar tangențial, ce acționează radial în planul patrulaterelor bb_1c_1c și $aa_1d_1d_1$;
- τ_{rz} -efort unitar tangențial, ce acționează în direcția paralelă cu axa OZ, în planurile abb_1a_1 și dcc_1d_1 ;
- $\tau_{r\phi}$ -efort unitar tangențial în direcția radială ce acționează în planul patrulaterelor $abcd$ și $a_1b_1c_1d_1$;
- $\tau_{r\phi}$ -efort unitar tangențial, ce acționează în planul patrulaterelor abb_1a_1 și dcc_1d_1 ;
- $\tau_{\phi z}$ -efort unitar tangențial, ce acționează în direcția axei OZ, în planul patrulaterelor $abcd$ și abb_1a_1 și $a_1b_1c_1d_1$;
- $\tau_{\phi z}$ -efort unitar circumferențial ce acționează în planul patrulaterelor $a_1b_1c_1d_1$ și $abcd$.

Referitor la semnul tensiunilor trebuie făcută precizarea că, pentru tensiunile normale, semnul (+) se utilizează atunci când ele produc întindere, iar semnul (-) atunci când se produce compresiune. În ceea ce privește tensiunile tangențiale, acestea se consideră pozitive, dacă direcția lor coincide cu direcția pozitivă a axelor de coordonate și dacă tensiunile normale sunt de întindere. Tensiunile tangențiale pot fi negative dacă direcția lor este inversă sensului pozitiv al axelor de coordonate și dacă tensiunile normale pe aceste fețe sunt de sens contrar sensului pozitiv al axelor de coordonate corespunzătoare.

În urma studiului câmpurilor termice care apar la laminarea la cald se poate trage concluzia că, în cilindrii de laminare apar două tipuri de câmpuri de temperaturi, și anume câmpuri de temperaturi radial simetrice și câmpuri de temperaturi radial asimetrice [81].

Câmpurile de temperaturi radial asimetrice produc eforturi unitare termice ciclice la fiecare rotație a cilindrului de laminare, generând oboseala termică a stratului superficial al calibrelor de laminare și se pot determina cu ajutorul relațiilor [81]:

$$\sigma_{rr}^{as} = -\frac{E \cdot \alpha}{2 \cdot (1 - \mu)} \cdot \frac{\rho}{R} \cdot \left[\frac{1}{\rho^2} - 1 \right] \cdot [t(l, \varphi) - \bar{t}] \quad (IV.23)$$

$$\sigma_{r\varphi}^{as} = \frac{E \cdot \alpha}{2 \cdot (1 - \mu)} \cdot \frac{\rho}{R} \cdot \left[\frac{1}{\rho^2} - 1 \right] \cdot \frac{\vartheta [t(l, \varphi) - \bar{t}]}{\vartheta \varphi} \quad (IV.24)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^{as} = \frac{E \cdot \alpha}{2 \cdot (1 - \mu)} \cdot \frac{\rho}{R} \cdot \left[3 - \frac{1}{\rho^2} \right] \cdot [t(l, \varphi) - \bar{t}] \quad (IV.25)$$

$$\sigma_{zz}^{as} = E \cdot \alpha \cdot \left\{ \frac{\mu}{(1 - \mu)} \cdot \frac{\rho}{R} \cdot \left(2 - \frac{1}{\rho^2} \right) \cdot [t(l, \varphi) - \bar{t}] - t(\rho, \varphi) \right\} \quad (IV.26)$$

unde:

R - raza exterioară a calibrului de laminare;

$t(\rho, \varphi)$ - variația temperaturii în secțiunea cilindrului, funcție de raza specifică $\rho = r/R$ și unghiul de rotație φ ;

ρ - raza specifică a cilindrului de laminare ($\rho = r/R$); pentru $r = 0$, $\rho = 0$ și pentru suprafața cilindrului $r = R$, $\rho = 1$;

r - rază oarecare în secțiunea radială a cilindrului de laminare;

\bar{t} - integrala curbei exponențiale de variație a temperaturii după funcția $t(l, \varphi)$, ce descrie temperatura pe suprafața cilindrului (aceasta reprezintă o linie dreaptă, numită temperatură medie);

μ - coeficient de contracție transversală;

G - modul de elasticitate transversal ($G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$); E - modul longitudinal de elasticitate;

α - coeficient de dilatare liniară.

Aceste tensiuni nu se determină și nu acționează în toată secțiunea cilindrului de laminare, deoarece câmpurile de temperaturi asimetrice se atenuează în stratul superficial la adâncimea de max.20mm, sub acest nivel valorile temperaturilor fiind practic egale în toată secțiunea cilindrului. Tensiunile termice asimetrice nu se extind pe întreaga circumferință a cilindrului, ele acționând doar pe o anumită porțiune corespunzătoare unghiului φ_i prin care se introduce căldură în cilindru.

Variațiile câmpurilor de temperaturi radial simetrice, respectiv variația temperaturii medii \bar{t} , produc, în cilindrii de laminare, la fiecare trecere, tensiuni termice variabile având valori specifice ciclului de laminare. Acțiunea câmpurilor simetrice de temperaturi produce numai tensiuni principale, și anume σ_r^s - tensiuni radiale, σ_{zz}^s - tensiuni axiale, $\sigma_{\varphi\varphi}^s$ - tensiuni circumferențiale.

Tensiunile produse de *câmpurile de temperaturi radial simetrice*, sunt determinate de relațiile [81]:

$$\sigma_r^s(\rho, \tau) = \frac{E \cdot \alpha}{1 - \mu} \left[\int_0^1 \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho - \frac{1}{\rho^2} \int_0^\rho \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho \right] \quad (IV.27)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^s(\rho, \tau) = \frac{E \cdot \alpha}{1 - \mu} \left[\int_0^1 \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho + \frac{1}{\rho^2} \int_0^\rho \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho - \bar{t}(\rho, \tau) \right] \quad (IV.28)$$

$$\sigma_{zz}^s(\rho, \tau) = \frac{E \cdot \alpha}{1 - \mu} \left[2 \int_0^1 \bar{t}(\rho, \tau) \rho d\rho - \bar{t}(\rho, \tau) \right] \quad (IV.29)$$

În aceste relații:

$\bar{t}(\rho, \tau)$ - temperatura medie, respectiv integrala funcției care descrie variația câmpurilor de temperaturi, reprezentate prin curbele exponențiale ale diagramelor de temperaturi;

ρ - raza specifică în secțiunea radială a cilindrilor, $\rho = r/R$.

În ceea ce privește timpul τ , de care depinde temperatura, acesta joacă rol de parametru, indicând, în relațiile tensiunilor termice, faptul că, pentru fiecare trecere din procesul de laminare, temperatura medie este diferită.

IV.2.3.1. Determinarea stării de tensiune, datorită variației de temperatură, în cazul aplicării apei de răcire pe două suprafețe

În cazul efectuării calculului tensiunilor termice la 800°C, cu răcirea cilindrilor de laminare aplicată pe două suprafețe, s-a luat în considerare faptul că tensiunile din zona fusurilor nu sunt relevante, datorită faptului că pe acestea s-au impus deplasări nule ("dilatate împiedicată"), deoarece s-au neglijat jocurile din lagăre.

Schema suprafețelor răcite cu apă față de poziția laminatului este prezentată în fig. IV.24.

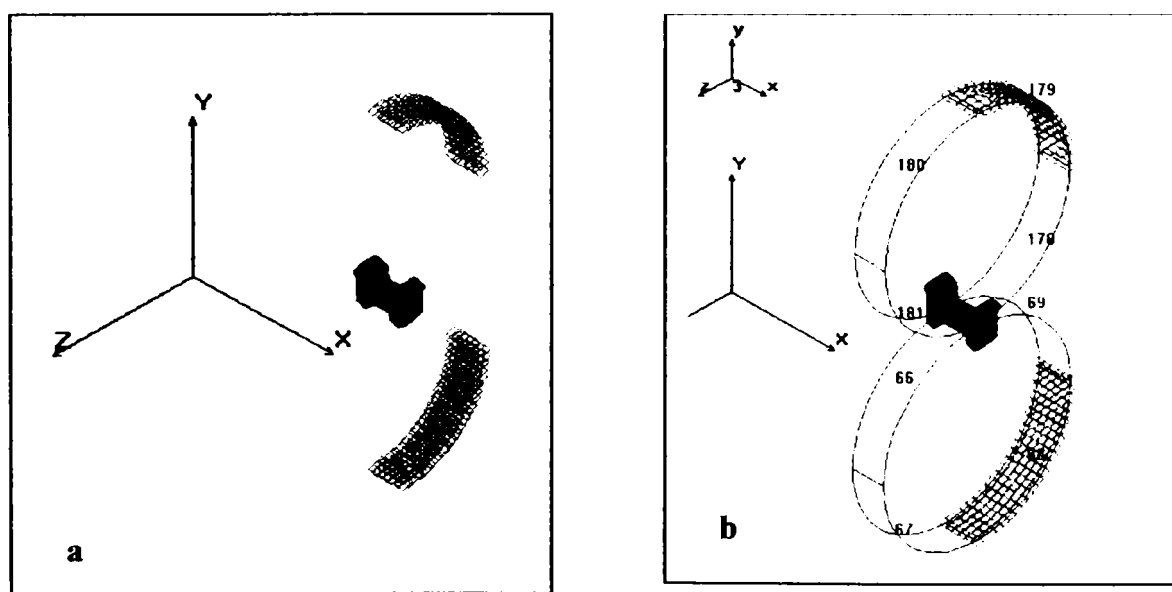


Figura IV.24. Schema de răcire a cilindrilor de laminare, fără prezentarea suprafețelor de aplicație a apei de răcire (fig a) și cu prezentarea acestora (suprafețele 68 și 179) (fig.b).

În vederea trasării graficelor corespunzătoare tensiunilor termice în nodurile situate pe circumferința cilindrilor în zonele critice de laminare, este necesară dispunerea nodurilor pe circumferința calibrului (fig.IV.25).

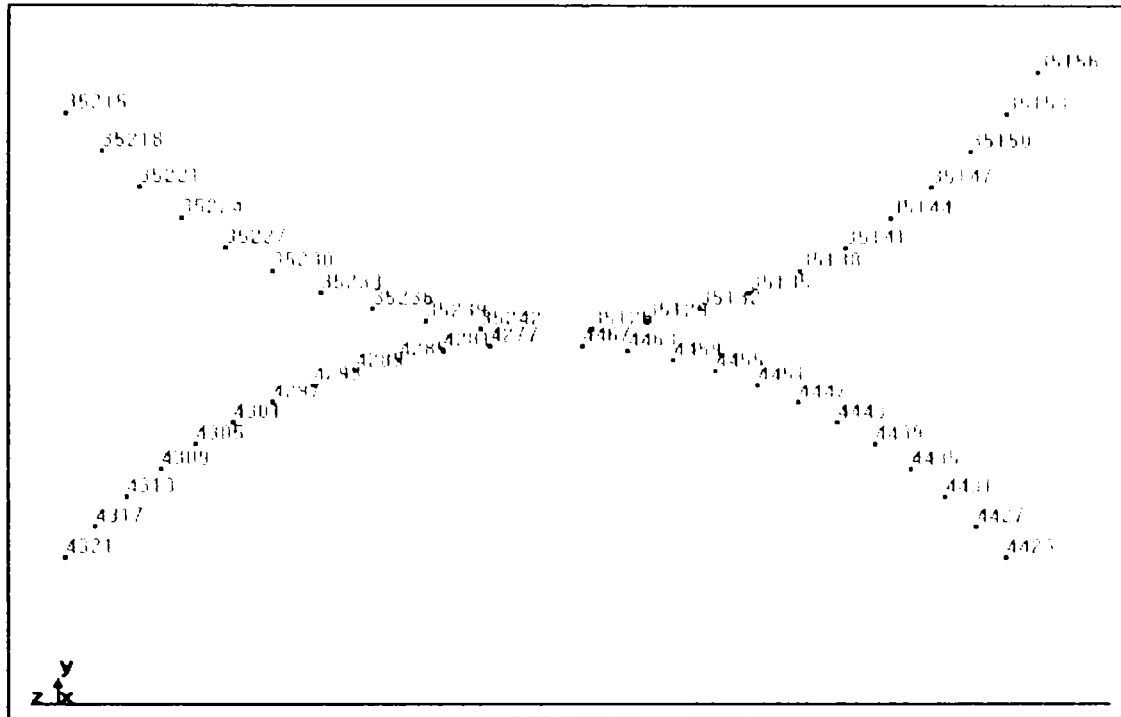


Figura IV.25. Dispunerea nodurilor pe circumferința calibrului.

Pentru a se înțelege cât mai bine raționamentul folosit în calculul stării de tensiune datorită eforturilor unitare termice și pentru a putea fi interpretate rezultatele obținute în urma simulării este necesar să se facă anumite precizări legate de starea spațială de tensiune. Astfel, în această stare generală de solicitare, pe fețele unui element izolat din jurul unui punct oarecare al corpului solid vor putea exista toate componentele tensiunii, dirijate paralel cu axele unui sistem de referință OXYZ (fig.IV.26). [19]

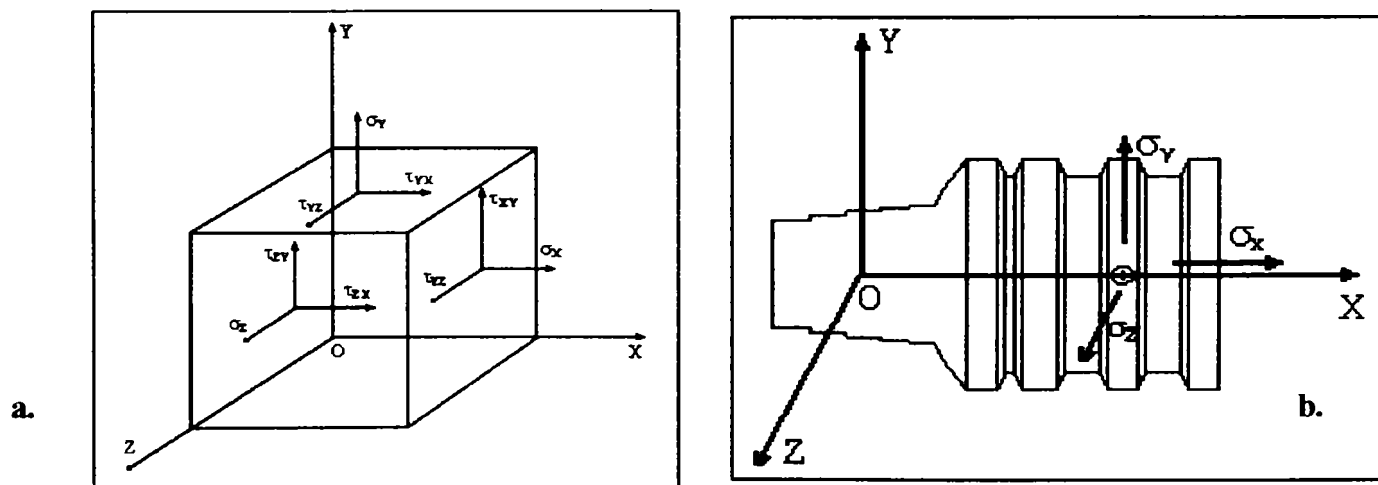


Figura IV.26. Starea spațială de tensiune, în care σ_x , σ_y , σ_z sunt tensiuni normale, iar τ_{xy} , τ_{zy} , τ_{yx} , τ_{zx} , τ_{xz} , τ_{yz} , tensiuni tangențiale: a). caz general; b). caz particular (cilindru de laminare).

Starea de solicitare din jurul unui punct oarecare este definită dacă se cunoaște tensorul tensiunilor, T_σ [19]:

$$T_{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{Bmatrix}. \quad (IV.30)$$

Dacă se ține cont de notația simplificată a tensiunilor tangențiale ($\tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_x$; $\tau_{zx} = \tau_{xz} = \tau_y$; $\tau_{yx} = \tau_{xy} = \tau_z$) se poate spune că tensorul tensiunilor este simetric.

În starea spațială există direcții după care tensiunea normală are valori extreme, iar tensiunea tangențială este egală cu zero. Tensiunile normale $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, dirijate după direcțiile principale reciproc perpendiculare 1, 2, 3, se numesc *tensiuni principale*. Starea din tensiune din jurul unui punct oarecare considerat se poate exprima, în acest caz, în funcție de tensorul tensiunilor principale, T_{σ} : [19]

$$T_{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{Bmatrix}. \quad (IV.31)$$

Dacă $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ atunci σ_1 este tensiunea maximă, în dreptul unui punct oarecare considerat, σ_3 tensiunea minimă, iar σ_2 tensiunea mini. max (prin asemănare cu un elipsoid, care are trei diametre principale, orientate în lungul axelor de simetrie: un diametru maxim, unul minim, iar cel de-al treilea minim în planul diametrului maxim, respectiv maxim în planul diametrului minim)

Pentru cazul concret al cilindrului de laminare, prezentat în fig IV.26,b, *tensiunile principale* sunt date de rădăcinile ecuației: [19]

$$\sigma^3 - I_1 \cdot \sigma^2 + I_2 \cdot \sigma - I_3 = 0 \quad (IV.32)$$

în care invariantii I_1, I_2, I_3 se determină astfel:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_x \sigma_z + \sigma_y \sigma_z - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 \quad (IV.33)$$

$$I_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

Rezolvarea ecuației (IV.32) conduce la trei soluții reale care reprezintă *tensiunile principale*, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, iar *tensiunea echivalentă Von Mises* se determină cu ajutorul relației: [19]

$$\sigma_{\text{von_Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]}. \quad (IV.34)$$

Diferența dintre tensiunile maxime ($\sigma_1 - \sigma_3$) se numește *factor de intensitate*.

Determinarea tensiunilor termice în cilindrii de laminare ($T_{\text{laminat}}=800^{\circ}\text{C}$)

- secțiune transversală:

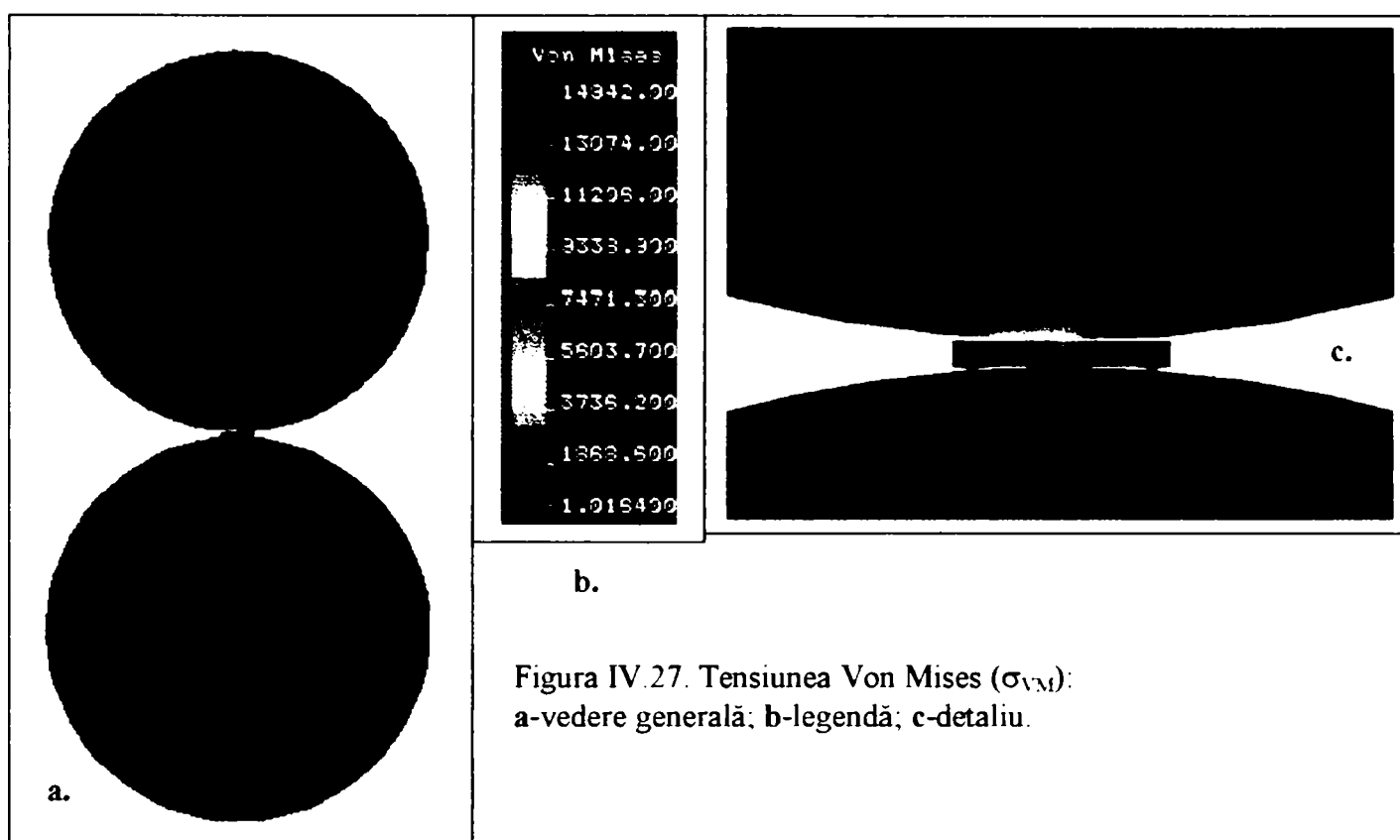


Figura IV.27. Tensiunea Von Mises (σ_{VM}):
a-vedere generală; b-legendă; c-detaliu.

În fig. IV.28 sunt prezentate ansamblul secțiunii transversale a cilindrilor precum și valorile tensiunilor Von Mises pentru următoarele noduri (schițate schematic pe circumferința cilindrului superior): 35215, 35218, 35221, 35224, 35227, 35230, 35233, 35236, 35239, 35242.

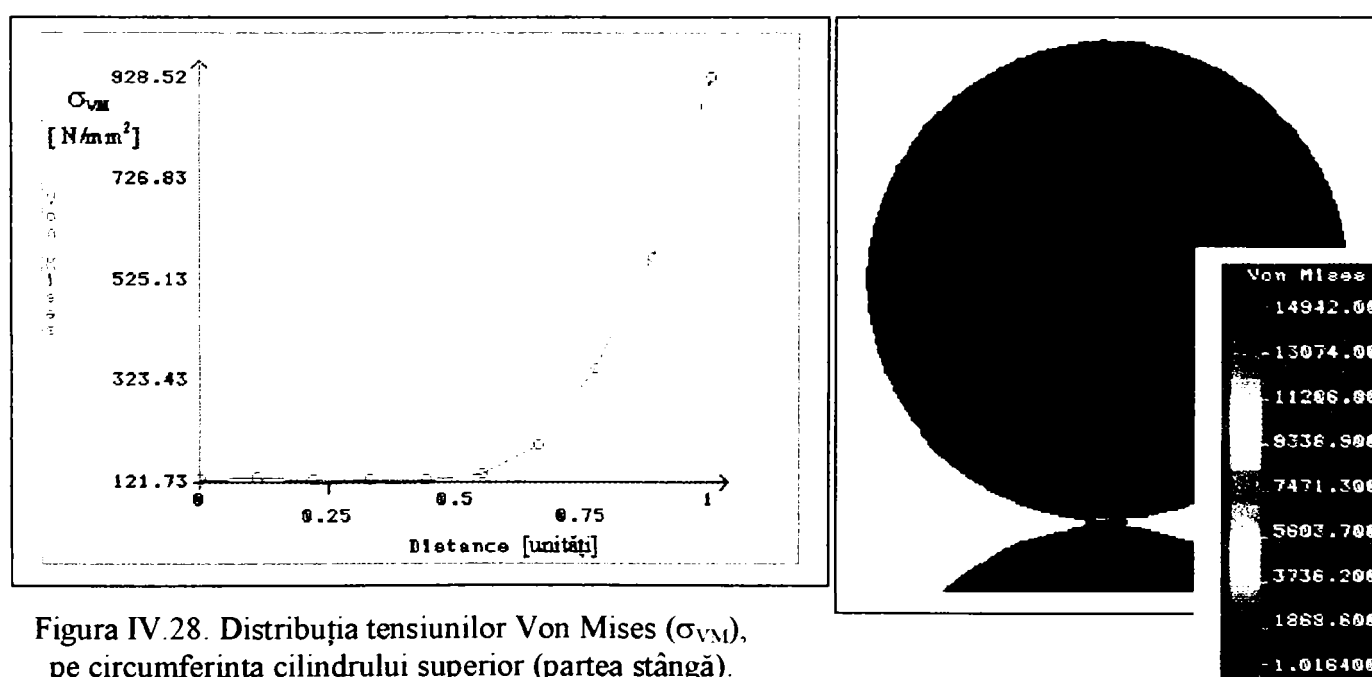


Figura IV.28. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}), pe circumferința cilindrului superior (partea stângă).

În planul reprezentat în fig.IV.28, se observă o creștere a tensiunilor termice odată cu apropierea către zona de laminare (profilul). Astfel, pentru nodul 35215 tensiunea Von Mises este de $121,73 \text{ N/mm}^2$ iar pentru nodul 35242 de $928,52 \text{ N/mm}^2$. Distanța dintre primul și ultimul nod

studiat reprezintă, de fapt, lungimea coardei, respectiv 167,8894 mm (în graficul prezentat în figură aceasta este considerată ca fiind egală cu unitatea).

În fig. IV.29 sunt prezentate ansamblul secțiunii transversale a cilindrilor precum și valorile tensiunilor Von Mises pentru următoarele noduri (schițate schematic pe circumferința cilindrului superior): 35126, 35129, 35132, 35135, 35138, 35141, 35144, 35147, 35150, 35153, 35156.

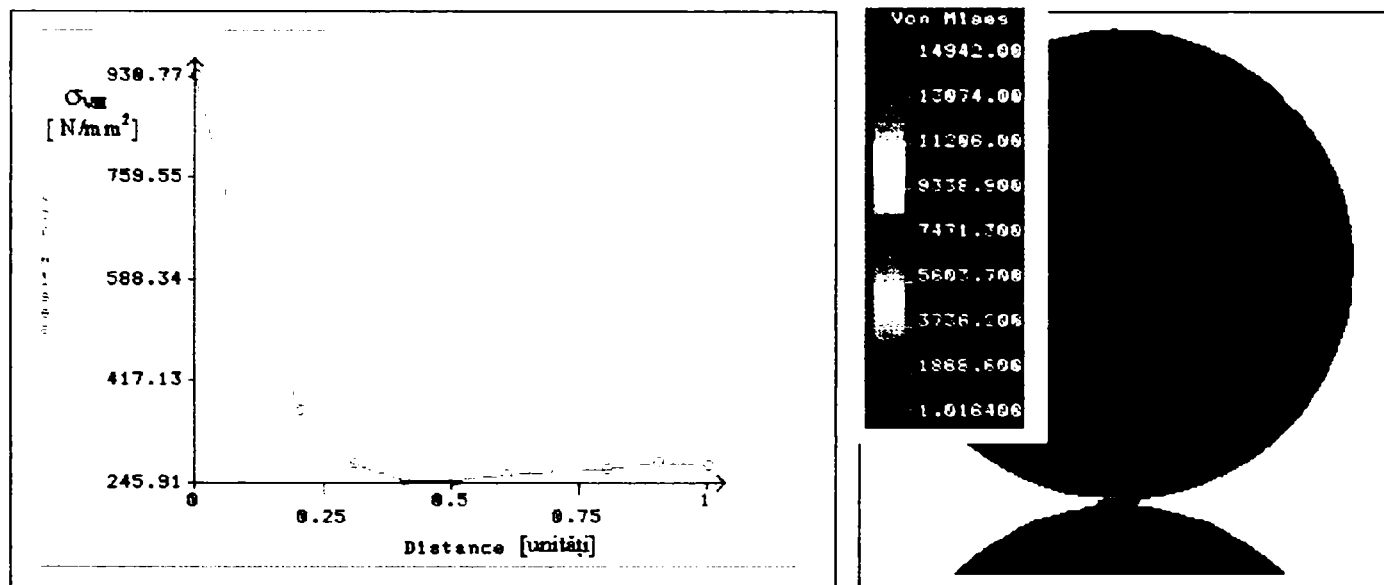


Figura IV.29. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}), pe circumferința cilindrului superior (partea dreaptă).

Din diagramă se observă scăderea tensiunilor termice odată cu îndepărtarea de zona de laminare, rezultând pentru nodul 35126 tensiunea Von Mises de 930,77 N/mm² iar pentru nodul 35156 de aprox. 246 N/mm². În acest caz, lungimea calculată a coardei este de 185,1947 mm.

Similar, în fig. IV.30 sunt prezentate ansamblul secțiunii transversale a cilindrilor precum și valorile tensiunilor Von Mises pentru următoarele noduri (schițate pe circumferința cilindrului superior): 4277, 4281, 4285, 4289, 4293, 4297, 4301, 4305, 4309, 4313, 4317, 4321.

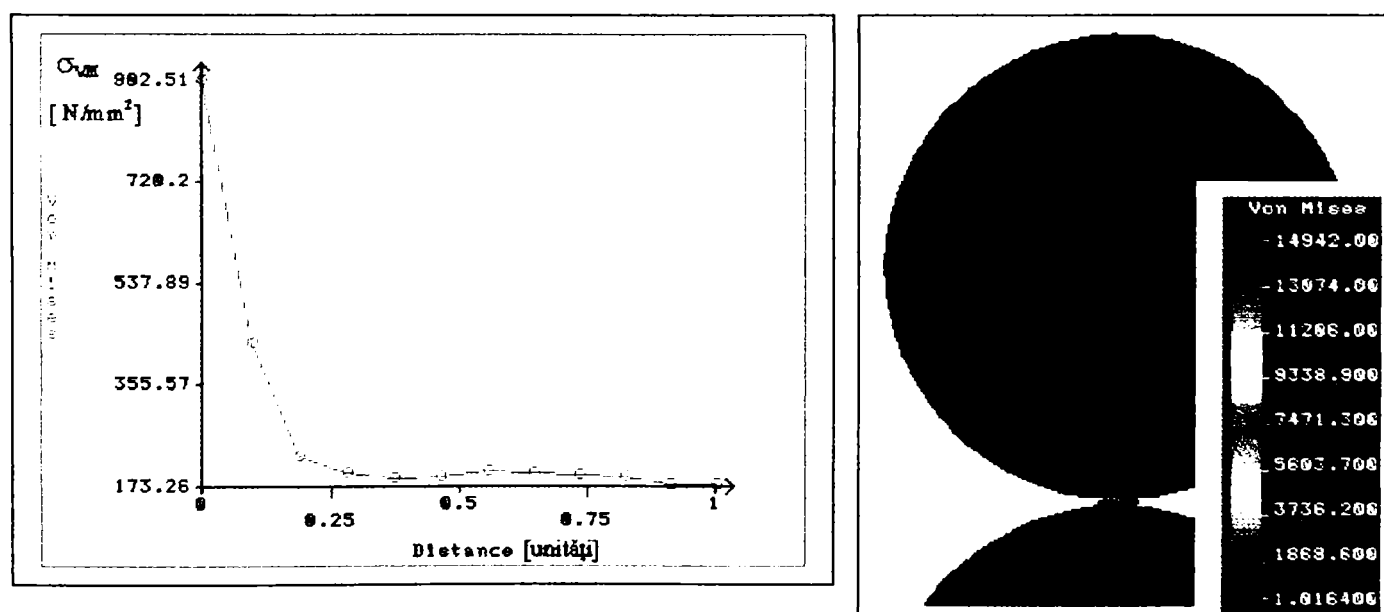


Figura IV.30. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}), pe circumferința cilindrului inferior (partea stângă).

În planul reprezentat în fig.IV.30 se observă scăderea tensiunilor termice odată cu îndepărtarea de zona de laminare. Astfel pentru nodul 4277 tensiunea Von Mises este de $902,51 \text{ N/mm}^2$ iar pentru nodul 4321 de $173,26 \text{ N/mm}^2$ (în acest caz, lungimea calculată a coardei este de $185,1947 \text{ mm}$).

În fig.IV.31 sunt prezentate ansamblul secțiunii transversale a cilindrilor precum și valorile tensiunilor Von Mises pentru următoarele noduri (schițate pe circumferința cilindrului superior): 4423, 4427, 4431, 4435, 4439, 4443, 4447, 4451, 4455, 4459, 4463, 4467.

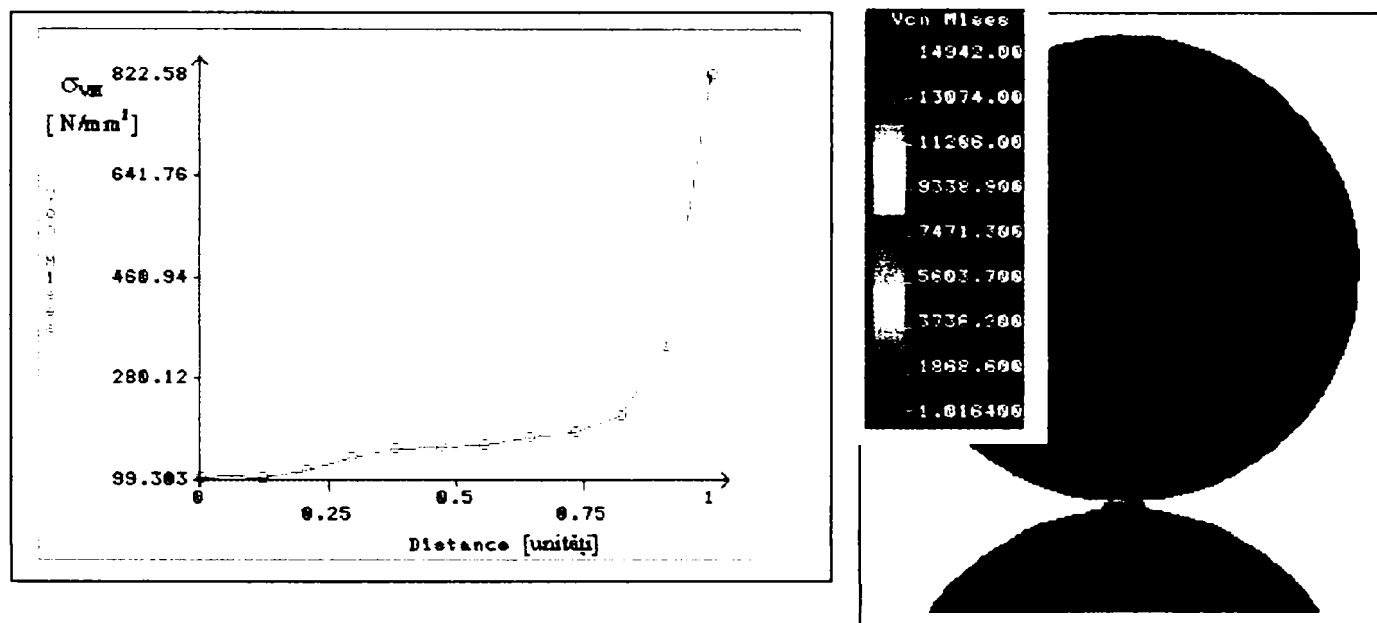


Figura IV.31. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}), pe circumferința cilindrului inferior (partea dreaptă).

Din fig.IV.31. rezultă că pentru nodul 4467 tensiunea Von Mises este de $822,58 \text{ N/mm}^2$ iar pentru nodul 4423 de $99,203 \text{ N/mm}^2$ (lungimea calculată a coardei este de $185,1947 \text{ mm}$).

Similar, sunt prezentate, în **secțiune transversală**, valorile tensiunilor σ_X , σ_Y , și σ_Z .

Astfel, în fig. IV.32 sunt reprezentate tensiunile σ_X înregistrate în secțiune transversală. În urma rulării programului de simulare COSMOS/M 2.5. a rezultat valoarea maximă a tensiunii ca fiind $\sigma_X = 8379,70 \text{ N/mm}^2$.

Fig.IV.33. ilustrează tensiunile σ_Y înregistrate, iar valoarea maximă este, conform legendei, $\sigma_Y = 4047,00 \text{ N/mm}^2$.

Pentru tensiunile σ_Z înregistrate valoarea maximă este $\sigma_Z = 3034,50 \text{ N/mm}^2$ (fig.IV.34).

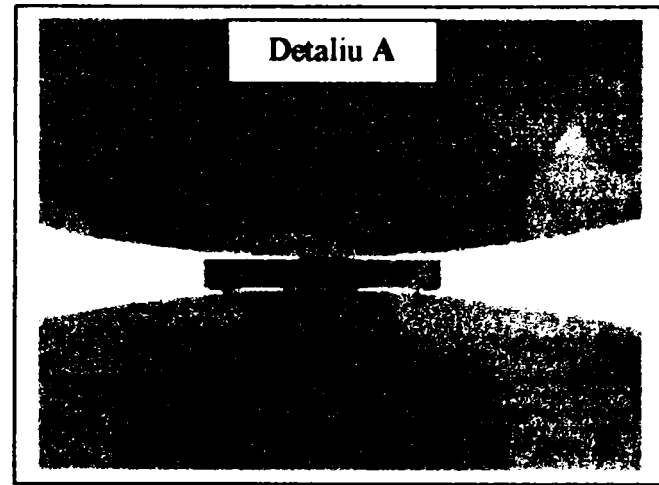
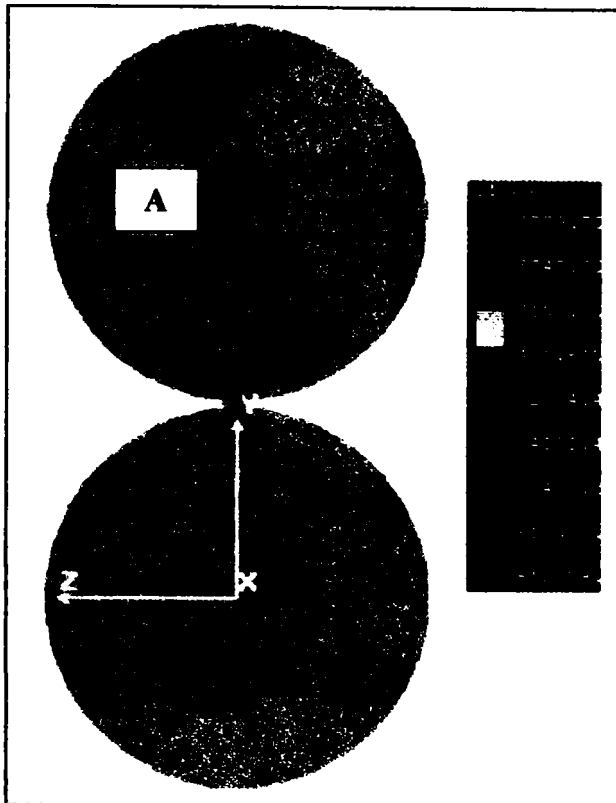


Figura IV.32. Tensiunile σ_x înregistrate în secțiune transversală.

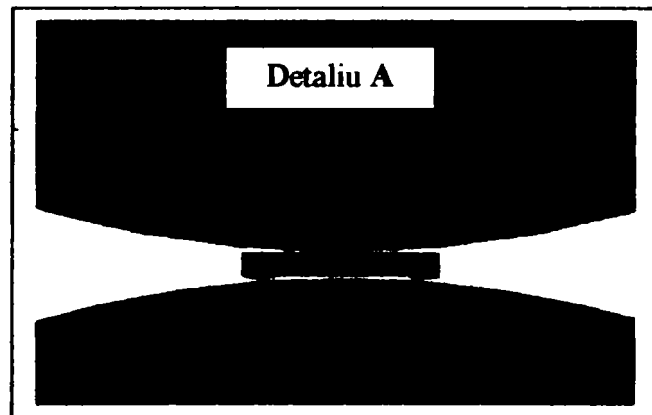
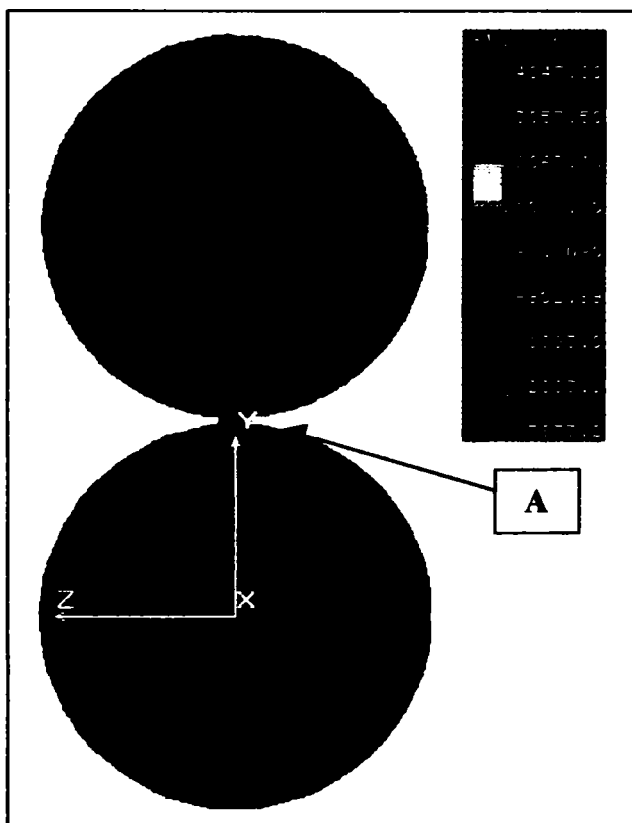


Figura IV.33. Tensiunile σ_y înregistrate în secțiune transversală.

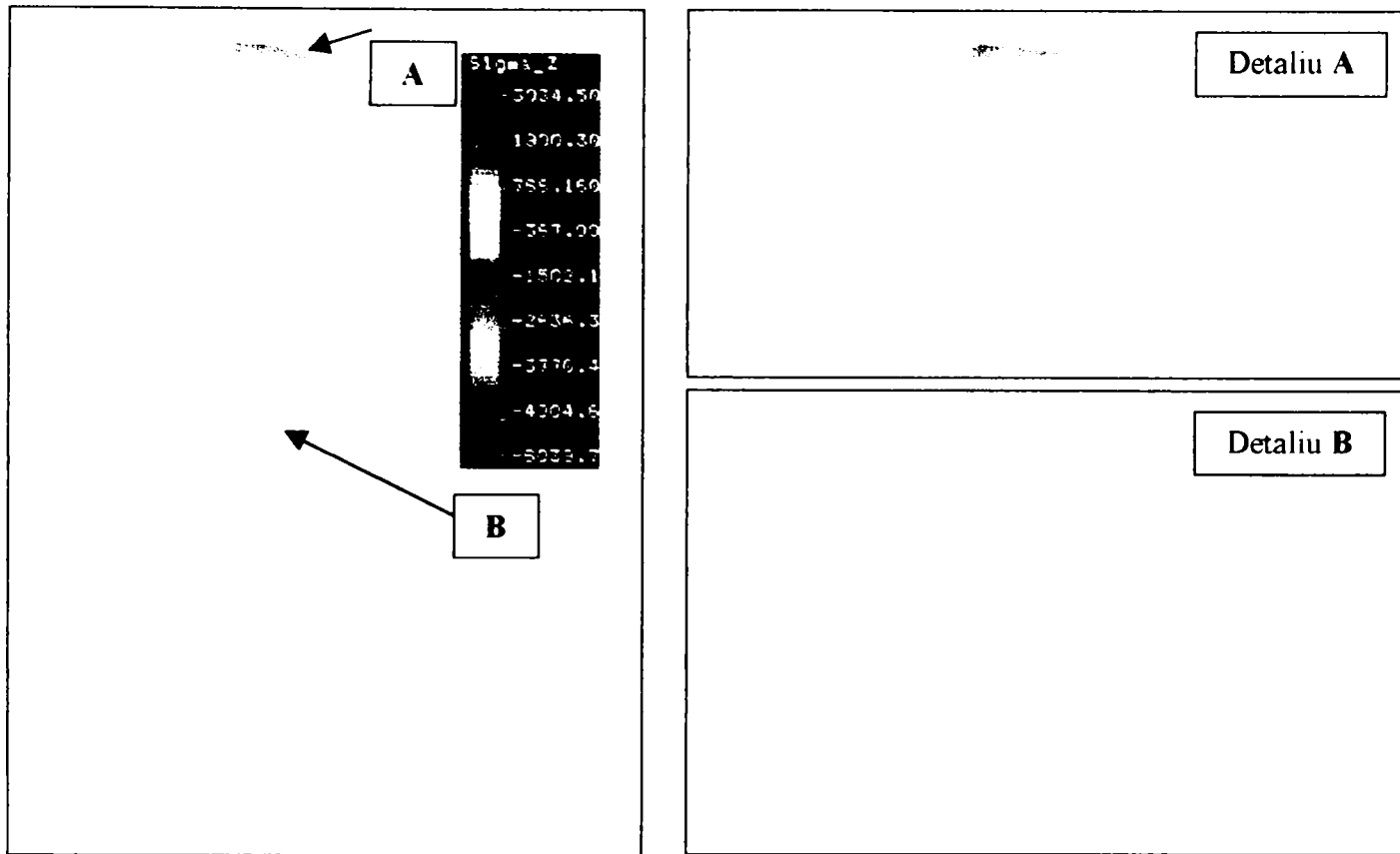


Figura IV.34. Tensiunile σ_z înregistrate în secțiune transversală.

Din figurile prezentate mai sus se poate observa că tensiunile σ_x și σ_z înregistrate sunt aproximativ constante pe secțiune (gradientul de temperatură nu este mare).

- **secțiune longitudinală:**

În secțiune longitudinală, importanță prezintă tensiunile Von Mises (σ_{VM}) și cele de-a lungul axei OX (σ_x).

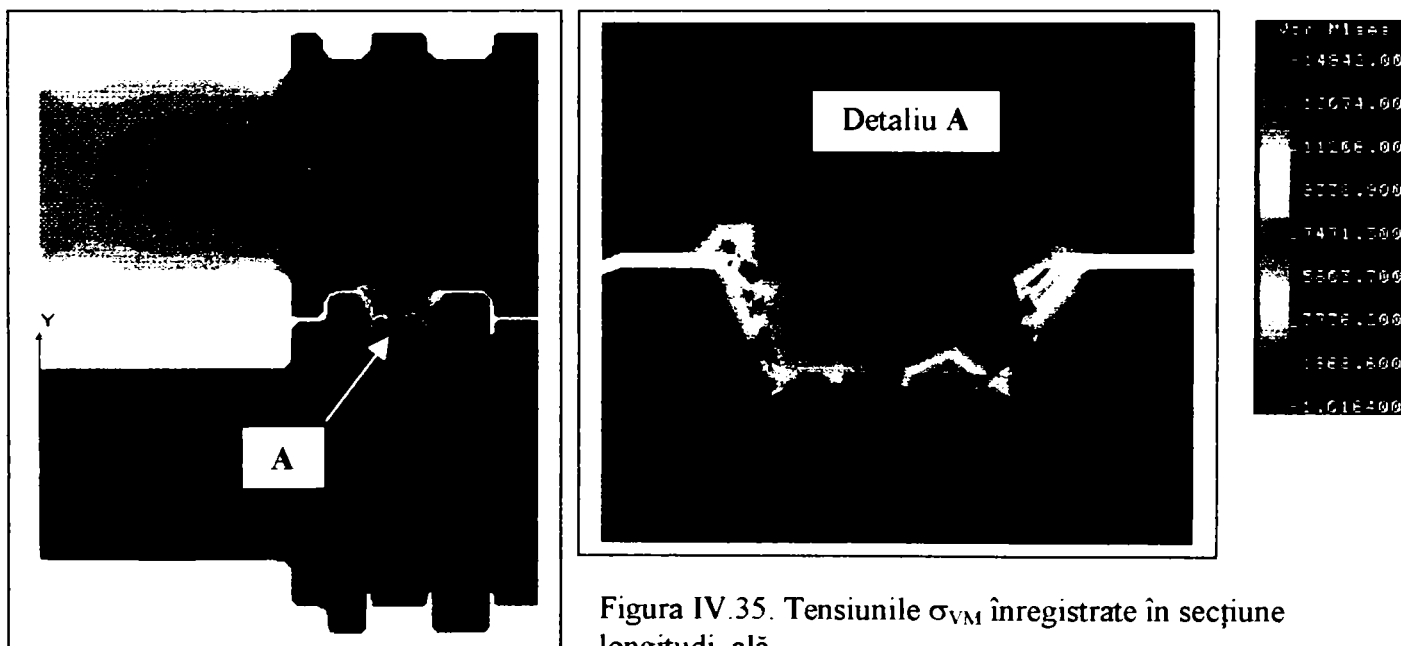


Figura IV.35. Tensiunile σ_{VM} înregistrate în secțiune longitudinală.

În fig.IV.35 este prezentată variația tensiunilor σ_{VM} înregistrate în secțiune longitudinală. Valoarea maximă a acesteia este de 14942,00 N/mm².

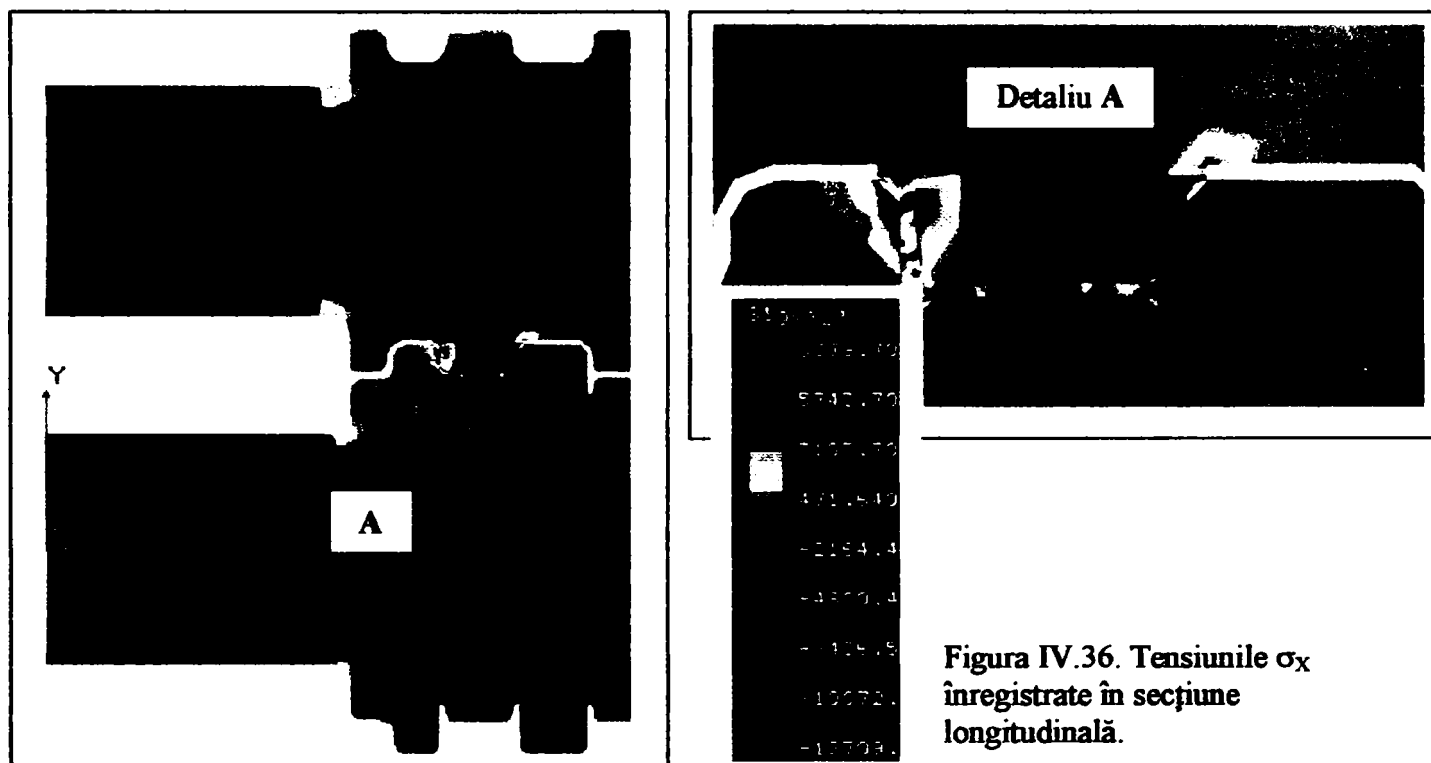


Figura IV.36. Tensiunile σ_x înregistrate în secțiune longitudinală.

IV.2.3.2. Calculul tensiunilor termice la 850°C, cu răcirea aplicată pe patru suprafețe

Și în cazul efectuării calculului tensiunilor termice la 850°C, cu răcirea cilindrilor de laminare aplicată pe patru suprafețe, s-a luat în considerare faptul că tensiunile din zona fusurilor nu sunt relevante (s-au impus deplasări nule, datorită faptului că s-au neglijat jocurile din lagăre)

Simularea efectuată pentru calculul acestor tensiuni termice urmărește aceiași pași ca și pentru laminarea la 800°C, iar programul de calcul determină tensiunile σ_X , σ_Y , σ_Z , σ_{VM} .

Schema suprafețelor răcite cu apă față de poziția laminatului este prezentată în fig IV 37

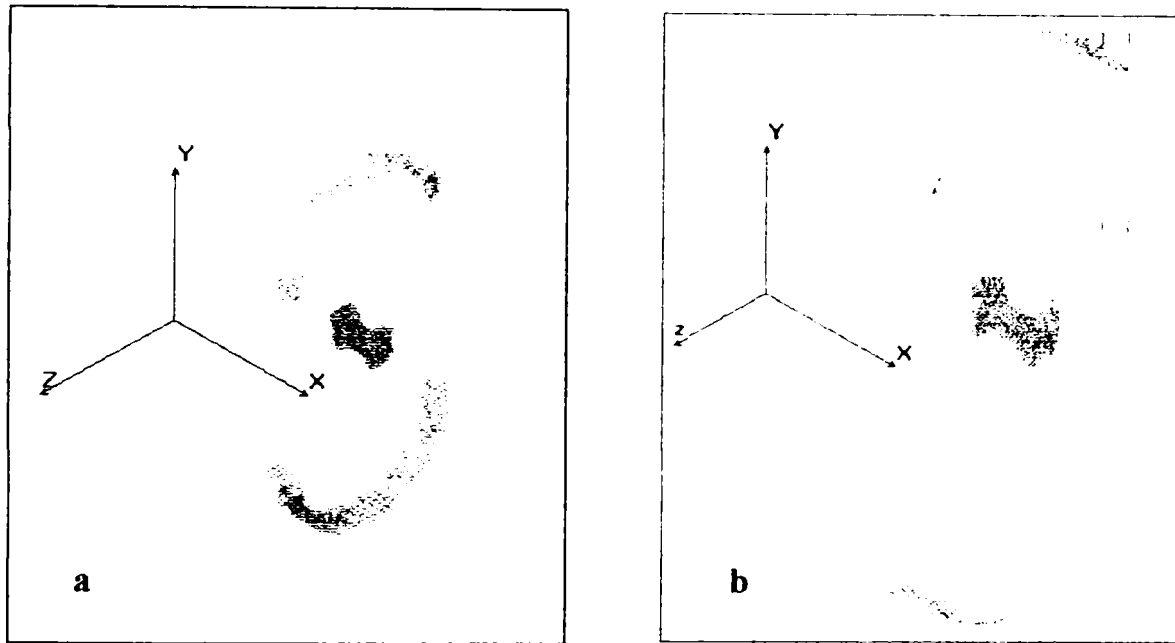


Figura IV.37. Schema de răcire a cilindrilor de laminare, fără prezentarea suprafețelor de aplicație a apei de răcire (fig. a) și cu prezentarea acestora (suprafețele 179, 180 și 67, 68) (fig b).

Dispunerea nodurilor pe circumferința calibrului este cea prezentată în fig IV.25. Rezultatele simulării sunt prezentate, și aici, în două variante: în secțiune longitudinală și transversală.

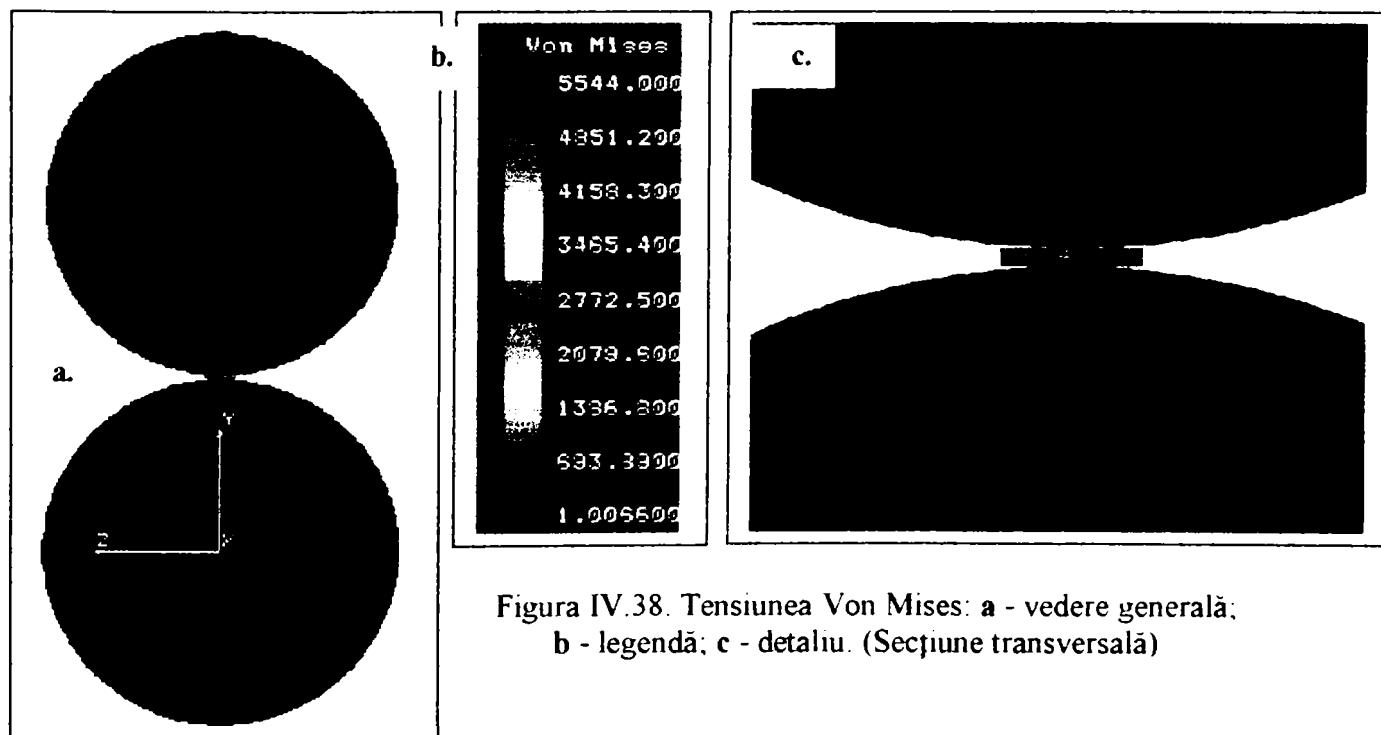


Figura IV.38. Tensiunea Von Mises: a - vedere generală; b - legendă; c - detaliu. (Secțiune transversală)

Astfel, în fig. IV.38 este prezentat ansamblul general al cilindrilor de laminare, în secțiune transversală.

În fig. IV.39, este prezentat ansamblul secțiunii transversale a cilindrilor precum și valorile tensiunilor Von Mises pentru nodurile: 35215, 35218, 35221, 35224, 35227, 35230, 35233, 35236, 35239, 35242.

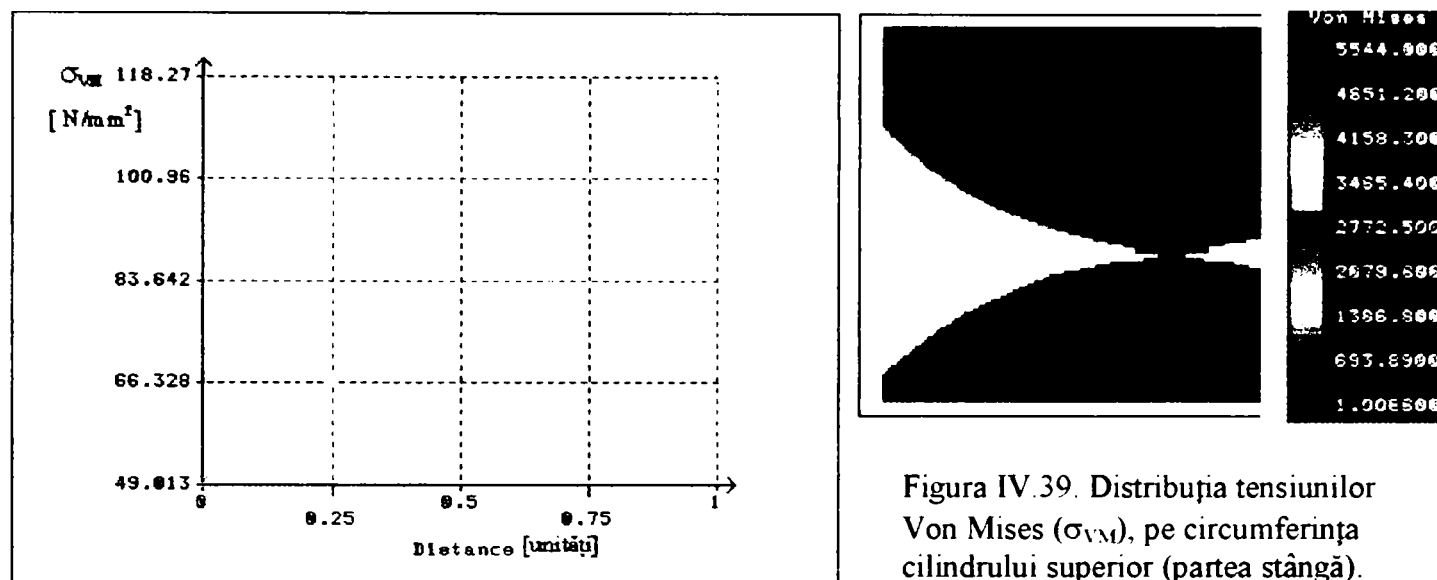


Figura IV.39. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}), pe circumferința cilindrului superior (partea stângă).

Din graficul reprezentat în figură rezultă creșterea tensiunilor termice odată cu apropierea de zona de laminare (pentru nodul 35215 tensiunea $\sigma_{VM} = 49,013 N/mm^2$ iar pentru nodul 35242, $\sigma_{VM}=118,27 N/mm^2$). Distanța dintre primul și ultimul nod studiat reprezintă, de fapt, lungimea coardei, respectiv 167,8894 mm (în graficul prezentat în fig. IV.39, aceasta este considerată ca fiind egală cu unitatea).

Figura IV.40 prezintă ansamblul secțiunii transversale a cilindrilor de laminare pentru următoarele noduri: 35126, 35129, 35132, 35135, 35138, 35141, 35144, 35147, 35150, 35153, 35156, precum și valorile tensiunilor Von Mises (pentru nodul 35126 $\sigma_{VM} = 115,15 N/mm^2$ iar pentru nodul 35156, $\sigma_{VM} = 48,221 N/mm^2$). Lungimea calculată a coardei este de 185,1947 mm.

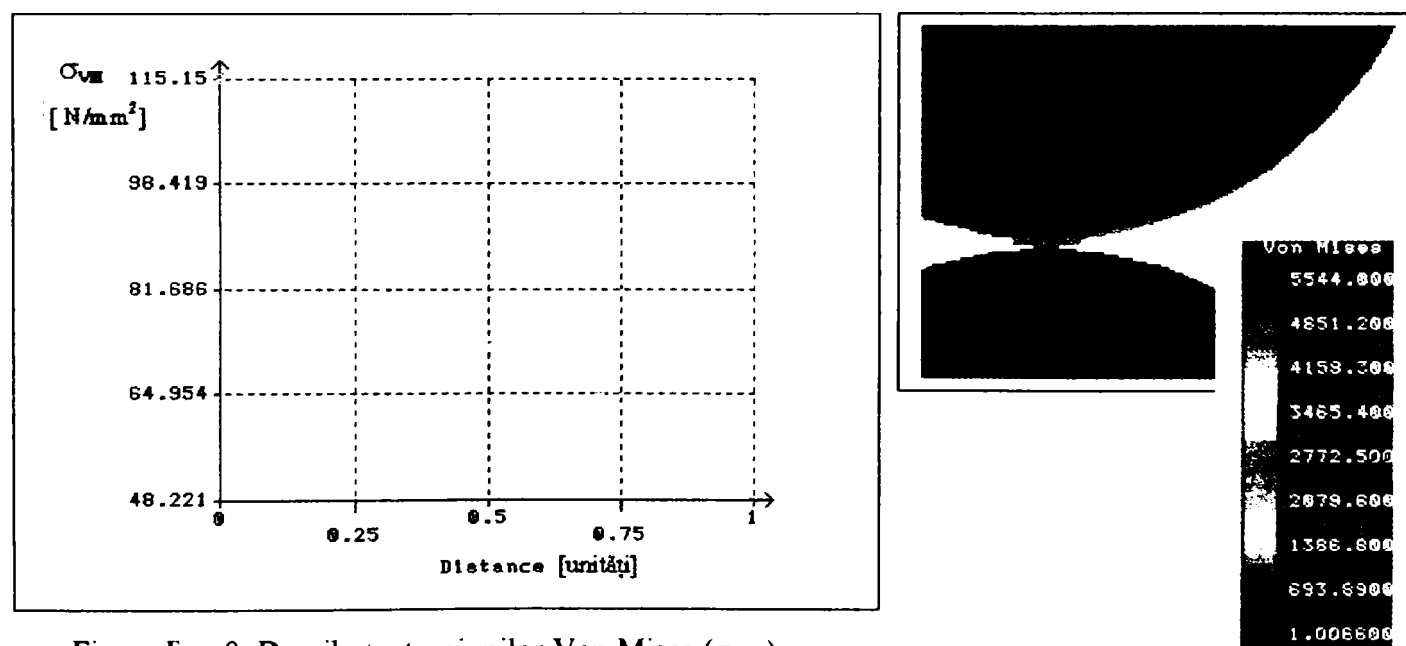


Figura IV.40. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}), pe circumferința cilindrului superior (partea dreaptă).

În mod similar, în fig.IV.41, IV.42, sunt prezentate valorile tensiunilor maxime (116,41 N/mm² pentru nodul 4277 și 112,65 N/mm² pentru nodul 4467) și minime (65,243 N/mm² pentru nodul 4467 și 65,308 N/mm² pentru nodul 4423).

Lungimile celor două coarde sunt, în acest caz, 170,51 mm.

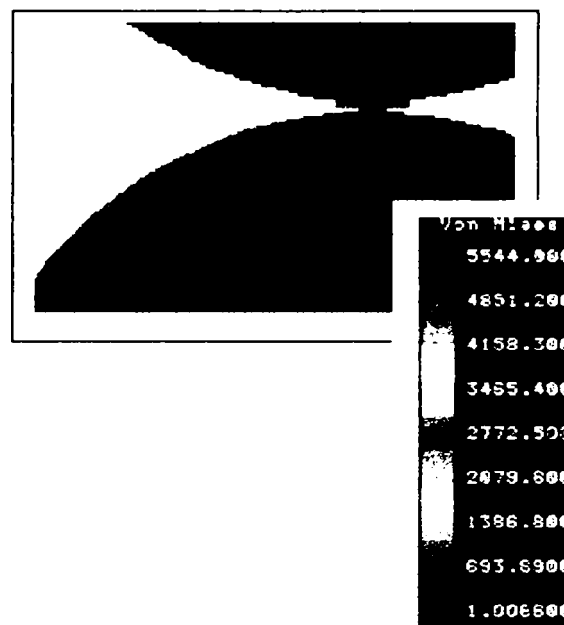
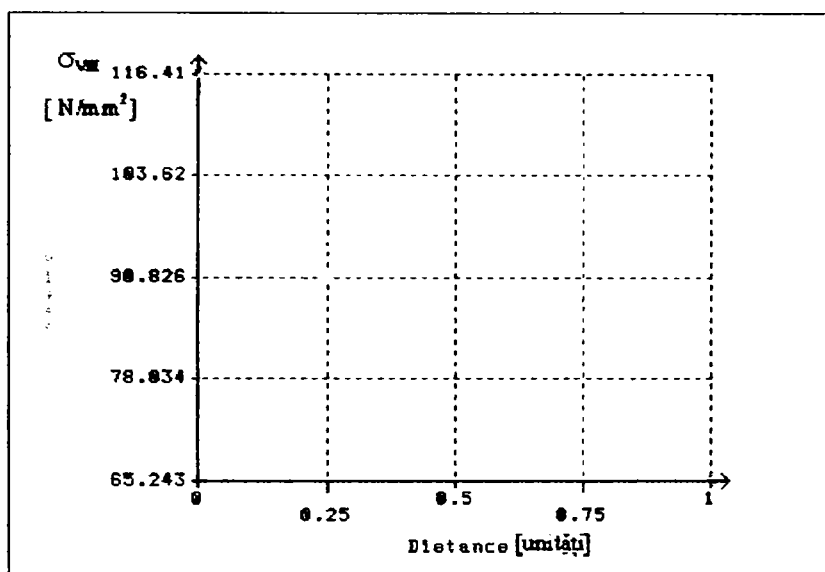


Figura IV.41. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}), pe circumferința cilindrului inferior (partea stângă).

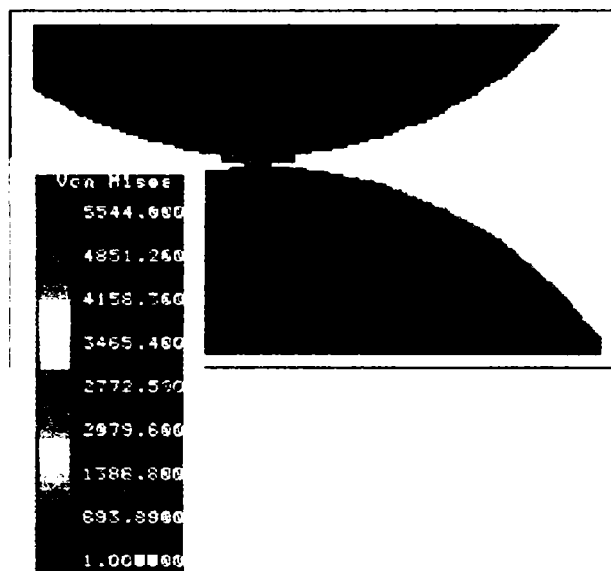
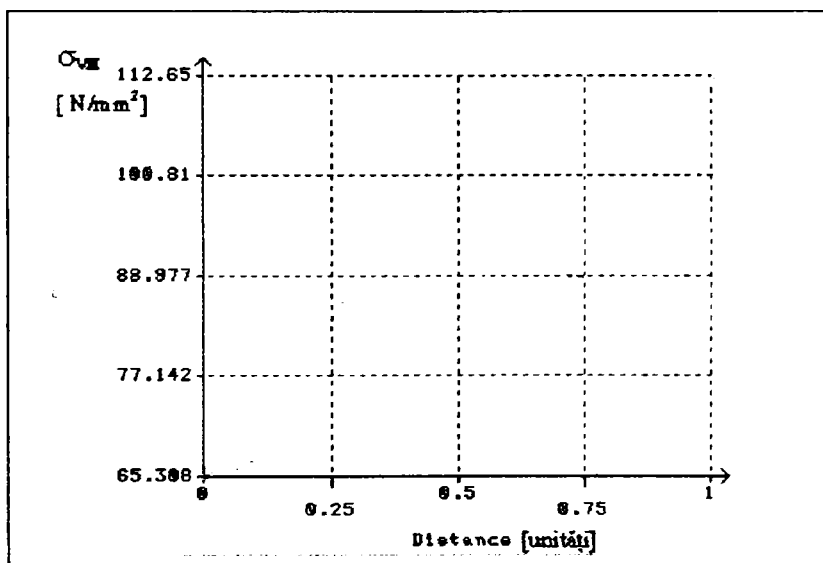


Figura IV.42. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}), pe circumferința cilindrului inferior (partea dreaptă).

În **secțiune longitudinală** se iau în considerare tensiunile de-a lungul celor trei axe de coordonate σ_X , σ_Y , σ_Z , precum și σ_{VM} .

În fig.IV.43 sunt prezentate tensiunile σ_{VM} în secțiune longitudinală (valoarea maximă a tensiunii Von Mises înregistrată, conform simulării numerice, este $\sigma_{VM \max} = 5544 \text{ N/mm}^2$, iar cea minimă este de aprox. 1 N/mm^2).

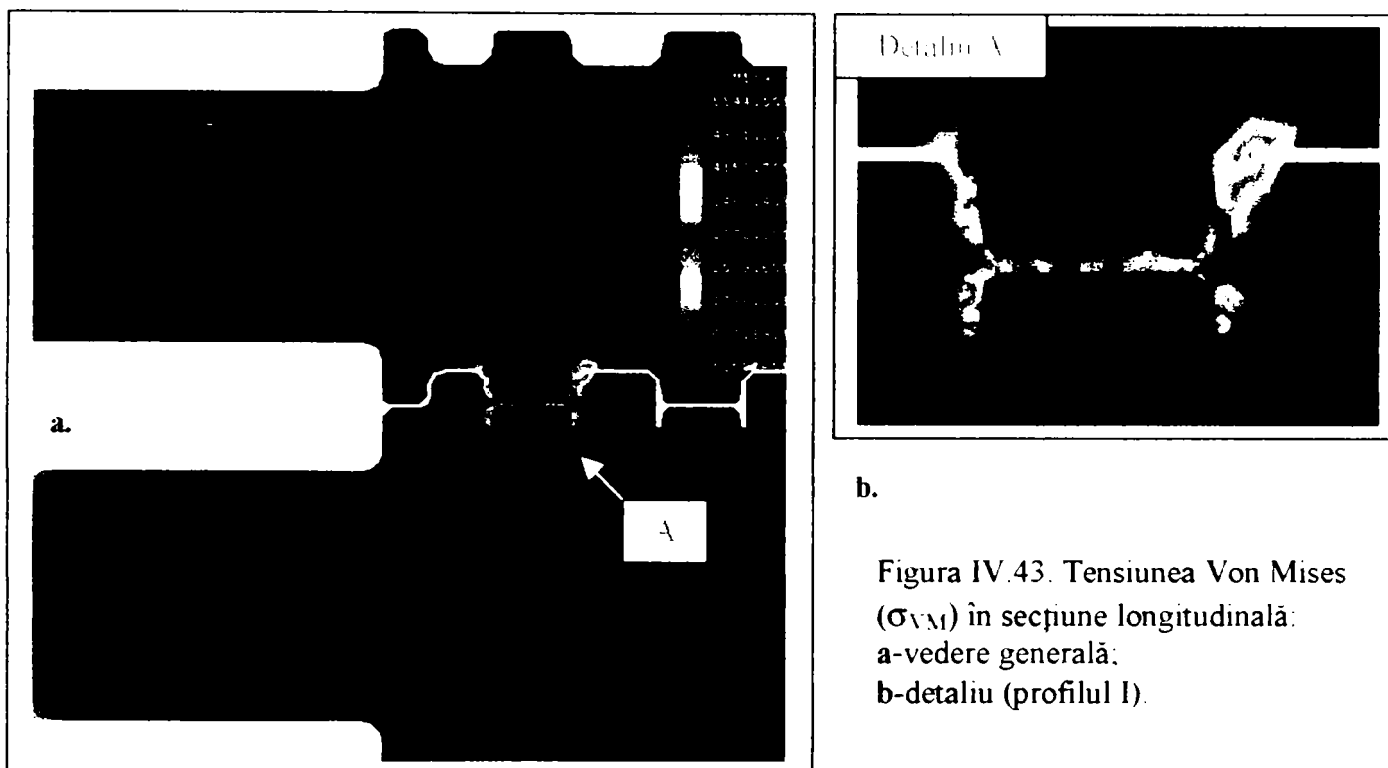


Figura IV.43. Tensiunea Von Mises (σ_{VM}) în secțiune longitudinală:
 a-vedere generală.
 b-detaliu (profilul I).

În fig.IV.44 se prezintă tensiunile σ_X în secțiune longitudinală (valoarea maximă a tensiunii, de-a lungul axei OX, este $\sigma_{X_{max}} = 2612,90 \text{ N/mm}^2$, iar cea minimă este de $\sigma_{X_{min}} = -4352,70 \text{ N/mm}^2$)

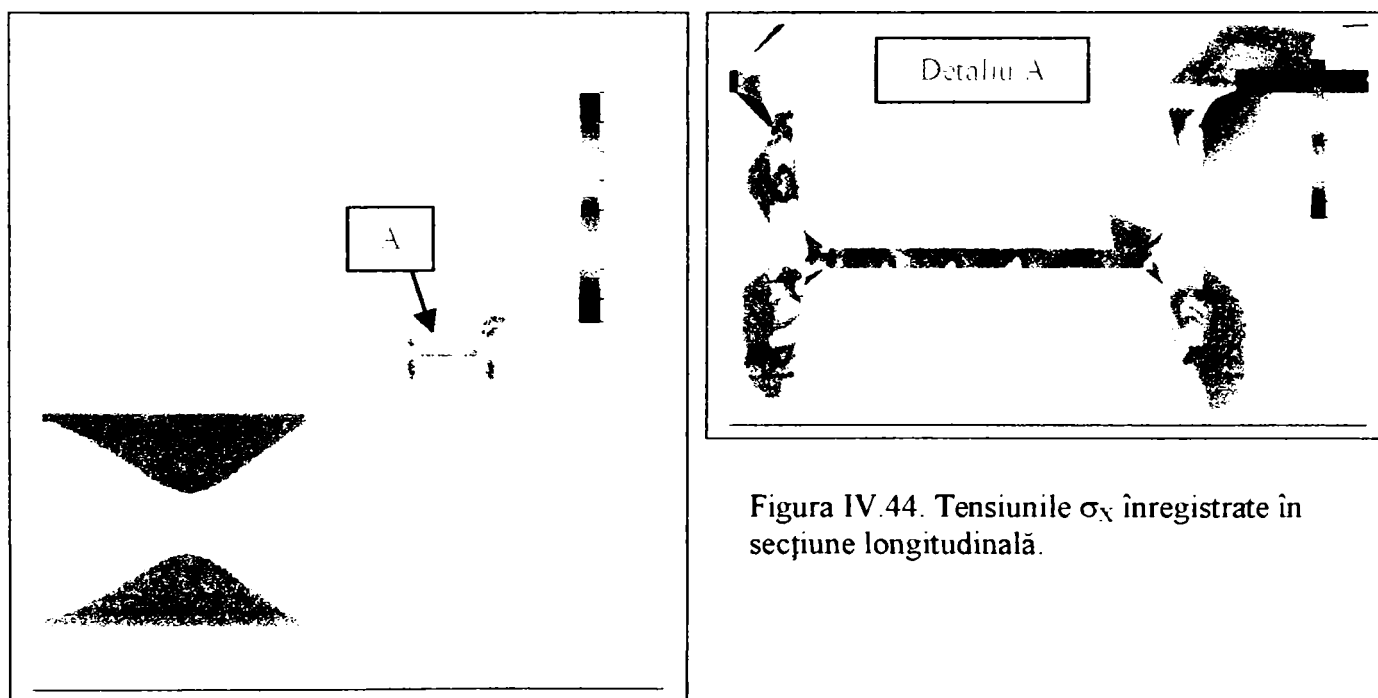


Figura IV.44. Tensiunile σ_X înregistrate în secțiune longitudinală.

Tensiunile σ_Y , în secțiune longitudinală, sunt prezentate în fig. IV.45 (în urma rulării programului de simulare a rezultat că valoarea maximă a tensiunii de-a lungul axei OY, este $\sigma_{Y_{max}} = 4692,90 \text{ N/mm}^2$, iar cea minimă este de $\sigma_{Y_{min}} = -4027,80 \text{ N/mm}^2$).

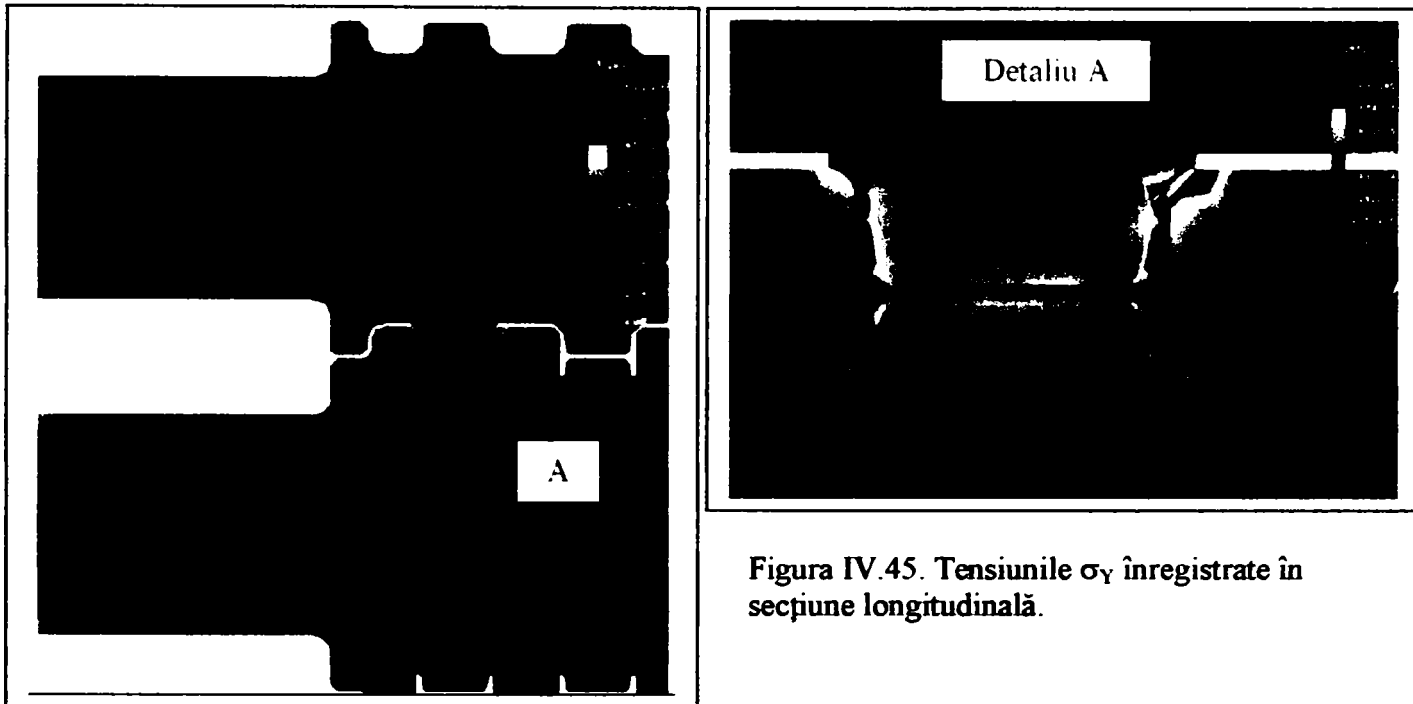


Figura IV.45. Tensiunile σ_y înregistrate în secțiune longitudinală.

În mod similar, în fig.IV.46 sunt prezentate tensiunile σ_z : valoarea maximă a tensiunii de-a lungul axei OZ, este $\sigma_{z \max} = 2245,40 \text{ N/mm}^2$, iar cea minimă este de $\sigma_{z \min} = -2149,80 \text{ N/mm}^2$.

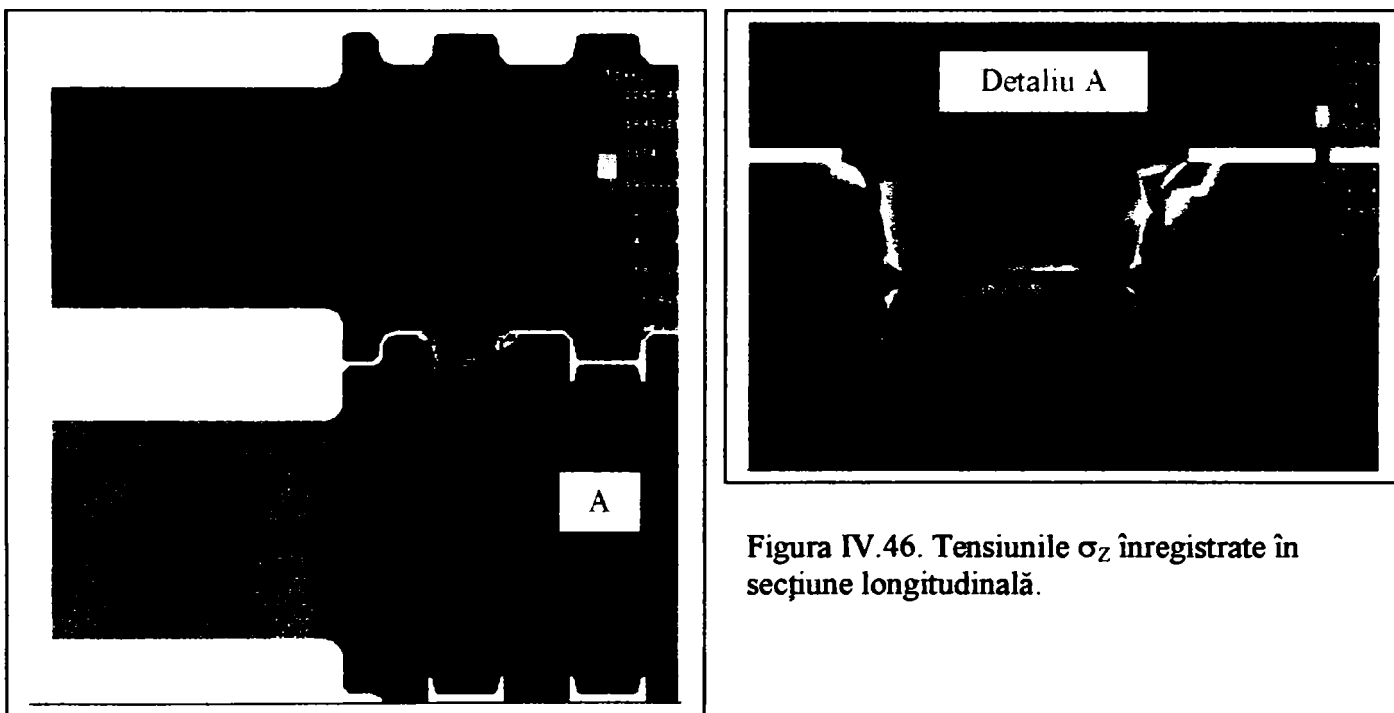


Figura IV.46. Tensiunile σ_z înregistrate în secțiune longitudinală.

În tabelul IV.5 sunt prezentate, comparativ, valorile înregistrate pentru tensiunile termice, respectiv tensiunile echivalente Von Mises (σ_{VM}) pentru cele două modalități de răcire (pe două și patru suprafețe) și pentru temperaturile de 800 și 850°C. După cum s-a precizat la începutul capitoulului tensiunile termice au un rol determinat în obținerea unor valori mari pentru durabilitatea înregistrată în exploatare. Într-adevăr, din tabel rezultă faptul că, pentru condițiile actuale de exploatare, simularea fenomenului a furnizat valori foarte ridicate pentru tensiunea Von Mises, și anume valori maxime cuprinse în intervalele $\sigma_{VM}=930,77 \dots 928,52 \text{ N/mm}^2$ pentru cilindrul superior

și $\sigma_{VM}=822,58 \dots 902,51 \text{ N/mm}^2$ pentru cel inferior, la 800°C și $\sigma_{VM}=115,15 \dots 118,27 \text{ N/mm}^2$ pentru cilindrul superior și $\sigma_{VM} = 112,65 \dots 116,41 \text{ N/mm}^2$ pentru cel inferior, la 850°C .

În concluzie, se poate preciza faptul că, pentru evitarea apariției tensiunilor termice cu valori mari (care induc oboseala termică și apariția exfolierilor) este indicată folosirea sistemului de răcire cu apă aplicată pe patru suprafețe.

Tabelul IV.5. Tensiunile Von Mises (σ_{VM}) înregistrate pentru cazurile de simulare studiate.

Nr. crt.	Număr nod	Tensiunea Von Mises - răcire pe două suprafețe - 800°C [N/mm^2]	Tensiunea Von Mises - răcire pe patru suprafețe - 850°C [N/mm^2]	Nr. crt.	Număr nod	Tensiunea Von Mises - răcire pe două suprafețe - 800°C [N/mm^2]	Tensiunea Von Mises - răcire pe patru suprafețe - 850°C [N/mm^2]
1	35126	930,77	115,15	22	4321	185,26	65,24
2	35129	588,34	106,8	23	4317	190,04	68,52
3	35132	372,32	85,86	24	4313	196,26	81,23
4	35135	288,71	81,68	25	4309	196,2	88,72
5	35138	245,91	69,13	26	4297	189,31	92,96
6	35141	245,91	72,21	27	4295	184,2	100,42
7	35144	256,61	75,41	28	4289	196,04	97,22
8	35147	267,31	65	29	4285	218,83	98,42
9	35150	278,81	60,76	30	4281	446,73	99,12
10	35153	290,32	52,404	31	4277	902,51	116,41
11	35156	288,715	48,221	32	4467	822,58	112,65
12	35242	928,52	118,27	33	4463	327,32	71,22
13	35239	578,55	96,63	34	4459	212,31	87,46
14	35236	348,43	93,301	35	4455	189,71	89,01
15	35233	197,36	82,56	36	4451	178,84	94,89
16	35230	134,33	81,4	37	4447	167	89,01
17	35227	122,12	79,52	38	4443	167,1	93,41
18	35224	121,73	74,98	39	4439	167,1	90,57
19	35221	121,73	70,56	40	4435	144,5	86,01
20	35218	122,68	57,67	41	4431	121,9	71,72
21	35215	121,73	49,013	42	4427	99,33	66,78
				43	4423	99,33	65,308

IV.2.3. Calculul stării de tensiune datorită tensiunii mecanice (cazul de încărcare cu forță pe lățimea calibrului)

În general, se poate afirma că toate tensiunile de natură mecanică folosite în calculele clasice de rezistență a cilindrilor de laminare au valori ne semnificative, iar aceste calcule nu satisfac condițiile reale de exploatare [81].

După cum s-a prezentat în capitolele precedente tăblia cilindrilor de laminare este supusă tensiunilor de încovoiere (produse de forțele de laminare), tensiunilor de răsucire (produse de momentele de laminare) și tensiunilor datorate presiunii de contact ce apar în zona focarelor de deformare [20],[81].

În fig.IV.47. se prezintă schematizat cilindrii de laminare (cazul laminării profilului I), asupra cărora acționează tensiunile considerate în calculul clasic de rezistență.

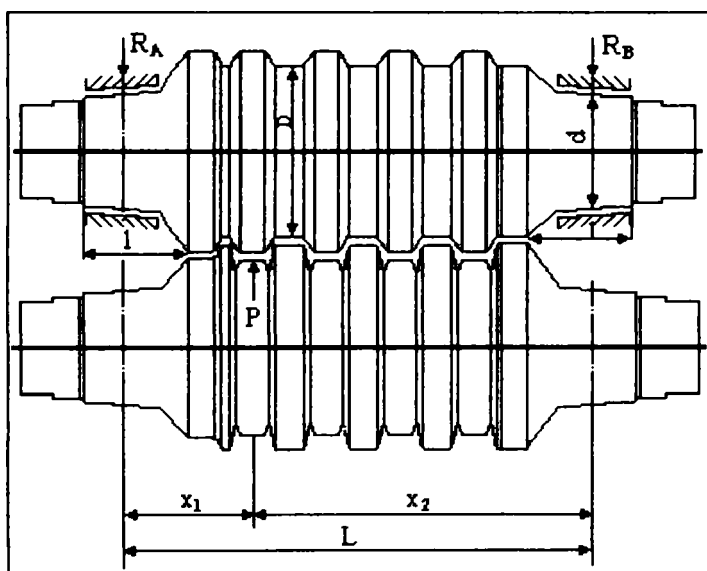


Figura IV.47. Reprezentarea forțelor care acționează asupra cilindrilor de laminare în cazul calculului clasic de rezistență.

Momentul maxim de încovoiere, conform schemei de laminare, analizată pentru fiecare cajă de lucru se determină cu relația [81]:

$$M_i = P \cdot x_1, \quad (IV.35)$$

iar tensiunile de încovoiere se determină cu ajutorul relației [81]:

$$\sigma_i = \frac{M_i}{0,1 \cdot D^3}, \quad (D \text{ este diametrul calibrului de lucru executat pe suprafața tăbliei cilindrului de lucru}), \text{ sau } \sigma_i = \frac{M_i}{J} \cdot \alpha_k = \frac{M_i \cdot r}{\pi \cdot R^4} \quad (IV.36)$$

în care M_i reprezintă momentul încovoiător ce acționează asupra cilindrului în timpul laminării, considerându-se că forța de laminare este uniform repartizată pe lățimea b a profilului,

$$M_i = P \cdot \left[\frac{x_1 \cdot x_2}{L} - \frac{b}{8} \right] \quad (IV.37)$$

unde:

x_1, x_2 - distanța de la lagăr până la axa laminatului;

L - distanța dintre axele lagărelor;

R - raza cilindrului pe calibrul pe care se efectuează laminarea;

b - lățimea laminatului corespunzătoare cu trecerea din calibrul;

α_k - factorul de formă pentru concentrarea tensiunilor pe cilindrii de laminare calibrați;

P - forța de laminare obținută experimental;

r - distanța de la axa neutră din secțiunea radială a cilindrului.

Tensiunile de răsucire produse de momentul de laminare, la care este supusă tăblia cilindrilor, se determină cu relația [81]:

$$\tau = \frac{\alpha_k \cdot M_t}{\frac{I_p}{r}} = \frac{M_t}{\frac{R^4}{2r}} \cdot \alpha_k \quad (\text{IV.38})$$

în care M_t este momentul de răsucire (egal cu momentul de laminare):

$$M_t = 0,5 \cdot P \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}$$

unde:

Δh - reducerea din secțiune, corespunzătoare schemei de laminare;

r - raza dusă din centrul cilindrului până la suprafața elementară.

Tensiunile de încovoire și răsucire acționează simultan în secțiunea cilindrilor de laminare.

Dacă se utilizează, pentru determinarea *presiunii de contact*, formula lui Ekelund, tensiunea la presiunea de contact se determină, utilizând rezultatele experimentale obținute pentru anumiți parametrii de laminare, cu ajutorul relației [20]:

$$\sigma_{pc} = \frac{P_{max}}{B_m \cdot \sqrt{R \cdot \Delta h}} \quad (\text{IV.39})$$

în care P_{max} reprezintă forța maximă de laminare;

B_m - lățimea medie a laminatului în focarul de deformare;

$\sqrt{R \cdot \Delta h}$ - lungimea arcului de contact

R - raza calibrului de laminare;

Δh - reducerea înălțimii laminatului pe treceri din schema de laminare.

În practica industrială, forța de laminare aplicată asupra cilindrilor de laminare (la caja 14), pentru laminarea profilului I, pentru care este efectuată simularea are valoarea de **330 kN** [99], [103].

Modelul de calcul pentru determinarea tensiunilor mecanice, în cazul încărcării calibrului activ cu o forță de **330 kN** este prezentat în fig.IV.48.

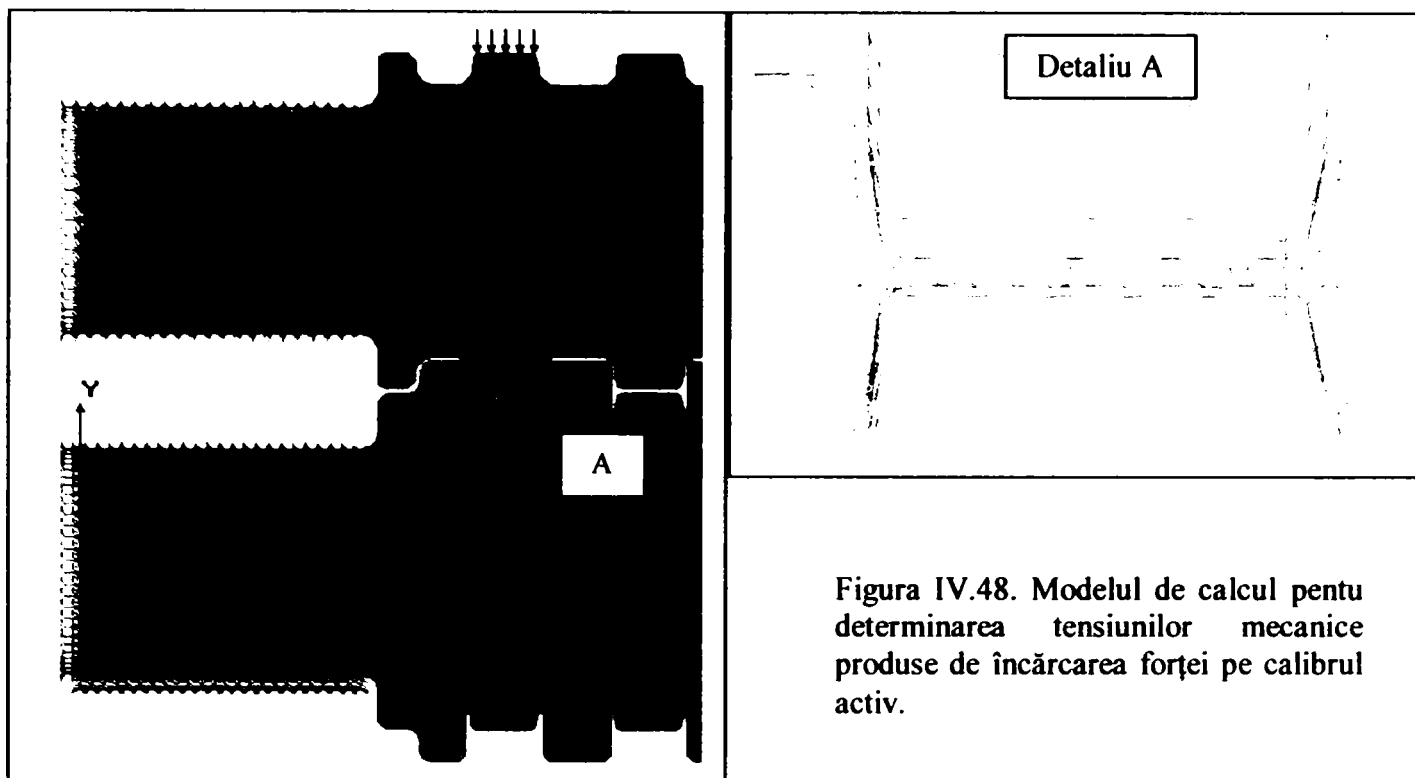


Figura IV.48. Modelul de calcul pentru determinarea tensiunilor mecanice produse de încărcarea forței pe calibrul activ.

În programul de simulare s-au aplicat încărcări ($F_{\text{total}} = 500\text{N}$) pe lungimea generatoarei calibrului activ. Deoarece starea de tensiune în domeniul elastic este direct proporțională cu valoarea încărcării, tensiunile mecanice produse de încărcarea de 33 tf, în cazul laminării profilului I100 (330kN), vor fi stabilite amplificând tensiunile obținute pentru forța $F = 500\text{ N}$ cu factorul $\frac{330000}{500} = 660$.

Rezultă, în legendă, tensiunea maximă Von Mises va fi $\sigma_{\text{VM max}} = 2,32 \times 660 = 1392\text{N/mm}^2$.

În vederea punerii în evidență a valorilor tensiunilor mecanice înregistrate este efectuată secțiunea transversală prin cilindrii de laminare.

În secțiune transversală, pe harta de culori, tensiunea σ_x înregistrată în cilindrii de laminare asupra cărora acționează (pe calibrul activ) forța de laminare, este prezentată în fig.IV.49, iar în fig.IV.50, tensiunea σ_y .

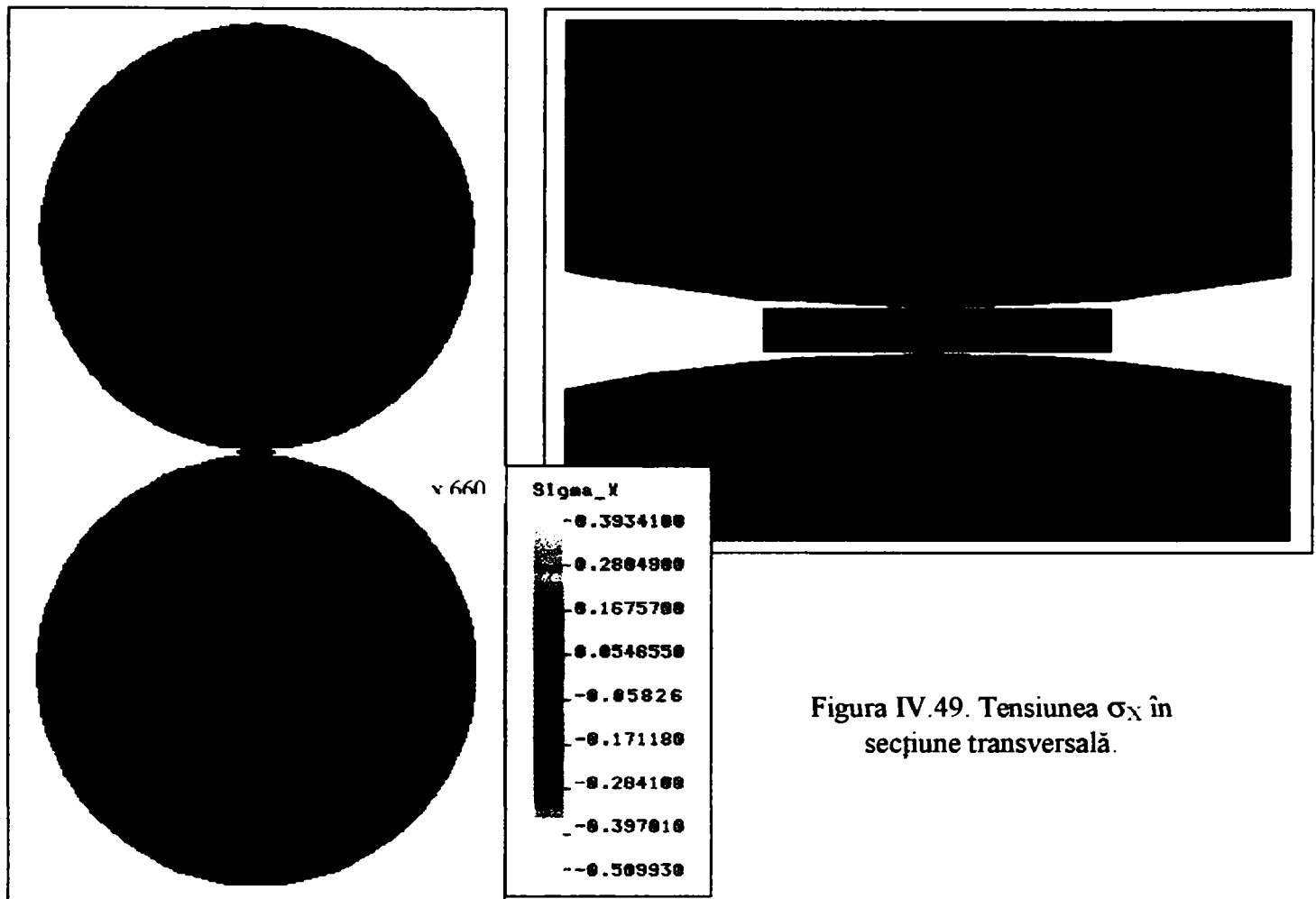


Figura IV.49. Tensiunea σ_x în secțiune transversală.

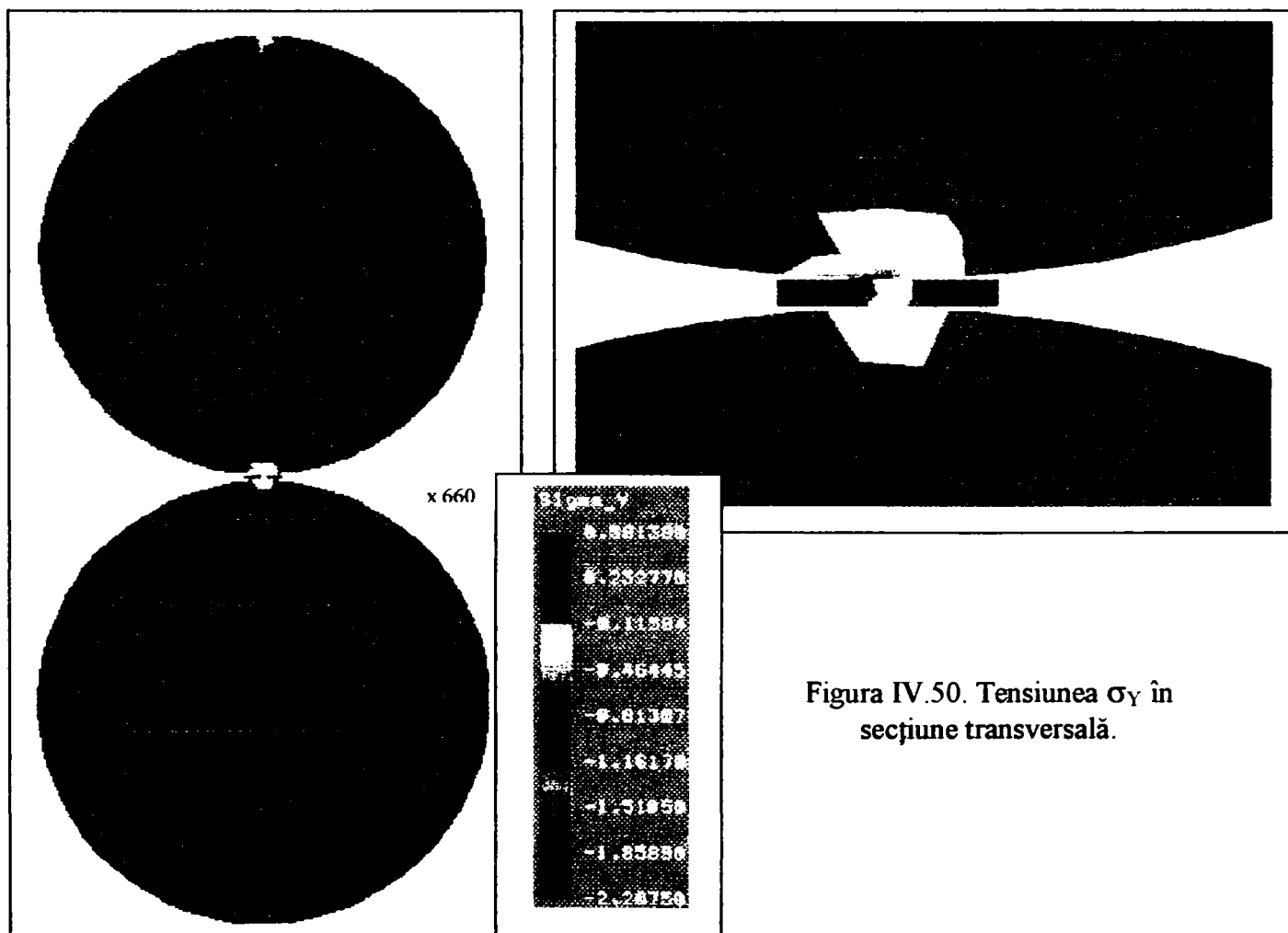


Figura IV.50. Tensiunea σ_y în secțiune transversală.

Pentru a se pune în evidență și mai bine rezultatele simulării, în fig.IV.51 și IV.52, sunt ilustrate secțiunile longitudinale în cele două cazuri, prezentate mai sus.

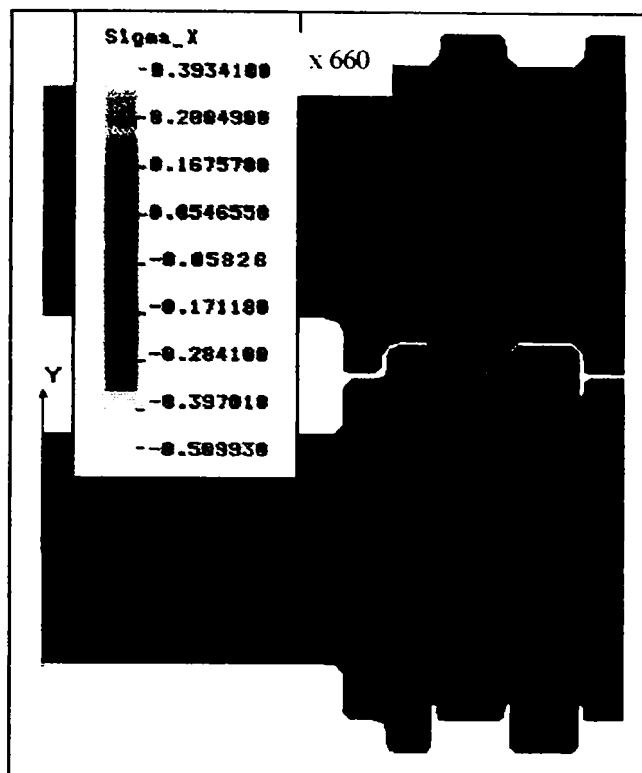


Figura IV.51. Tensiunea σ_x în secțiune longitudinală.

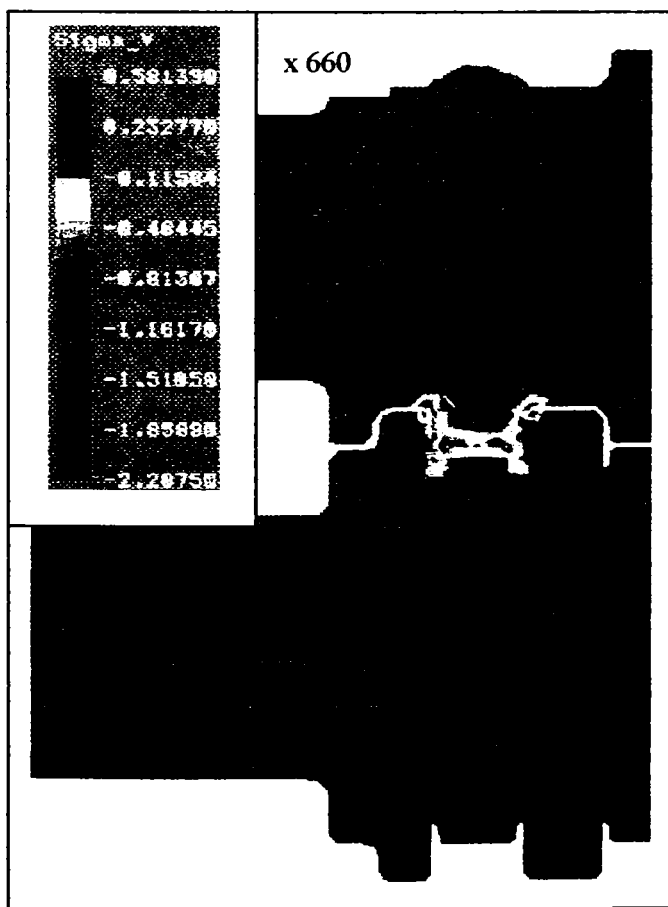
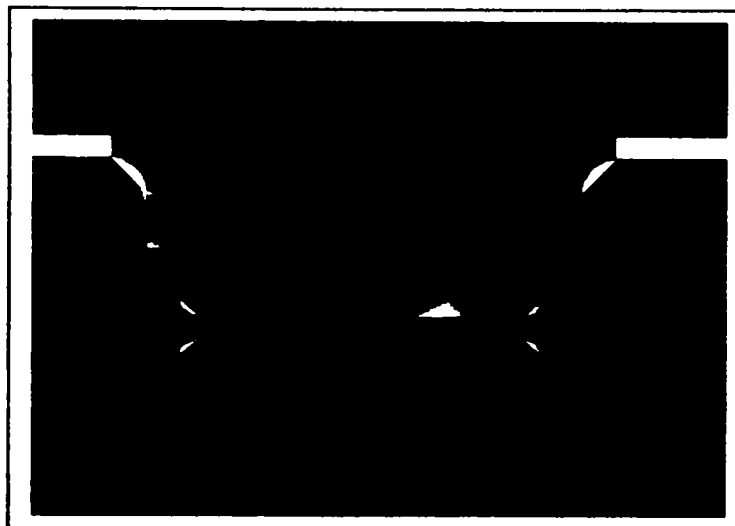
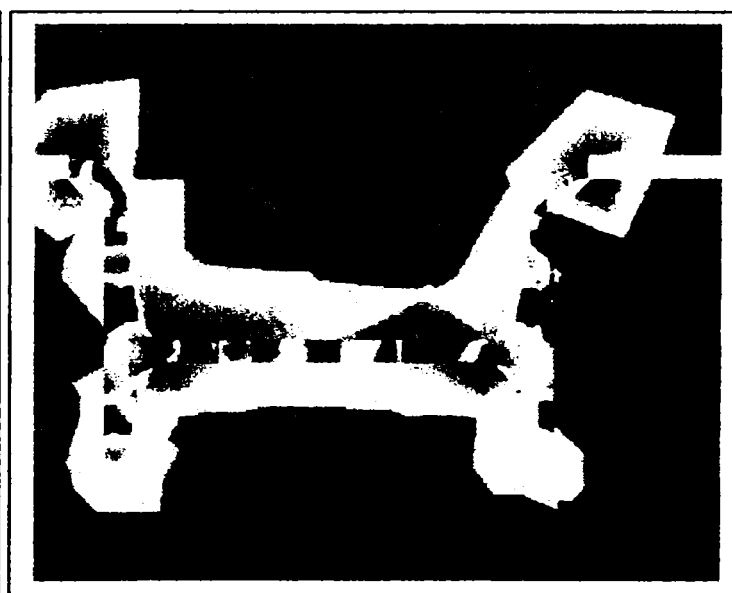


Figura IV.52. Tensiunea σ_y în secțiune longitudinală.



Pentru tensiunea σ_z , rezultatele simulării sunt prezentate în fig.IV.53.

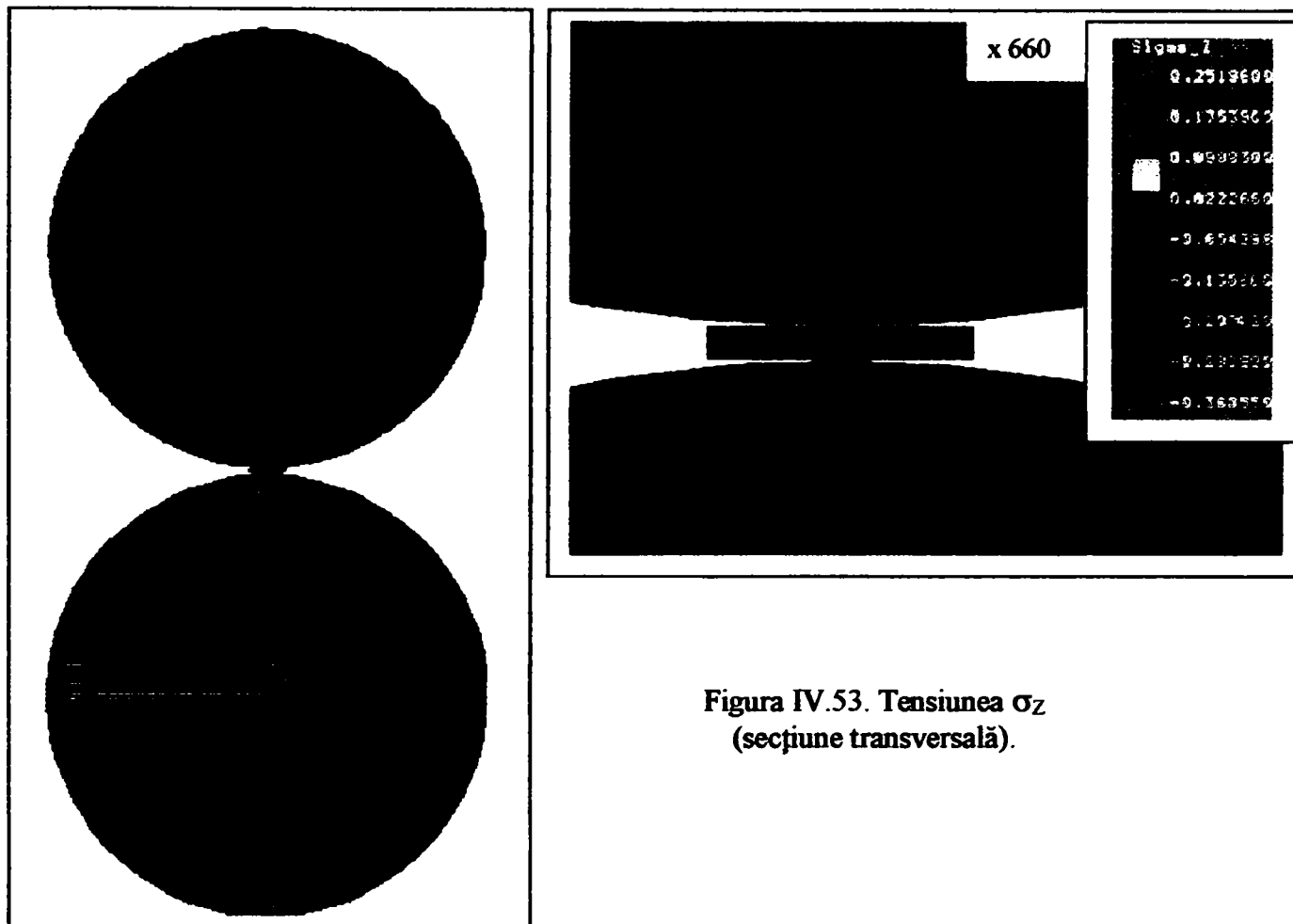


Figura IV.53. Tensiunea σ_z (secțiune transversală).

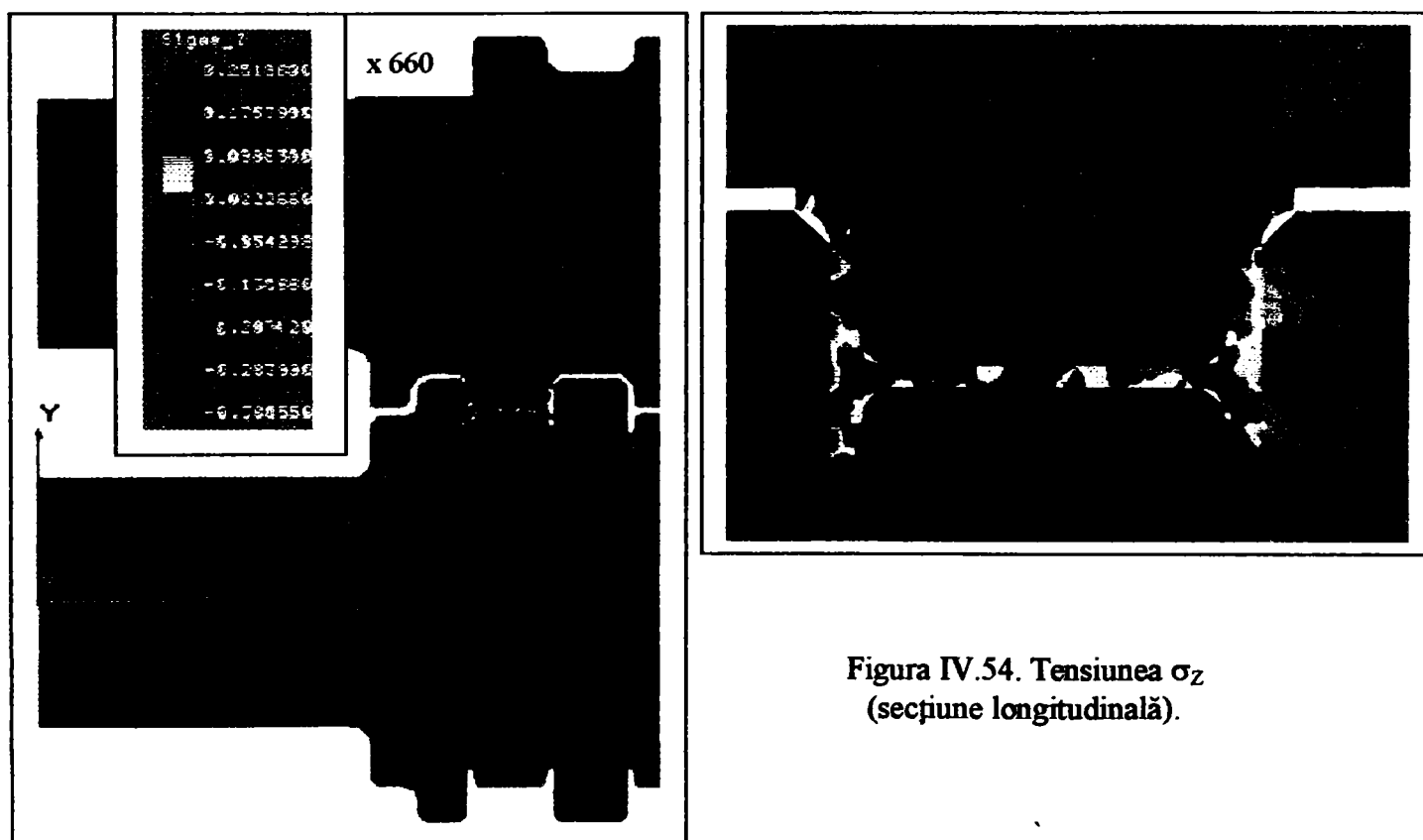


Figura IV.54. Tensiunea σ_z (secțiune longitudinală).

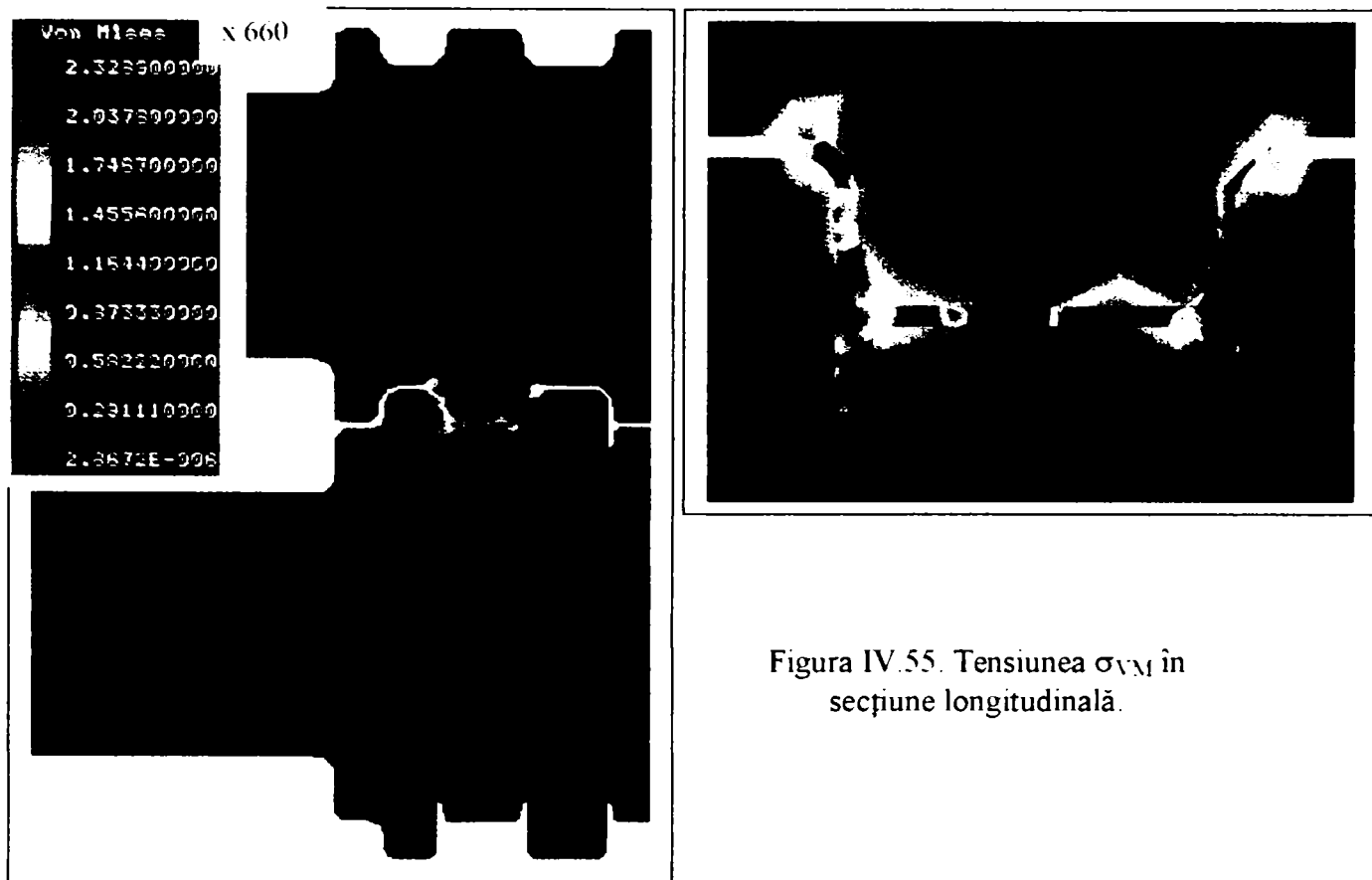


Figura IV.55. Tensiunea σ_{VM} în secțiune longitudinală.

În vederea trasării graficelor corespunzătoare tensiunilor mecanice în nodurile situate pe circumferința calibrului, în programul de simulare aceste noduri trebuie specificate (fig. IV.25).

În fig. IV.56, IV.57, IV.58, IV.59 se prezintă ansamblul secțiunilor transversale ale cilindrilor precum și valorile tensiunilor Von Mises. Au fost înregistrate următoarele valori:

- pentru nodurile: $\sigma_{VM-35215} = 0,5808 \text{ N/mm}^2$ iar $\sigma_{VM-35242} = 32,0694 \text{ N/mm}^2$;
- pentru nodurile: $\sigma_{VM-35156} = \text{aprox. } 0,3432 \text{ N/mm}^2$ iar $\sigma_{VM-35126} = 24,1362 \text{ N/mm}^2$;
- pentru nodurile: $\sigma_{VM-4321} = 1,122 \text{ N/mm}^2$ iar $\sigma_{VM-4277} = 28,1886 \text{ N/mm}^2$;
- pentru nodurile: $\sigma_{VM-4423} = \text{aprox. } 0,8448 \text{ N/mm}^2$ iar $\sigma_{VM-4467} = 28,0038 \text{ N/mm}^2$.

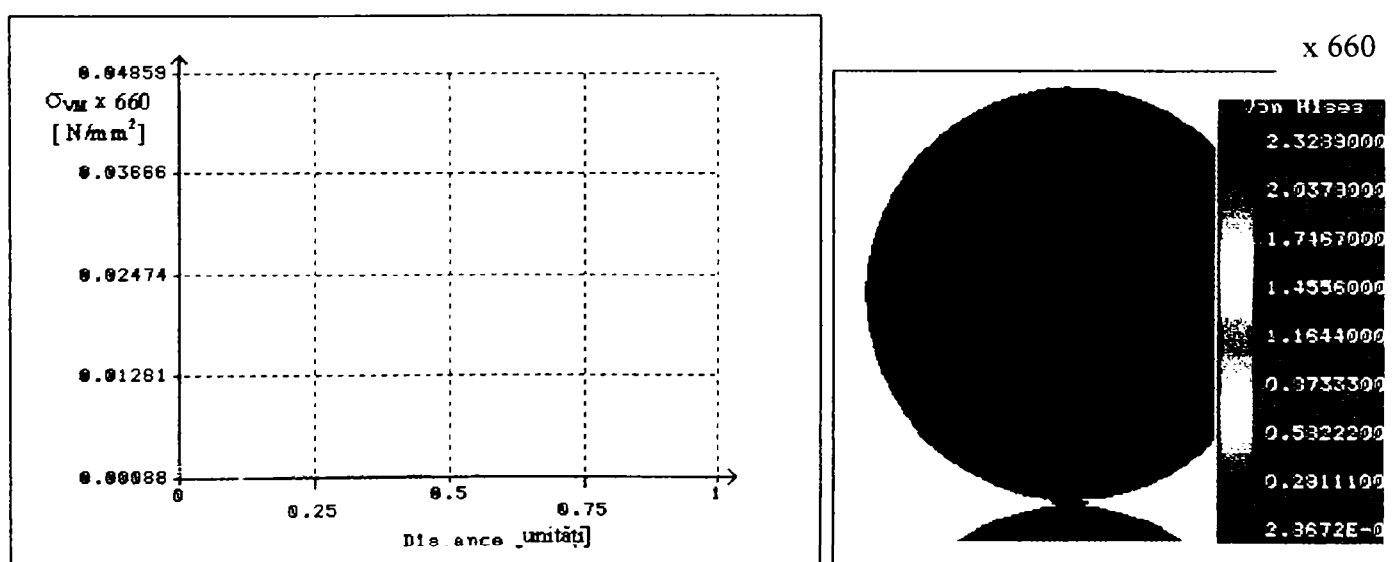


Figura IV.56. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}) pe circumferința cilindrului superior (partea stângă)

În fig. IV.56 distanța dintre primul și ultimul nod studiat, respectiv lungimea coardei, este de 167,8894 mm (în graficul prezentat în figură aceasta este considerată ca fiind egală cu unitatea).

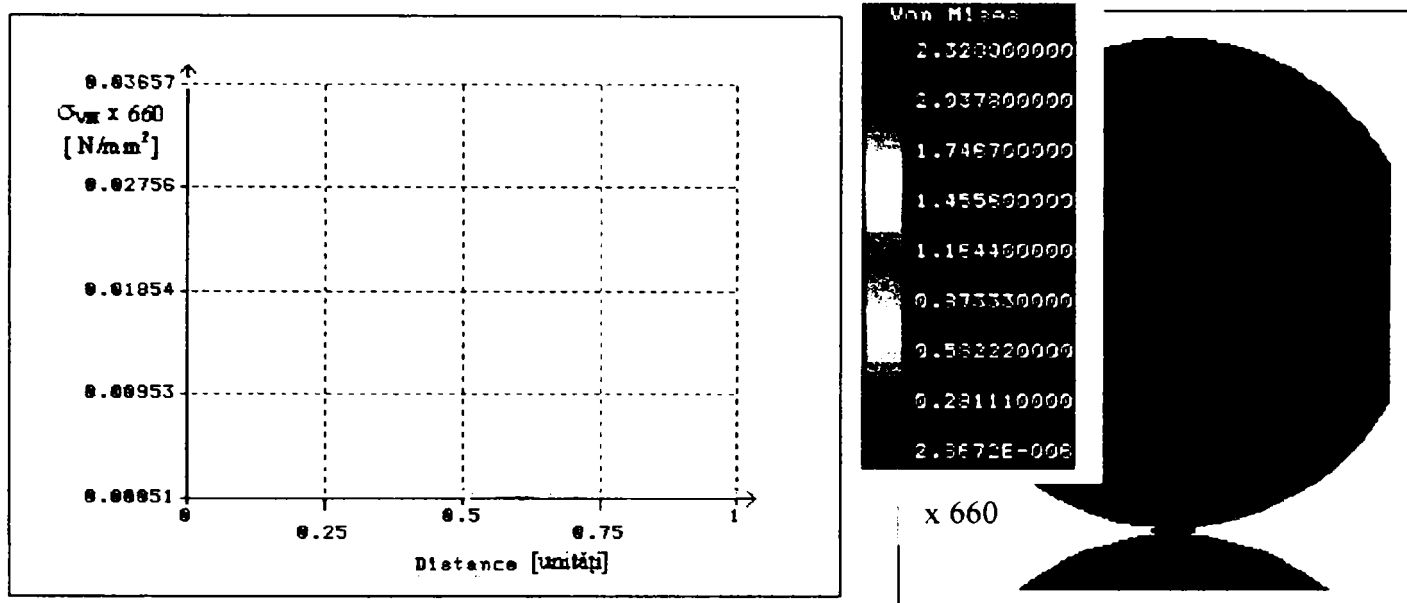


Figura IV.57. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}) pe circumferința cilindrului superior (partea dreaptă).

Lungimea calculată a coardei, pentru cazul prezentat în fig. III.47, este de 185,1947 mm.

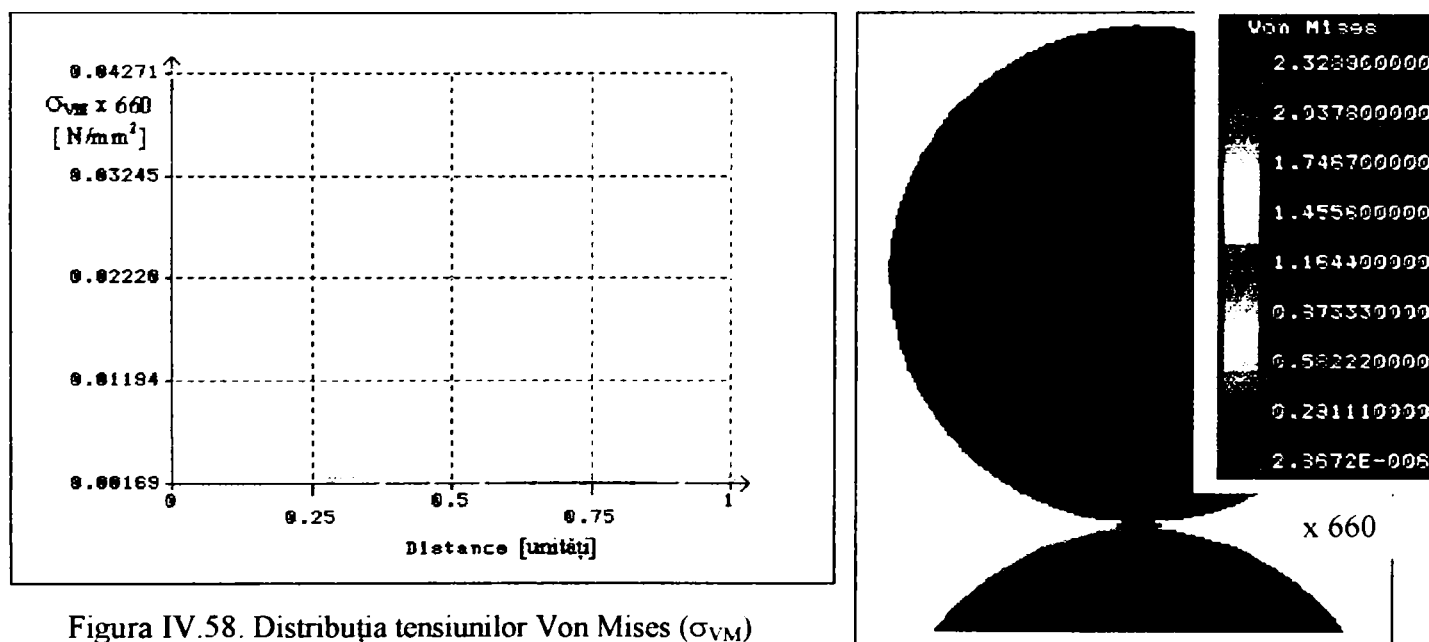


Figura IV.58. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}) pe circumferința cilindrului inferior (partea stângă).

În fig. IV.58, lungimea calculată a coardei este de 185,1947 mm.

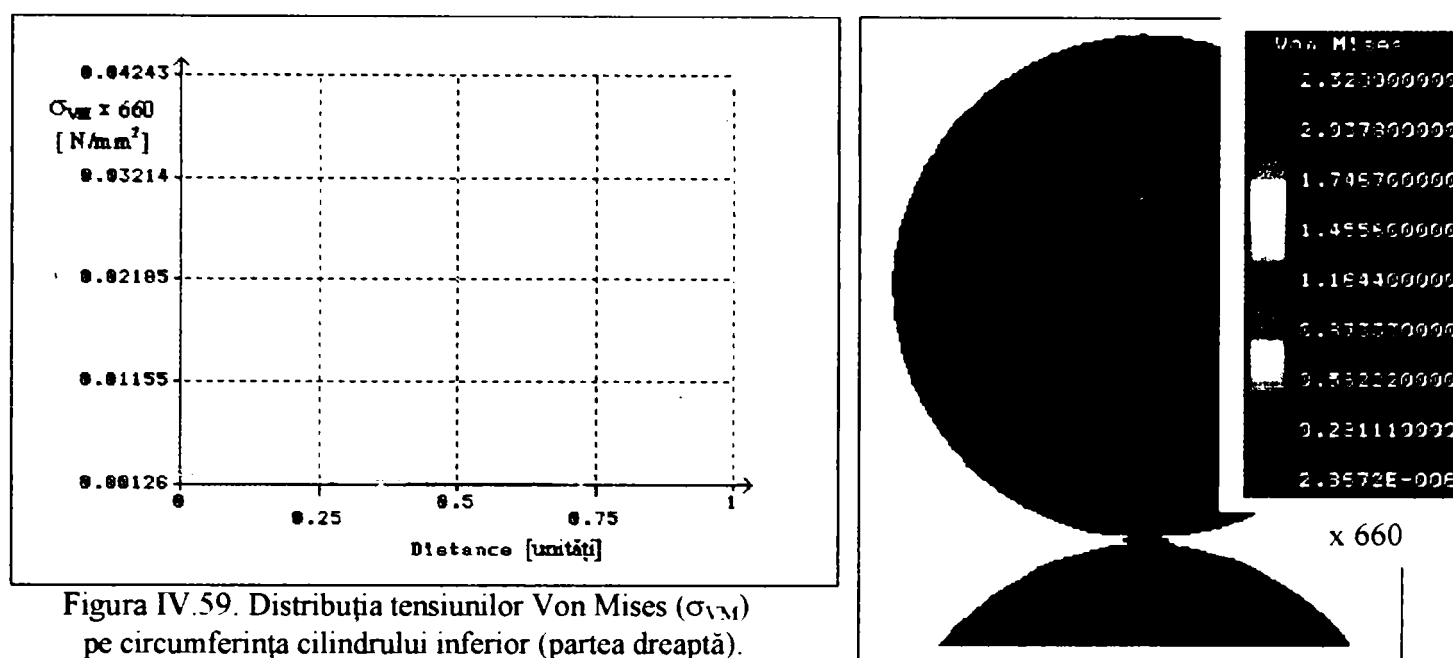


Figura IV.59. Distribuția tensiunilor Von Mises (σ_{VM}) pe circumferința cilindrului inferior (partea dreaptă).

În cazul prezentat în fig. IV.59, lungimea calculată a coardei este de 185,1947 mm.

Valorile înregistrate pentru cele 43 noduri sunt prezentate în cele ce urmează, sub formă tabelară (tab. IV.6).

Tabelul IV.6. Tensiunile mecanice înregistrate pentru cele 43 noduri.

Nr. crt.	Numărul nodului	Tensiune mecanică, [N/mm ²]	Nr. crt.	Număr nod	Tensiune mecanică [N/mm ²]
1	35126	24.13620	22	4321	1.11540
2	35129	7.77480	23	4317	1.11540
3	35132	2.55882	24	4313	1.11540
4	35135	1.82490	25	4309	1.22760
5	35138	1.08075	26	4297	1.22760
6	35141	0.63360	27	4295	1.22760
7	35144	0.33660	28	4289	1.30680
8	35147	0.63360	29	4285	2.38920
9	35150	0.64680	30	4281	7.16760
10	35153	0.82236	31	4277	28.18860
11	35156	1.08042	32	4467	28.00380
12	35242	32.06940	33	4463	6.50760
13	35239	12.38820	34	4459	2.11860
14	35236	0.45177	35	4455	1.21440
15	35233	2.05656	36	4451	0.83160
16	35230	1.07250	37	4447	0.83160
17	35227	0.58080	38	4443	0.83160
18	35224	0.58080	39	4439	0.85800
19	35221	0.58080	40	4435	1.30680
20	35218	1.07250	41	4431	1.49820
21	35215	1.49688	42	4427	1.49820
			43	4423	1.49820

Ținându-se cont de faptul că, în general, valorile rezultate în urma simulării numerice cu ajutorul programului COSMOS/M 2.5., au valori relativ mici se poate trage concluzia că *tensiunile mecanice au o influență nesemnificativă asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare (comparativ cu tensiunile termice).*

IV.3. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Simularea comportării în exploatare a cilindrilor de laminare folosind metoda elementului finit are ca obiectiv studiul unor probleme legate de distribuția câmpurilor termice, precum și a tensiunilor termice și mecanice înregistrate în cilindrii de laminare în timpul exploatării. Pentru realizarea obiectivului propus a fost elaborat un program de studii și cercetări care a urmărit:

- analiza geometriei cilindrilor de laminare folosiți la Laminoarele de profile mijlocii, precum și a profilului I 100, care rezultă în urma laminării
- modelarea numerică a ansamblului cilindri de laminare-semifabricat (profil I) utilizând programul de calcul COSMOS/M, ce rulează pe un calculator PC, de tipul Pentium 4
- prezentarea generală a metodei elementului finit precum și aplicațiile acesteia în diferite domenii de activitate
- analiza tipurilor de elemente finite utilizate și alegerea pentru discretizare a elementului finit ideal, respectiv elemente finite tridimensionale tetraedrice TETRA 4 (element tip solid tetraedral cu patru noduri)

În cadrul acestui capitol, **contribuțiile personale** constau în:

- obținerea datelor necesare modelării prin analiza fenomenului laminării și a legăturilor dintre cilindrii și produsul laminat
- stabilirea caracteristicilor dimensionale necesare estimării geometriei cilindrilor de laminare, precum și a profilului ce urmează a se obține în urma laminării, respectiv profilul I 100
- specificarea încărcărilor și a combinațiilor acestora provenite din exploatare, respectiv temperaturile laminatului și ale apei de răcire, forțele de laminare aplicate pe calibrul activ la laminarea profilului I 100
- modelarea numerică cu elemente finite tridimensionale tetraedrice cu patru noduri
- determinarea distribuției de temperatură în cilindrii de laminare și în produsul laminat, pentru diferite temperaturi și anume pentru 800 și 850°C, ținându-se cont de faptul că cilindrii, în timpul laminării, sunt răciți cu apă
- determinarea stării de tensiune datorită diferențelor de temperatură înregistrate între materialul cilindrului, care se încălzește datorită temperaturii ridicate a laminatului, respectiv se răcește datorită temperaturii apei de răcire aplicată pe suprafața cilindrilor
- determinarea stării de tensiune datorită forțelor de laminare aplicate pe calibrul activ al cilindrului
- specificarea cantitativă și calitativă a rezultatelor simulării, cu ajutorul graficelor, hărților de culori și a tabelelor.

CAPITOLUL V

CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII PERSONALE, PERSPECTIVE

V.1. CONCLUZII FINALE

Scopul tezei de doctorat "Studii și cercetări privind creșterea durabilității cilindrilor de laminare" a fost și este acela de a răspunde la cât mai multe întrebări legate de problematica durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare, datorită faptului că durabilitatea în exploatare reprezintă una din cele mai actuale probleme întâlnite în secțiile de laminare ale întreprinderilor metalurgice, eficiența economică a producției de laminate depinzând, în mare măsură, de caracteristicile materialului ce se laminează și condițiile de exploatare. Cu alte cuvinte, nu se poate vorbi de o singură cauză pentru care durabilitatea înregistrată în exploatare este foarte variată (în condiții similare de exploatare) și scăzută, ci de un ansamblu de cauze care duc la aceste neajunsuri.

Direcția de cercetare a tezei de doctorat o reprezintă analiza cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, deoarece utilizarea acestora pentru laminarea la cald a luat o tot mai mare amploare, aceștia putând înlocui, cu succes, cilindrii din oțel forjat sau pe cei turnați din fonte cu grafit nodular. Durabilitatea în exploatare este mai mare de 4-5 ori față de oțelul forjat și de 3-4 ori față de fonta nodulară.

Din cercetarea efectuată atât pe baza studiului din literatura de specialitate cât și pe baza experimentărilor la scară de laborator și industrială, rezultă următoarele concluzii:

a). Un rol determinant în comportarea în exploatare a cilindrilor de laminare îl are materialul din care aceștia sunt confecționați. Astfel, alegerea materialului și a tehnologiei de fabricație a cilindrilor turnați depinde de mai mulți factori, și anume: materialul și starea materialului ce urmează a se lamina, tipul laminorului unde se utilizează, dimensiunile cilindrului (în special, diametrul), vitezele de laminare, respectiv cajele din trenul de laminare pentru care sunt destinați, temperatura de lucru a tăbliei și modul de răcire în timpul procesului de laminare.

b). Oțelurile hipereutectoide, tip Adamit, ca urmare a rezistențelor ridicate la uzare, sunt folosite la laminoarele finisoare, pregătitoare și, în special, la laminarea profilelor fasonate U și I, înregistrându-se, în urma laminării, o finisare bună a suprafeței laminatului.

c). Cele mai importante particularități ale oțelului hipereutectoid, tip Adamit, care determină utilizarea acestuia pe scară tot mai largă la turnarea cilindrilor de laminare, sunt: rezistență mare la uzare, permit obținerea unei structuri omogene în toată masa cilindrului și corelarea adecvată a caracteristicilor fizico-mecanice, în vederea asigurării unei bune comportări în exploatare, duritatea ridicată se realizează pe seama unor constituenți stabili obținuți din turnare, stabilitate structurală la temperatură ridicată, stabilitate față de decarburare și față de oxidarea superficială.

d). Durabilitatea în exploatare a cilindrilor de laminare este determinată de rezistența lor la uzare. Uzura se socotește, de regulă, în funcție de grosimea minimă a crustei ce se îndepărtează prin restrunșire pentru restabilirea profilului inițial al cilindrului.

e). În urma analizei influenței tehnologiei de fabricație asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminare se pot trage mai multe concluzii:

- încărcătura metalică a agregatului de elaborare, în vederea elaborării oțelului tip Adamit, constă din 91...95 % deșeuri de cilindri Adamit și deșeuri rezultate de la prelucrarea acestora, în loc de 60% cât se recomandă în literatura de specialitate;
- nu se stăpânește variația conținuturilor de carbon în toate fazele procesului de elaborare (topire, afinare);
- pentru încadrarea în compoziția chimică se practică corecții la elementele de aliere (Cr, Ni, Mo) în oala de turnare sau pe jgheab;
- ținându-se cont de prescripțiile privitoare la conținutul de gaze și incluziuni nemetalice se evită adăugarea materialelor reci și necalcinate;
- după evacuare, oțelul este tratat în oală, prin barbotare cu argon;
- turnarea aliajului în formă se execută direct, prin intermediul unei pâlnii de centrare, din material refractar, fixată rigid, deasupra maselei;
- datorită durității mari obținută la turnare și structurii necorespunzătoare este obligatorie aplicarea tratamentelor termice. În general, acestor cilindri se aplică, un tratament termic primar, cu scopul eliminării tensiunilor termice, scăderii durității foarte mari obținută la turnare, în vederea creșterii prelucrabilității prin așchiere, omogenizării compoziției chimice, distrugerea rețelei de carburi și globulizarea lor și un tratament termic secundar, pentru asigurarea, pe tăblia cilindrului, a proprietăților fizico-mecanice cerute de procesul de laminare, în special, creșterea durității acesteia.
- în procesul de fabricație a cilindrilor de laminare, datorită nerespectării tehnologiei de elaborare-formare-turnare-tratament termic, apar o serie de defecte și anume: pori, fisuri, aderențe, retasuri, defecte de structură, care duc la obținerea unei procente mari de rebut, cu influențe negative asupra cheltuielilor întreprinderii.

f). Legat de analiza comportării în exploatare a cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, literatura de specialitate indică faptul că există o strânsă legătură între duritatea crustei de lucru și valoarea înregistrată a durabilității, în sensul că durabilitatea în exploatare este determinată de rezistența la uzare, în sensul că la o duritate mare a crustei de lucru, uzura este redusă, însă nu există o dependență directă între aceste două caracteristici. Consumul de cilindri de laminare are o mare influență asupra costului laminatelor și, deci, micșorarea acestuia duce la creșterea eficienței economice a secțiilor de laminare;

g). Valorile înregistrate în practica industrială pentru durabilitate sunt destul de scăzute, principalele cauze cu efect direct asupra durabilității în exploatare fiind:

- distribuția neuniformă a apei de răcire pulverizată pe suprafața cilindrilor în timpul laminării sau chiar întreruperile accidentale a pulverizării acesteia cu efect asupra ruperii cilindrilor înainte să-și îndeplinească capmaniile de laminare;

- prinderea între cilindri a laminatului cu o temperatură necorespunzătoare duce, de asemenea, la ruperea cilindrilor;
- depășirea cantității de material laminat (chiar cu 5...10 bare) determină scăderea bruscă a rezistenței la uzare, ceea ce duce la necesitatea îndepărtării la restrunjire a unui strat mult mai mare decât valoarea admisă.

h). În urma analizei fenomenelor complexe care apar în cilindrii în timpul procesului de laminare la cald se poate face precizarea că cilindrii de laminare suportă solicitări variabile complexe ca urmare a suprapunerii tensiunilor termice (cu valori preponderente) peste cele mecanice (de încovoiere, răsucire, presiune de contact). Legat de aceste aspecte rezultă următoarele concluzii:

- tensiunile termice constituie cauza fundamentală de producere pe suprafața cilindrilor de laminare a fisurilor de oboseală termică;
- tensiunile termice au valori mult mai mari, comparativ cu cele mecanice, și acționează la intervale de timp relativ scurte (de ordinul fracțiunilor de secundă);
- cunoașterea cât mai precisă a caracterului tensiunilor generate de solicitările complexe ce apar în cilindrii de laminare la cald permite determinarea duratei de exploatare a acestora în condiții de siguranță prin compararea acestor valori cu anumite valori limită dinainte impuse;
- cilindrii de laminare se rup în procesul de exploatare datorită oboselii termice;
- solicitările din cilindrii de laminare la cald au un caracter ciclic, iar starea de tensiune este, în principal, rezultatul acțiunii câmpurilor de temperaturi simetrice și asimetrice care produc oboseala termică pe suprafața și în stratul superficial al acestora.

j). Analiza distribuției câmpurilor termice, a tensiunilor termice și a tensiunilor mecanice în cilindrii în timpul procesului de laminare la cald, precum și studiile privitoare la optimizarea acestora se pot efectua cu ajutorul metodei elementului finit.

V.2. CONTRIBUȚII PERSONALE

Din punct de vedere al contribuțiilor personale pot fi evidențiate următoarele:

1). Prezentarea și analiza critică a tehnologiei actuale de fabricație a cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid precum și expunerea clară a fundamentelor teoretice privitoare la fenomenele complexe ce apar în cilindrii de laminare în timpul procesului de laminare la cald

2). Prelevarea probelor turnate din mai multe șarje din care s-au turnat cilindrii la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, în vederea determinării caracteristicilor de material pentru oțelul hipereutectoid, tip Adamit, precum și determinarea durităților probelor și trasarea, cu ajutorul programului de calcul EXCEL, a histogramelor durităților înregistrate

3). Stabilirea diagramelor de tratament termic primar și secundar pentru probele turnate, prin recalcularea parametrilor din diagramele de tratament termic ale cilindrilor

4). Confectionarea epruvetelor în vederea determinării rezistențelor mecanice de rupere la tracțiune, cu prezentarea aspectului curbei tensiune-deformație pentru oțelul hipereutectoid, tip Adamit

5). Prelevarea inelelor-probă de pe cilindrii turnați din oțel hipereutectoid tip Adamit, ce urmează a intra în exploatare, în vederea determinării caracteristicilor mecanice a oțelului

6). Determinarea variației de duritate pe secțiunea inelului, până la o adâncime de 90 mm spre axa acestuia, precum și pe înălțimea tăbliei, în vederea cunoașterii poziției optime de amplasare a calibrelor cele mai solicitate în timpul laminării, efectuarea analizelor microstructurale și prezentarea calitativă și cantitativă a rezultatelor cu ajutorul programelor de calcul

7). Crearea unei baze de date, cu ajutorul SGBD al Microsoft Access, în scopul stocării și accesării cu ușurință a datelor înregistrate pe întregul flux de fabricație al cilindrilor de laminare, pornind de la elaborarea aliajului lichid și turnarea cilindrului, până la scoaterea din uz a acestuia. Baza de date a fost concepută și realizată astfel încât aceasta să poată fi folosită, cu succes, în practica industrială, ținându-se cont de tendința de informatizare a fiecărui sector al oricărei întreprinderi.

8). Prelucrarea datelor înregistrate la elaborare-turnare, folosind analiza statistico-matematică, în vederea punerii în evidență a influenței proceselor de elaborare-turnare, a compoziției chimice și temperaturii de turnare asupra durității cilindrilor de laminare și verificarea repartiției datelor înregistrate în practica industrială

9). Prelucrarea statistică, cu ajutorul programelor de calcul MATLAB și EXCEL, a datelor privitoare la influența compoziției chimice asupra durității și durabilității cilindrilor de laminare. În urma prelucrării datelor se propune restrângerea domeniului de compoziție chimică pentru elementele de aliere, în special, reflectată de costul tonei de oțel Adamit turnat.

Ținând cont că una din condițiile impuse cilindrilor de laminare turnați din oțel hipereutectoid, în vederea obținerii unor durabilități ridicate în exploatare, este obținerea unor durități corespunzătoare atât la suprafață cât și pe secțiune, un rol deosebit de important îl are conducerea corectă a procesului de elaborare și obținerea compoziției chimice prevăzute de normele și standardele în vigoare. Astfel, în urma studiului efectuat se recomandă următoarea compoziție chimică pentru oțelul hipereutectoid tip Adamit, destinat turnării cilindrilor de laminare:

- C = 1,9...1,95%
- Si = 0,62...0,67%
- Mn = 0,842...0,864%
- Ni = 1,55...1,70%
- Cr = 1,0...1,2%
- Mo = 0,375...0,405%
- P = max.0,04%; S = max.0,02%.

O altă recomandare rezultată din analiza critică efectuată, în vederea reducerii defectelor de structură înregistrate la turnare este ca temperatura de turnare a aliajului în formă să fie de 1430...1440°C, deoarece procentul de rebut datorită temperaturii de turnare prea mică (1420...1430°C) este destul de mare, iar temperatura de barbotare să nu fie mai mică de 1450°C.

10). Studiul și prelucrarea datelor obținute în urma experimentării aplicării operației de precalibrare a cilindrilor de laminare, înainte de tratamentul secundar, în vederea eficientizării tratamentul termic secundar și a creșterii durabilității în exploatare a cilindrilor.

În cazul utilizării a 12 perechi de cilindri la care a fost aplicată, înainte de tratamentul termic secundar, operația de precalibrare, s-au înregistrat următoarele creșteri ale durabilității (durabilitatea celor 12 perechi de cilindri experimentali a fost comparată cu durabilitatea a 12 perechi de cilindri clasici, care au lucrat în aceleași condiții):

- pentru laminarea profilului I 80 creșterea de durabilitate a fost de aprox. 19%;
- pentru laminarea profilului I 100 creșterea de durabilitate a fost de aprox. 18%;
- pentru laminarea profilului I 120 creșterea de durabilitate a fost de aprox. 49%.

În urma obținerii acestor rezultate precalibrarea poate fi introdusă ca etapă în fluxul de fabricație al cilindrilor.

11). Extragerea din literatura de specialitate a problemelor teoretice esențiale legate de metoda elementului finit și obținerea, din practica industrială, a datelor necesare modelării prin analiza fenomenului laminării și a legăturilor dintre cilindri și produsul laminat, precum și stabilirea caracteristicilor dimensionale necesare estimării geometriei cilindrilor de laminare în vederea efectuării simulării procesului de laminare.

12). Ținându-se cont de faptul că în timpul exploatarei se întâlnesc o serie de situații legate de distribuția câmpului termic, a tensiunilor termice și mecanice în cilindri de laminare care duc la scăderea durabilității în exploatare a cilindrilor, consider că simularea procesului de laminare, folosind metoda elementului finit, duce la rezultate, legate direct de procesul de laminare, imposibil de aflat prin alte metode.

Luarea în considerare a tensiunilor termice permite efectuarea unui studiu complet și foarte apropiat de condițiile reale din exploatare a cilindrilor de laminare, deoarece influențele termice constituie una din cauzele fundamentale care produc, pe suprafața cilindrilor, chiar și în condiții favorabile de exploatare, fisuri de oboseală termică care limitează utilizarea cilindrilor în perioada unei campanii de laminare.

Pentru aceasta a fost efectuată simularea procesului de laminare, în vederea determinării distribuției de temperatură, a tensiunilor termice și mecanice în cilindri, în timpul procesului de laminare la cald.

Având în vedere faptul că, în practica industrială, temperatura laminatului la caja 14 (finisoare) este cuprinsă în intervalul 830...845°C, iar răcirea cu apă a cilindrilor se face pe două suprafețe, simularea fenomenului de laminare la cald a luat în considerație două variante:

- aplicarea apei de răcire, în timpul laminării, pe două suprafețe, $T_{\text{laminat}} = 800^{\circ}\text{C}$, respectiv $T_{\text{laminat}} = 850^{\circ}\text{C}$, iar $T_{\text{apă de răcire}} = 20^{\circ}\text{C}$;
- aplicarea apei de răcire, în timpul laminării, pe patru suprafețe, $T_{\text{laminat}} = 850^{\circ}\text{C}$, iar $T_{\text{apă de răcire}} = 20^{\circ}\text{C}$.

În urma prezentării cantitative și calitative a rezultatelor simulării, se poate observa faptul că influență deosebită în procesul de laminare la cald au tensiunile termice, cu valori mult mai mari față de tensiunile mecanice (care au valori nesemnificative). Dacă, în plus, este analizat cazul optimizării procesului de răcire a cilindrilor, respectiv aplicarea apei de răcire pe patru suprafețe, față de aplicarea pe două suprafețe, se observă că, la temperaturi ale laminatului de 850°C, valorile temperaturilor din cilindrii, precum și valorile tensiunilor termice scad simțitor. Așadar, răcirea prin

pulverizarea apei de răcire pe patru suprafețe are efect direct și benefic asupra comportării în exploatare a cilindrilor.

V.3. PERSPECTIVE

Lucrarea de față deschide un drum nou în studiul analizei factorilor care influențează durabilitatea în exploatare a cilindrilor de laminare.

Studiile efectuate de-a lungul elaborării tezei pot fi extinse și asupra altor cilindri turnați din alte materiale. Realizarea unui model de simulare numerică, reprezintă punctul de plecare în procesul de optimizare a procesului considerat. În cazul de față, modelul numeric corespunzător fenomenului de laminare la cald poate fi extrapolat și adaptat și altor laminoare din cadrul întreprinderilor metalurgice.

Modelul implementat cu ajutorul calculatorului oferă posibilitatea cercetătorului să experimenteze, virtual, diferite situații care, în condiții reale de exploatare, ar fi imposibil de realizat. Astfel, realizată într-un timp foarte scurt și implicând costuri minime, simularea fenomenului duce la obținerea unor date care pot fi folosite în diverse scopuri.

În cazul cilindrilor de laminare acest fenomen conduce la cunoașterea distribuțiilor de temperaturi în interiorul acestora, în scopul optimizării proceselor de laminare, cu efect asupra durabilității cilindrilor.

BIBLIOGRAFIE

1. Alecu, Ghe., Vasilescu, S. - *Siderurgia românească - prezent și viitor* - Revista Metalurgia, număr special, 1998
2. Alic, C. - *Contribuții la evaluarea gradului de siguranță al halelor metalice din siderurgie, ținând seama de condițiile reale de exploatare* - Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, Facultatea de Construcții și Arhitectură, Timișoara, 1998
3. Alic, C. - *Bazele cercetării experimentale - Elemente de teorie și aplicații* - Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2001
4. Balazsi, Șt.- *Cercetări privind îmbunătățirea tehnologiei de execuție și tratament termic a cilindrilor de laminare* - Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, Facultatea de Inginerie Hunedoara, 2004
5. Bejan, M. - *În lumea unităților de măsură* - Editura AGIR, București, 2000
6. Budaghianț, N. A., Karsski, V.E. - *Cilindri de laminor turnați*, E.T., București 1986
7. Bunin K.P. - *Osnovă metalografi ciuguna* - Izd."Metalurghia", Moskva, 1969
8. Bratu, C., ș.a - *Modelarea fizică a proceselor de turnare*- Litografia IPB, București, 1987
9. Cazimirovici, E. - *Bazele teoretice ale deformării plastice* - Ed. BREN, București, 1999
10. Cazimirovici, E. ș.a. - *Utilaje și procese tehnologice* - E.D.P., București, 1974
11. Cheșa, I. ș.a. - *Alegerea și utilizarea oțelurilor* - E.T., București, 1984
12. Chira, I. - *Aliaje tip Adamit-o grupă nouă de materiale metalice turnate rezistente la uzare mecanică și abrazivă*, - Simpozionul internațional "Tradiții și perspective în școala românească de metalurgie 30-31 octombrie 1998", Ediția a II-a, București, pg. 161-166.
13. Chira, I., Sofroni, L., Brabie, V. - *Procedee speciale de turnare*, E.D.P., București, 1980
14. Chițu, Ghe. - *Cercetări privind îmbunătățirea structurii producției de oțel în România și la nivel mondial* - Revista Metalurgia, Nr.5/2003, pg. 9-14.
15. Cicală, E. - *Metode de prelucrare statistică a datelor experimentale* - Ed.Politehnica, Timișoara, 1999
16. Constantinescu, A., Cosneanu, C. ș.a.- *Îndreptar de fonte și oțeluri* - Ed.Tehnică, București, 1969
17. Constantinescu, I., ș.a. - *Prelucrarea datelor experimentale cu calculatoare numerice* - Ed. Tehnică, București, 1980
18. Colan, H. - *Studiul metalelor* - Cluj-Napoca, Litografia IPCN, 1977
19. Deutsch, I. - *Rezistența materialelor* - E.D.P., București, 1979
20. Drăgan, I., Ilca, I. ș.a. - *Tehnologia deformărilor plastice* - E.D.P., București, 1979
21. Faur, N. - *Elemente finite - Fundamente* - Ed. Politehnica, Timișoara, 2002
22. Faur, N., Dumitru, I. - *Diferențe finite și elemente finite* - Ed. Mirton, Timișoara, 1997
23. Gârbea, D. - *Analiză cu elemente finite* - Ed. Tehnică, București, 1990
24. Ghinea, M., Firețeanu, V. - *Matlab.Calcul numeric-Grafică-Aplicații* - Editura Teora, 1999
25. Habraken, J. - *Microsoft Office 2000. 8 în 1* - Editura Teora, București, 2000
26. Heubner, K.H. - *The Finite Element Method for Engineers* - John Wiley and Sons, N.Y. - Toronto, 1975
27. Hughes, T.J.R. - *The Finite Element Method* - Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987

28. Ianc, P. - *The international conjuncture and the results on steel products internal market* - Brașov, April, 2002
29. Ionesc, B.ș.a. - *Instrumente informatice pentru birotică - Word, Power Point, Outlook, Front Page* - Editura DualTech, 2000
30. Josan, A. - *The influence of casting parameters on the quality of the ϕ 750x1740mm mill rolls obtained by a duplex procedure*, Buletinul științific a Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 42 (56), Timișoara, 1997
31. Josan, A. - *The influence of the thermal and physical properties of the moulding sands and refractory paints upon the rolls*, Buletinul științific a Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 43 (57), Timișoara, 1998
32. Josan, A., Rațiu, S. - *Influența amestecurilor de formare și vopselelor refractare asupra calității cilindrilor de laminor*, Buletinul Sesiunii de comunicări Științifice, Vol. I, p. 147-154, Hunedoara, 31 oct. - 01.nov. 1997
33. Josan, A., Rațiu, S., Găvănescu, A. - *Procedee moderne de turnare a cilindrilor de laminor*, Buletinul Sesiunii de comunicări Științifice, Vol. I, p. 159-171, Hunedoara, 31 oct. - 01.nov. 1997
34. Josan, A. - *Considerații generale privind studiul comparativ al metodelor de turnare directă și indirectă a cilindrilor de laminor* - Simpozion Științific Internațional "UNIVERSITARIA ROPET 2001", p.123-126, Petroșani, 2001;
35. Josan, A. - *Experimental technology of elaborating hypereutectoid steel to be used in roll casting* - REVISTA DE TURNĂTORIE, nr. 4/2001;
36. Josan, A. - *Studies and researches on the influence of chemical composition of cast rolls made of hypereutectic steel. on their hardness in exploitation* - ZBORNIK RADOVA ½ JAHORINA – IRMES 2002, Srpsko Sarajevo – Jahorina, p.403-408, 2002;
37. Josan, A., Sporea, I., Maksay, Șt. - *Influența compoziției chimice asupra durității cilindrilor de laminor turnați din oțel hipereutectoid* - Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul IV, Fascicola 1, p.111-114, 2002
38. Josan, A., ș.a. - *Cercetări privind creșterea durabilității în exploatare a cilindrilor turnați din oțel hipereutectoid, tip Adamit, la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara* – Contract de cercetare nr. 672/15.05.2002
39. Josan, A. - *Cercetări privind influența elementelor de aliere asupra durabilității în exploatare a cilindrilor de laminor* - Lucrările celei de A Doua Conferințe Naționale "Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești", Vol X, p. 549-554, Sebeș, 2003
40. Kelly J. - *Utilizare Microsoft Excel 2000* - Ed. Teora, 2000
41. Koller, E., Roșculeț, M. - *Programare în ACCESS 97* - Ed. Teora, 2002
42. Kudrna, R. - *Evoluția oțelurilor hipereutectoide pentru dezvoltarea cilindrilor metalurgiei de profil, din Hutnicke listy, R.S.C., nr.10,1966, p.712-720* - traducere efectuată la INID, 22.06.1989
43. Lenhard J. Holschuth - *Informații din metalurgia mondială* - Cea de a 31-a conferință anuală a IISI, Revista Metalurgia nr. 8/1998, pg. XI.
44. Maksay, Șt. - *Calcul numeric* - Ed. Politehnica, Timișoara, 2002
45. Manolea, D. - *Practica în AutoCAD 2D* - Editura Microinformatica, Cluj-Napoca, 1994
46. Miklós I.Z., Cioată V.G. - *Desenare 2D cu AutoCAD 2002* - Ed. Mirton, Timișoara, 2003
47. Mitroi, C., ș.a. - *Aspecte privitoare la particularitățile de turnare a cilindrilor din oțel hipereutectoid de tip Adamit* - Revista Metalurgia, nr.3/1976, p. 141
48. Mogan, Ghe. L. - *Metoda elementelor finite în inginerie* - Universitatea Transilvania Brașov, 1996

49. Nădășan, Șt., ș.a. – *Oboseala metalelor* – Editura Tehnică, București, 1962;
50. Nichici, A., Cicală, E. - *Prelucrarea datelor experimentale - curs și aplicații* - U.P.Timișoara, 1996
51. Oden, I.T., Reddy, N.I. - *An Introduction to the Mathematical Theory of Finite Elements* - Wiley-Interscience, N.Y., 1982
52. Olariu, V., Brătianu, C. - *Modelarea numerică cu elemente finite* - Ed. Tehnică, București, 1986
53. Pănoiu, C.ș.a. - *Utilizarea și programarea calculatoarelor* - Editura Mirton, Timișoara, 2002
54. Peter Greis - *Siderurgia europeană se va transforma în continuare - Informații din metalurgia mondială* - Revista Metalurgia, nr.8/1998
55. Petrică Alexandru - *Modelarea numerică a răcirii pieselor cilindrice din oțel* - Revista Metalurgia, Nr.5/2003, pg. 20-24.
56. Popescu, A. ș.a. - *AutoCAD* - Editura Teora, București, 1994
57. Pozdârcă, A., ș.a. - *AutoCAD - Modelare spațială* - Ed. Universității "Petru Maior", Tg.Mureș, 2001
58. Prejban, I. - *Tratamente termice-îndrumător pentru lucrări de laborator și proiect* - Institutul Politehnic "Traian Vuia", Timișoara, 1990
59. Rao, S.S. - *The Finite Element Method in Engineering* - Oxford, Ed. Pergamon Press, 1982
60. Rău, A., Tripșa, I. - *Metalurgia oțelului* - E.D.P., București, 1973
61. Rădulescu, C. ș.a. - *Utilaje de laminoare* - Editura tehnică, București, 1979
62. Reddy, I.N. - *An introduction to the finite element method* - Mc.Grow-Hill, 1993
63. Ripoșan I., Bălescu, C. - *Unele aspecte privind turnarea cenrifugă a cilindrilor de laminor bimetalici (oțel-fontă)* - Lucrare de sinteză, Rev. Metalurgia, nr. 6 /1975, pg.335.
64. Scorțea, C, Lepădatu, V. Ghe. - *Unele aspecte de competitivitate cu care se confruntă întreprinderile siderurgice românești înainte de intrarea în Uniunea Europeană* - Revista Metalurgia, Nr.1/2003, pg. 5-10.
65. Siefert, W - *Considerații asupra turnării cilindrilor*, Giesserei, nr.22, 1967, p.588-595
66. Simion, I. - *AutoCAD - 2000 - Aplicații* - Editura Teora, București, 2000
67. Sofroni, L. ș.a - *Cercetări pentru stabilirea tehnologiei de fabricare a cilindrilor din oțel, cu conținut ridicat de carbon, cu grafit în structură, pentru liniile de profile și benzi de la Combinatul Siderurgic Hunedoara* -Centrul de cercetări pentru Metalurgie de pe lângă Facultatea de Metalurgie din Institutul Politehnic București, Contract cercetare, C.T.F./1970, I.P.B.-C.S.H.
68. Sofroni, L.ș.a. - *Contribuții la îmbunătățirea calității cilindrilor de laminor obținuți prin turnare*, Revista Metalurgia, nr.10/1983, p.473
69. Sofroni, L.ș.a. - *Stadiul actual al fabricării și utilizării cilindrilor de laminor din fontă-Studiu de sinteză* - Editat de Centrul de Documentare și Publicații tehnice al industriei metalurgice, 1968
70. Sofroni, L., Petrescu, D. - *Fabricarea și caracteristicile cilindrilor mari din oțel pentru laminoare - Sinteza documentară* - Editat de Centrul de Documentare și Publicații tehnice al industriei metalurgice, 1970
71. Soporan, V. ș.a. - *Solidificarea aliajelor - preliminarii teoretice* - Ed. Transilvania Press, Cluj-Napoca, 1995
72. Sporea, I. - *Tehnologia materialelor, partea a II-a - Prelucrarea materialelor*, Institutul Politehnic "Traian Vuia",Timișoara, 1975
73. Sporea I., Artemov I.I., Mihuț G., Josan A - *Considerentele folosirii cilindrilor de laminare din oțeluri turnate* - Sesiune de Comunicări Științifice Hunedoara, Analele Facultății de Inginerie Hunedoara, 2000;
74. Sporea I. ș.a. - *Variațiile compozițiilor chimice pe secțiunea cilindrilor de laminoare tip Adamit* -

- Lucrările științifice ale Simpozionului Internațional "UNIVERSITARIA ROPET 2000", p.361-362, Petroșani, 2000;
75. Sporea I. ș.a. - *Unele considerații privind influența structurii asupra durabilității cilindrilor de laminare de tip ADAMIT - Al IV^{ka}* Simpozion Internațional "Tinerii și cercetarea multidisciplinară", pg. 208-211, Ed. Sudura, Timișoara, 2002
 76. Sporea I. ș.a. - *Studii privind îmbunătățirea tehnologiilor de elaborare, turnare, tratament termic a utilajului de turnare pentru cilindri de laminor. tip ADAMIT - Analele Universității "Constantin Brâncuși", Tg. Jiu, pg.303-306*
 77. Sporea I., Josan A, Mihuț G. - *Studii și încercări asupra cilindrilor de laminare tip Adamit calitatea R-A2- Analele Universității "Valahia", Târgoviște, 2003, pg.41-44*
 78. Sturza, S., Bozga, L. - *Culegere de STAS-uri (uz intern) - S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, 1992*
 79. Takigawa, Hiroshi ș.a. - *Development of High-Speed Tool Steel Rolls and Their Application to Rolling Mills - Nippon steel technical report no. 74 juli.1997*
 80. Taloi, D. ș.a - *Optimizarea proceselor metalurgice - E.D.P., București, 1983*
 81. Toader, Șt., Pinca, C. - *Cercetări asupra rezistenței la oboseală termică a cilindrilor de laminare la cald - Contract 70004/1996, Tema 43 - Consiliul Național al Cercetării Științifice Universitare*
 82. Tripșa, I., ș.a. - *Optimizarea proceselor de turnare. solidificare și încălzire a lingourilor de oțel - Ed. Tehnică, București, 1975*
 83. Trușculescu, M. - *Studiul metalelor - E.D.P., București, 1977*
 84. Țelikov, A.I., Smirnov, V.V. - *Laminoare - Ed. Tehnică, București, 1961;*
 85. Ursache, M., hircă, D. - *Proprietățile metalelor - E.D.P., București, 1982*
 86. Vacu, S. ș.a. - *Metalurgie generală - E.D.P., București, 1975*
 87. Vacu, S. ș.a. - *Elaborarea oțelurilor aliate-Vol.I - Ed. Tehnică, București*
 88. Vasiu T. ș.a. - *Tribologie - curs - Centrul de Multiplicare, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1997*
 89. Vermeșan, H. ș.a. - *Bazele teoretice ale tratamentelor termice - Ed. Roprint, Cluj-Napoca, 2002*
 90. Vida, M. - *Tehnologia formării - Curs. Vol.I - Institutul de Subingineri Reșița, 1980*
 91. Voronina, V.A. ș.a. - *Cilindri turnați din oțel aliat cu conținut ridicat de carbon - din Stal', 1968, nr. 8, p.719-720*
 92. Voronțov, N. ș.a. - *Direcțiile de perfecționare a producției și de folosire a cilindrilor pentru laminare la cald, din Stal', 1978, nr. 10, p.921-924, -trad. efectuată la INID, 09.11.1998*
 93. Wait, R. Mitchell, A.R. - *Finite Element Analysis and Applications - John Wiley, N.Y. 1985*
 94. Wusatowski, Z. - *Bazele laminării - Editura Tehnică, București, 1972*
 95. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. - *La méthode des éléments finis - AFNOR-Paris, 1991*
 96. * * * - *Urmărirea pe fluxul de fabricație a cilindrilor de laminor din Fgn și tip Adamit, S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara - Contract de cercetare, Centrul de cercetare-proiectare, secția Cercetare, Hunedoara, 1998*
 97. * * * - *Producția mondială de oțel brut - Revista Metalurgia, nr.3/1998, p.115*
 98. * * * - *Tehnologie experimentală pentru execuția cilindrilor din oțel hipereutectoid la S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, Caiet de sarcini, Hunedoara, iunie, 1995*
 99. * * * - *Fabricarea cilindrilor de laminare din oțel, turnați și forjați - Culegere de material documentar, Centrul de Documentare și Publicații Tehnice al Industriei Metalurgice, 1970;*
 100. * * * - *Noi oțeluri cu caracteristici superioare sau speciale - Culegere de material documentar, Centrul de Documentare și Publicații Tehnice al Industriei Metalurgice, 1970;*

101. * * * – *Stabilirea tehnologiei de fabricație a cilindrilor din oțel hipereutectoid-tip Adamit - ICEM, Contract de cercetare nr.1283/1973*
102. * * * - *Mică Enciclopedie de Metalurgie, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1980.*
103. * * * - *Analiza calității cilindrilor de laminor în vederea reducerii costurilor și influența asupra calității laminatelor - S.C. Siderurgica S.A. Hunedoara, Uzina Laminoare, Contr. nr. 2400/279/05.07.2002*
104. * * * - *Manual de utilizare COSMOS M2.5. - SRAC, Santa Monica, 1999*
105. * * * - *AutoCAD 2002 - User Guide*
106. * * * - *AutoCAD Mechanical 2002 - User Guide*
107. * * * - *Mechanical Desktop R6 - User Guide*
108. * * * - *AutoDESK Inventor 5 - User Guide*
109. **STAS R 4400/2-88** - *Oțeluri turnate - Corespomdența mărcilor*
110. **STAS 9644-87** - *Încercarea la tracțiune a fontelor cenușii*
111. **STAS 8585-70** - *Utilajele laminoarelor metalurgice - Terminologie*
112. **STAS 8315-81** - *Încercările metalelor - Încercarea de duritate SHORE*
113. **STAS R 883-82** - *Încercările metalelor - Tabele comparative ale durității*
114. **STAS 565-80** - *Oțel laminat la cald. Oțel I*
115. **STAS 1451/1-80** - *Oțeluri pentru rulmenți - Mărci și condiții tehnice de calitate*
116. **STAS E 11250-80** - *Oțeluri pentru rulmenți tratat în vid - Mărci și condiții tehnice de calitate*
117. **STAS 2631-87** - *Statistica matematică - terminologie și simboluri*
118. **STAS 7122-87** - *Statistica matematică - prezentarea și prelucrarea datelor experimentale și de observație*
119. **STAS 7122/6-87** - *Interpretarea statistică a datelor - Determinarea intervalelor de toleranțe naturale pentru repartiția normală*
120. **SR EN 10002-1** - *Materiale metalice. Încercarea la tracțiune. Partea 1: Metodă de încercare (la temperatura ambiantă)*
121. **I.T.E. 609 – 92** - *Intruțiuni tehnologice pentru elaborarea și turnarea oțelului hipereutectoid (tip Adamit).*
122. **I.T.E. 770 – 89** - *Intruțiuni tehnologice de fabricație a cilindrilor de laminor, tip Adamit, din oțel hipereutectoid, marca OTA 3*
123. **I.T.E. 771 –89** - *Intruțiuni de lucru și control privind eboșarea și finisarea cilindrilor de laminor din oțel hipereutectoid (tip Adamit), marca OTA 3 în secția Strungăria de Cilindri*
124. **I.T.E. 772 – 93** - *Intruțiuni tehnologice experimentale pentru tratamentul termic al cilindrilor de laminor tip Adamit*
125. **H - GS - 41; H - GS - 44; H - GS - 47** - *Cast steel rolls - AKERS GRADE Standard Alternative*

ANEXE

CODUL SURSĂ AL SGBD ACCESS

```
Option Compare Database
Option Explicit

Private Sub Command0_Click()
On Error GoTo Err_Command0_Click

    Dim stDocName As String
    Dim stLinkCriteria As String

    stDocName = "intr_cil"
    DoCmd.OpenForm stDocName, , stLinkCriteria

Exit_Command0_Click:
    Exit Sub

Err_Command0_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command0_Click

End Sub
Private Sub Command1_Click()
On Error GoTo Err_Command1_Click

    Dim stDocName As String
    Dim stLinkCriteria As String

    stDocName = "intr_cil"
    DoCmd.OpenForm stDocName, , stLinkCriteria

Exit_Command1_Click:
    Exit Sub

Err_Command1_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command1_Click

End Sub
Private Sub Command2_Click()
On Error GoTo Err_Command2_Click

    Dim stDocName As String
    Dim stLinkCriteria As String

    stDocName = "caut_cil"
    DoCmd.OpenForm stDocName, , stLinkCriteria

Exit_Command2_Click:
    Exit Sub

Err_Command2_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command2_Click

End Sub
Private Sub Command3_Click()
On Error GoTo Err_Command3_Click
```

```
Dim stDocName As String
Dim stLinkCriteria As String

stDocName = "Form2_test"
DoCmd.OpenForm stDocName, , stLinkCriteria

Exit_Command3_Click:
Exit Sub

Err_Command3_Click:
MsgBox Err.Description
Resume Exit_Command3_Click

End Sub
Private Sub Command4_Click()
On Error GoTo Err_Command4_Click

Quit

Exit_Command4_Click:
Exit Sub

Err_Command4_Click:
MsgBox Err.Description
Resume Exit_Command4_Click

End Sub
Private Sub Command6_Click()
On Error GoTo Err_Command6_Click

Dim stDocName As String
Dim stLinkCriteria As String

stDocName = "cautare_main"
DoCmd.OpenForm stDocName, , stLinkCriteria

Exit_Command6_Click:
Exit Sub

Err_Command6_Click:
MsgBox Err.Description
Resume Exit_Command6_Click

End Sub
Private Sub Command11_Click()
On Error GoTo Err_Command11_Click

Dim stDocName As String
Dim stLinkCriteria As String

stDocName = "beneficiar"
DoCmd.OpenForm stDocName, , stLinkCriteria

Exit_Command11_Click:
Exit Sub

Err_Command11_Click:
MsgBox Err.Description
Resume Exit_Command11_Click

End Sub
Private Sub Command12_Click()
```

```

On Error GoTo Err_Command12_Click

    Dim stDocName As String
    Dim stLinkCriteria As String

    stDocName = "Cauze"
    DoCmd.OpenForm stDocName, . . . stLinkCriteria

Exit_Command12_Click:
    Exit Sub

Err_Command12_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command12_Click

End Sub
Private Sub Command13_Click()
On Error GoTo Err_Command13_Click

    Dim stDocName As String
    Dim stLinkCriteria As String

    stDocName = "profil"
    DoCmd.OpenForm stDocName, . . . stLinkCriteria

Exit_Command13_Click:
    Exit Sub

Err_Command13_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command13_Click

End Sub
1
Option Compare Database
Option Explicit

Sub Combo62_AfterUpdate()
    ' Find the record that matches the control.
    Me.RecordsetClone.FindFirst "[id_cil] = " & Me![Combo62]
    Me.Bookmark = Me.RecordsetClone.Bookmark
End Sub

Private Sub Form_Open(Cancel As Integer)
End Sub
Private Sub Command76_Click()
On Error GoTo Err_Command76_Click

    DoCmd.Close

Exit_Command76_Click:
    Exit Sub

Err_Command76_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command76_Click

End Sub
2
Option Compare Database
Option Explicit

Private Sub Command10_Click()

```

```
On Error GoTo Err_Command10_Click

    Dim stDocName As String
    Dim stLinkCriteria As String

    stDocName = "caut_cil"
    DoCmd.OpenForm stDocName, , stLinkCriteria

Exit_Command10_Click:
    Exit Sub

Err_Command10_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command10_Click

End Sub

Private Sub Combo2_BeforeUpdate(Cancel As Integer)

End Sub

Private Sub Command11_Click()
On Error GoTo Err_Command11_Click

    DoCmd.Close

Exit_Command11_Click:
    Exit Sub

Err_Command11_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command11_Click

End Sub

Private Sub Form_Load()

End Sub
3
Option Compare Database
Option Explicit

Sub Combo62_AfterUpdate()
    ' Find the record that matches the control.
    Me.RecordsetClone.FindFirst "[id_cil] = " & Me![Combo62]
    Me.Bookmark = Me.RecordsetClone.Bookmark
End Sub

Private Sub Command76_Click()
On Error GoTo Err_Command76_Click

    DoCmd.Close

Exit_Command76_Click:
    Exit Sub

Err_Command76_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command76_Click

End Sub
Private Sub Command77_Click()
```

```
On Error GoTo Err_Command77_Click

    Dim stDocName As String

    stDocName = "cil_report_cautare"
    DoCmd.OpenReport stDocName, acPreview

Exit_Command77_Click:
    Exit Sub

Err_Command77_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command77_Click

End Sub
↓
Option Compare Database
Option Explicit

Private Sub Command10_Click()
On Error GoTo Err_Command10_Click

    Dim stDocName As String
    Dim stLinkCriteria As String

    stDocName = "caut_cil"
    DoCmd.OpenForm stDocName, , stLinkCriteria

Exit_Command10_Click:
    Exit Sub

Err_Command10_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command10_Click

End Sub
Private Sub Command11_Click()
On Error GoTo Err_Command11_Click

    DoCmd.Close

Exit_Command11_Click:
    Exit Sub

Err_Command11_Click:
    MsgBox Err.Description
    Resume Exit_Command11_Click

End Sub

Private Sub Form_Load()

End Sub
Private Sub Command12_Click()
On Error GoTo Err_Command12_Click

    Dim stDocName As String

    stDocName = "report_profil"
    DoCmd.OpenReport stDocName, acPreview

Exit_Command12_Click:
    Exit Sub
```

```
Err_Command12_Click:
  MsgBox Err.Description
  Resume Exit_Command12_Click

End Sub
5
Option Compare Database
Option Explicit

Private Sub Command10_Click()
On Error GoTo Err_Command10_Click

  Dim stDocName As String
  Dim stLinkCriteria As String

  stDocName = "caut_cil"
  DoCmd.OpenForm stDocName, . . . stLinkCriteria

Exit_Command10_Click:
  Exit Sub

Err_Command10_Click:
  MsgBox Err.Description
  Resume Exit_Command10_Click

End Sub
Private Sub Command11_Click()
On Error GoTo Err_Command11_Click

  DoCmd.Close

Exit_Command11_Click:
  Exit Sub

Err_Command11_Click:
  MsgBox Err.Description
  Resume Exit_Command11_Click

End Sub

Private Sub Form_Load()

End Sub
Private Sub Command12_Click()
On Error GoTo Err_Command12_Click

  Dim stDocName As String

  stDocName = "report_profil"
  DoCmd.OpenReport stDocName, acPreview

Exit_Command12_Click:
  Exit Sub

Err_Command12_Click:
  MsgBox Err.Description
  Resume Exit_Command12_Click

End Sub
6
Option Compare Database
Option Explicit
```

```
Private Sub Command10_Click()  
On Error GoTo Err_Command10_Click  
  
    Dim stDocName As String  
    Dim stLinkCriteria As String  
  
    stDocName = "caut_cil"  
    DoCmd.OpenForm stDocName, . . stLinkCriteria
```

```
Exit_Command10_Click:  
Exit Sub
```

```
Err_Command10_Click:  
    MsgBox Err.Description  
    Resume Exit_Command10_Click
```

```
End Sub  
Private Sub Command11_Click()  
On Error GoTo Err_Command11_Click
```

```
    DoCmd.Close
```

```
Exit_Command11_Click:  
Exit Sub
```

```
Err_Command11_Click:  
    MsgBox Err.Description  
    Resume Exit_Command11_Click
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Form_Load()
```

```
End Sub  
Private Sub Command12_Click()  
On Error GoTo Err_Command12_Click
```

```
    Dim stDocName As String  
  
    stDocName = "report_profil"  
    DoCmd.OpenReport stDocName, acPreview
```

```
Exit_Command12_Click:  
Exit Sub
```

```
Err_Command12_Click:  
    MsgBox Err.Description  
    Resume Exit_Command12_Click
```

```
End Sub
```

```
7
```

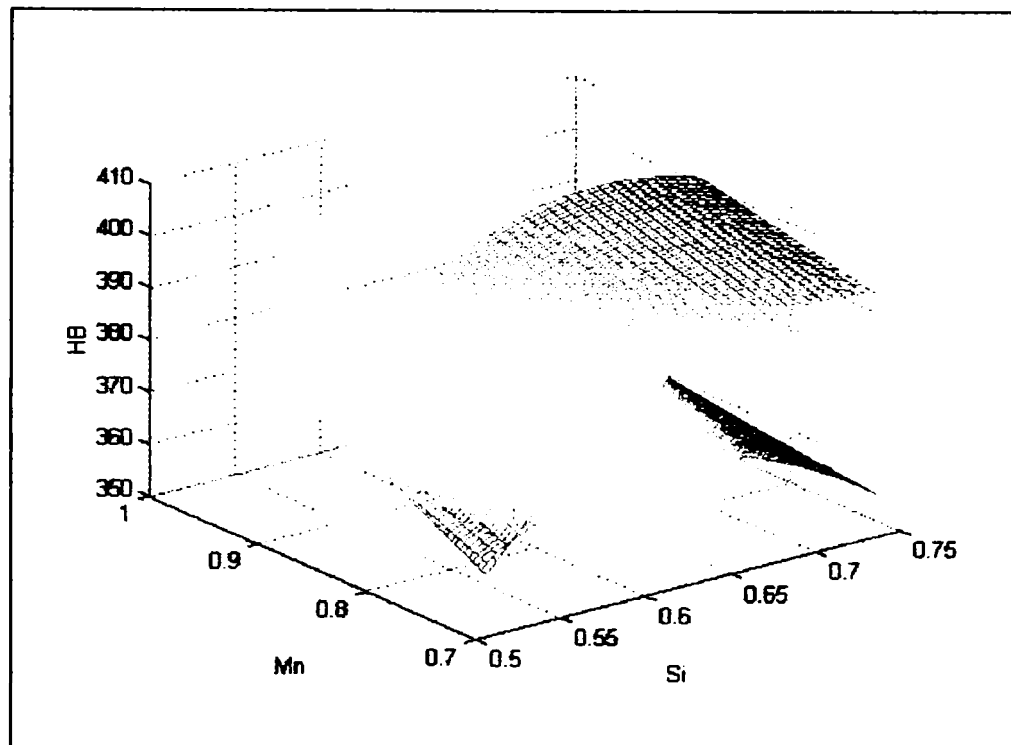


Figura A.III.2.2_1 Suprafața $HB = HB(C_{med}, Si, Mn)$.

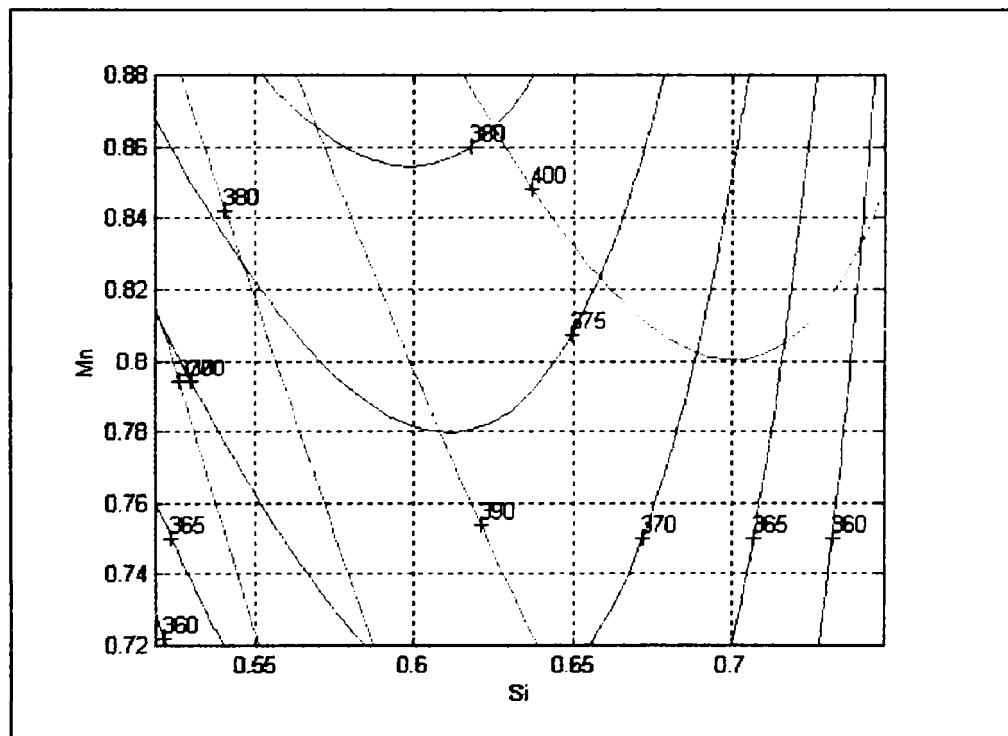


Figura A.III.2.2_2.Curbele de nivel ale variației $HB = HB(C_{med}, Si, Mn)$.

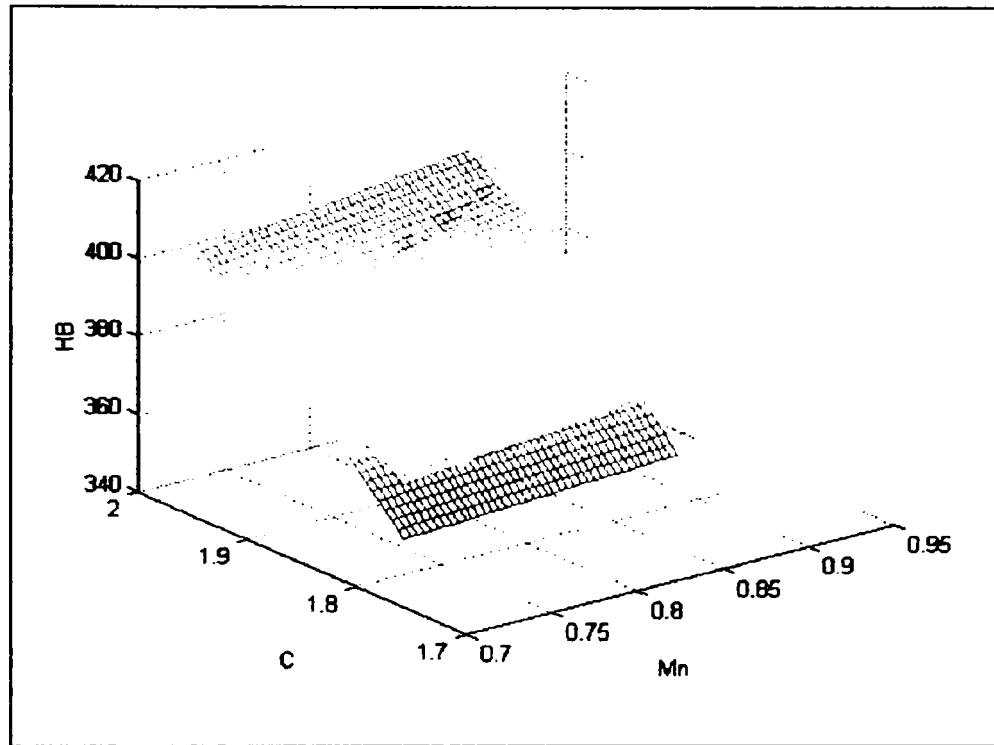


Figura A.III.2.2_3. Suprafața $HB = HB(C, Si_{med}, Mn)$.

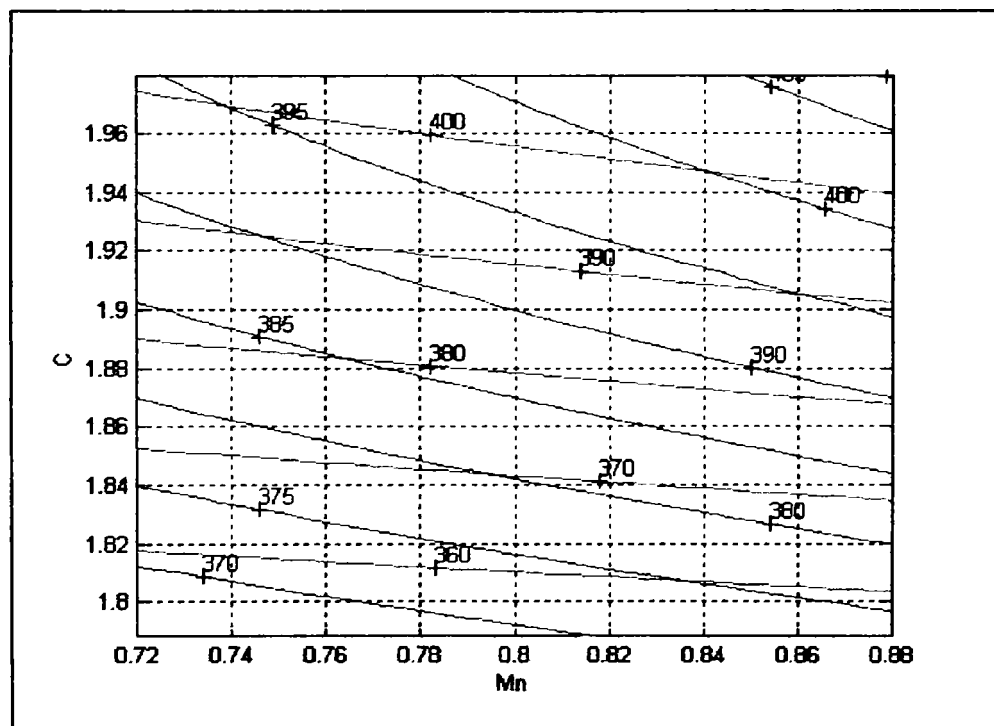


Figura A.III.2.2_4. Curbele de nivel ale variației $HB = HB(C, Si_{med}, Mn)$.

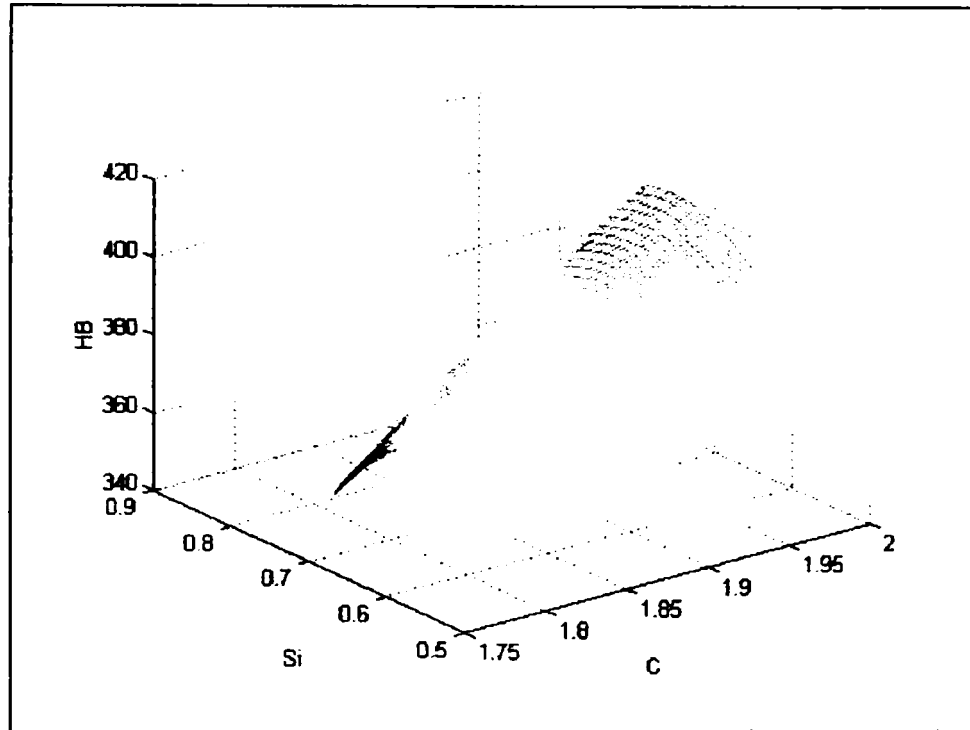


Figura A.III.2.2_5. Suprafața $HB = HB(C, Si, Mn_{med})$.

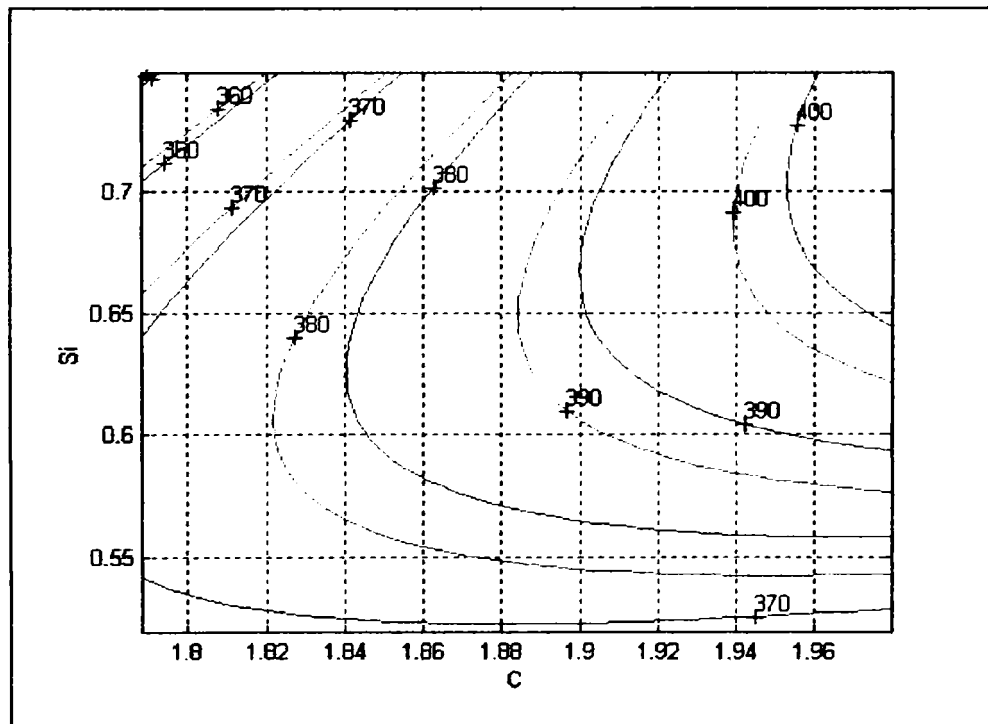


Figura A.III.2.2_6. Curbele de nivel ale variației $HB = HB(C, Si, Mn_{med})$.

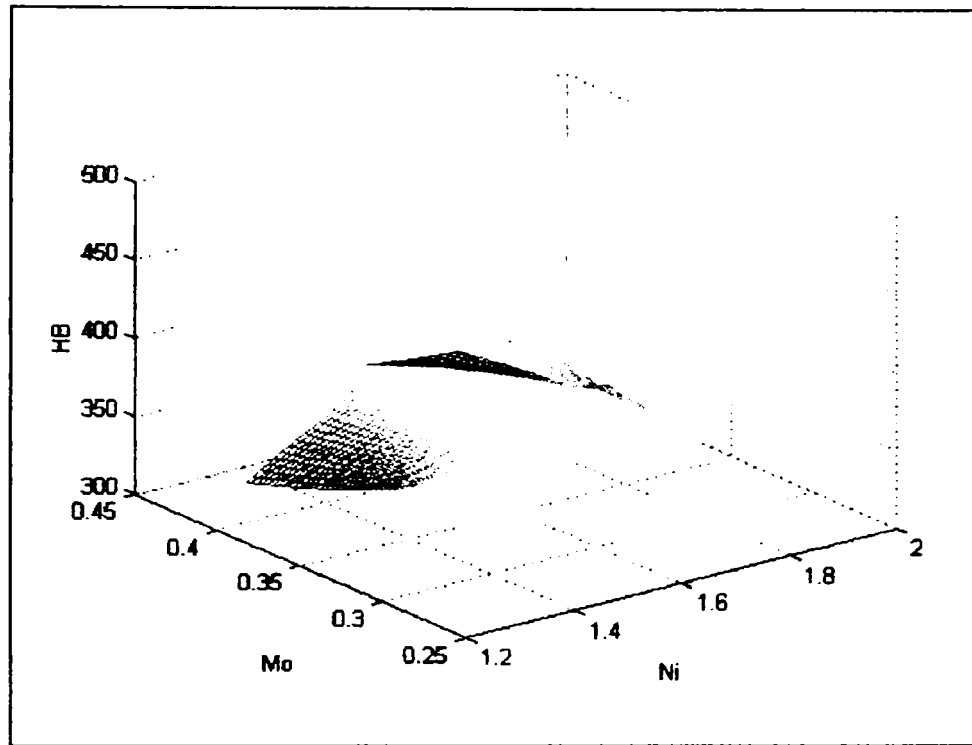


Figura A.III.2.2_7. Suprafața $HB = HB(Cr_{med}, Ni, Mo)$.

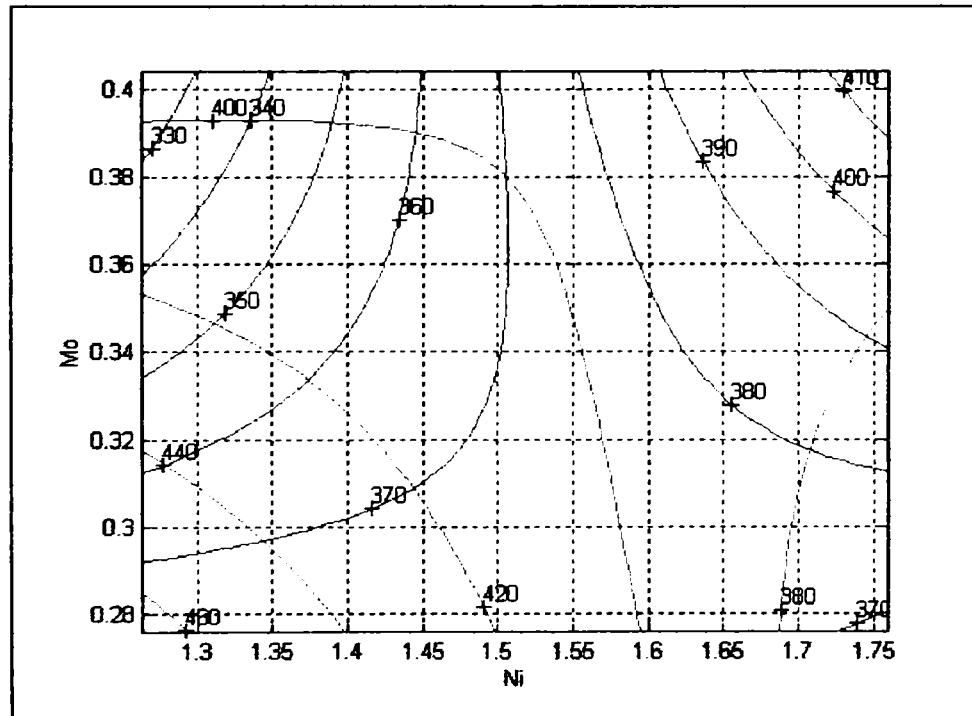


Figura A.III.2.2_8. Curbele de nivel ale variației $HB = HB(Cr_{med}, Ni, Mo)$.

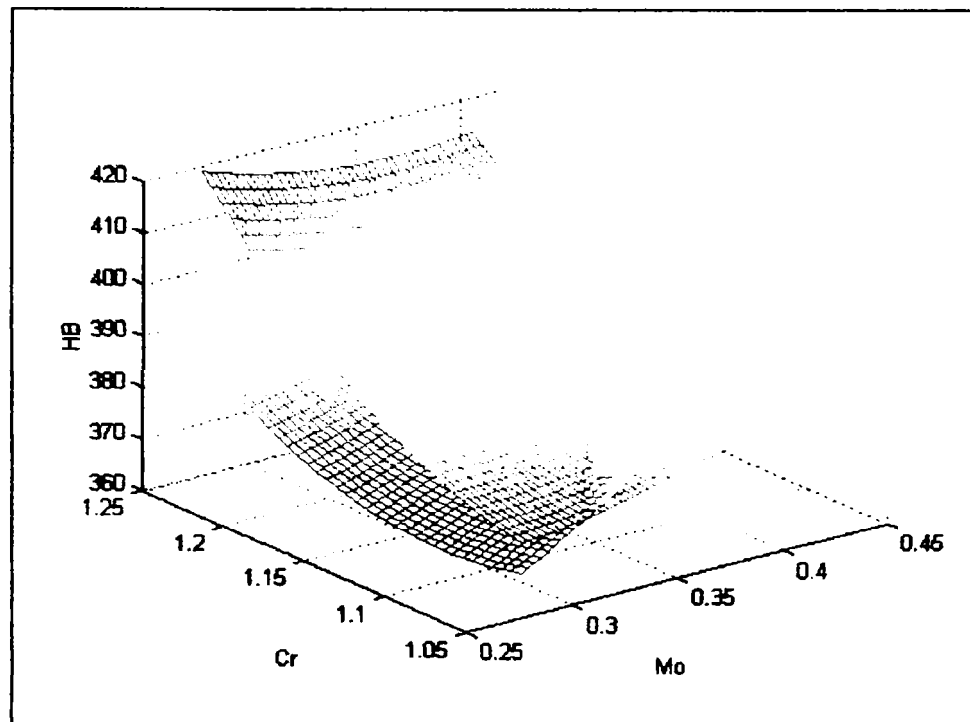


Figura A.III.2.2_9. Suprafața HB = HB(Cr, Ni_{med}, Mo).

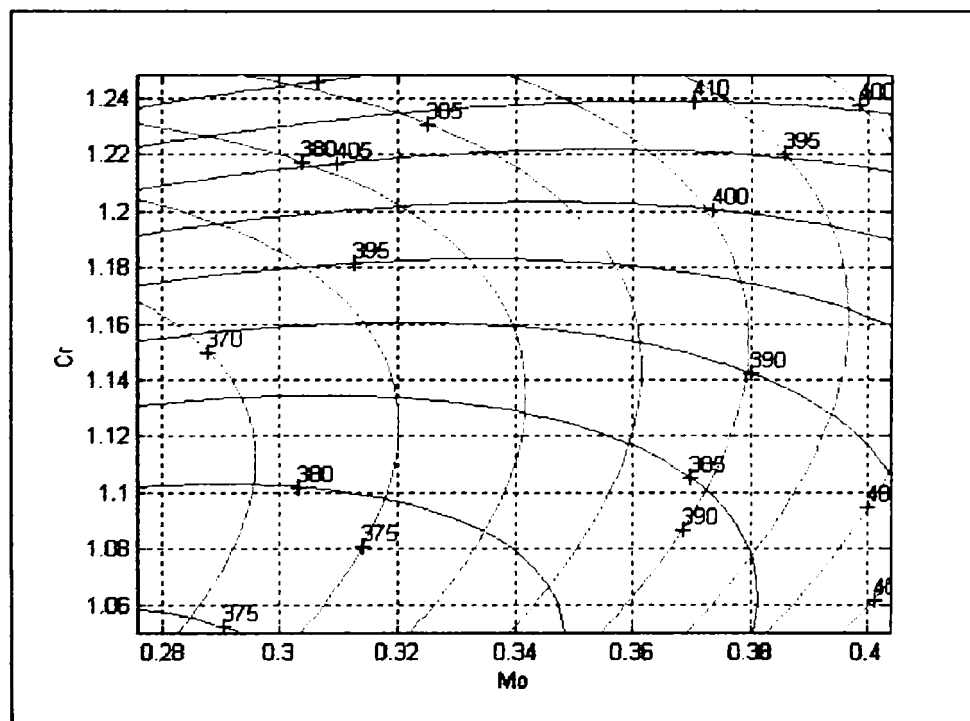


Figura A.III.2.2_10. Curbele de nivel ale variației HB = HB(Cr, Ni_{med}, Mo).

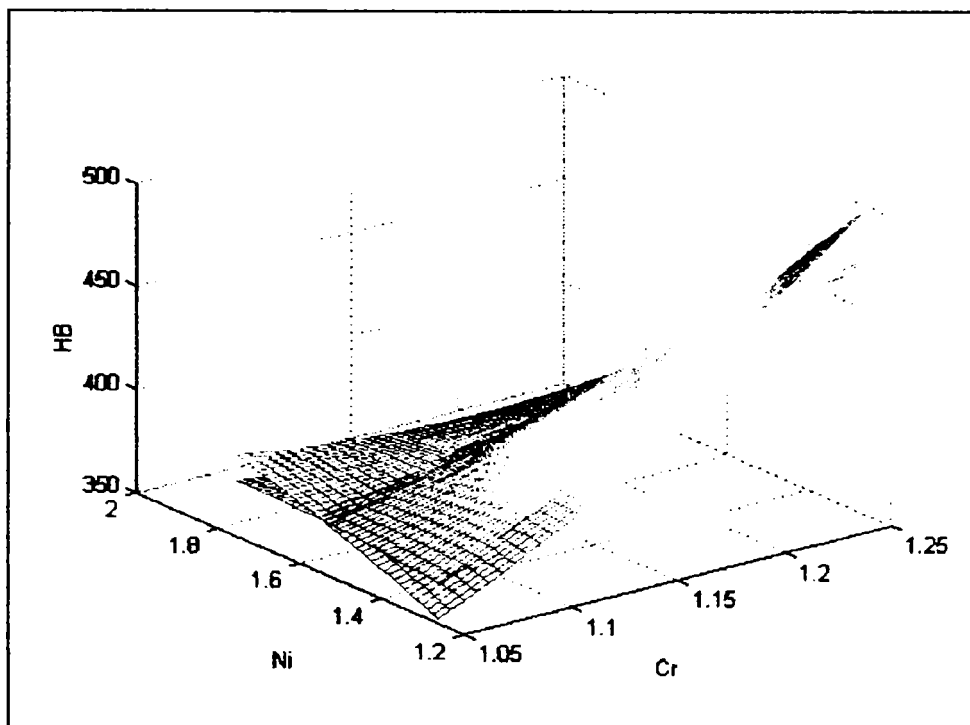


Figura A.III.2.2_11. Suprafața $HB = HB(Cr, Ni, Mo_{med})$.

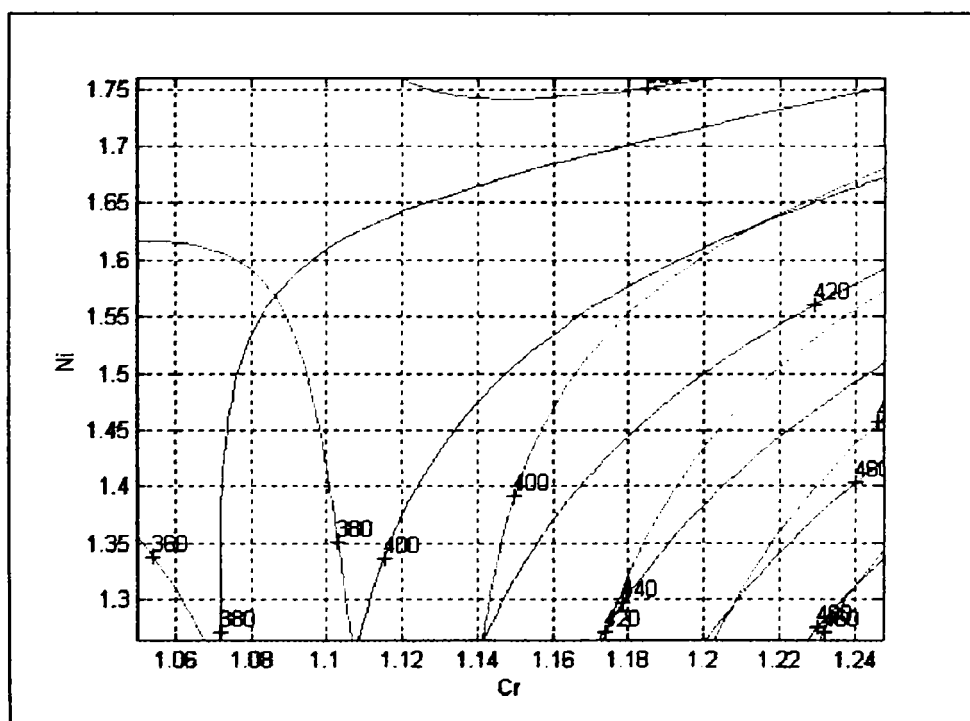


Figura A.III.2.2_12. Curbele de nivel ale variației $HB = HB(Cr, Ni, Mo_{med})$.

ANEXA III.2.3.

PROGRAMUL MATLAB PENTRU STUDIUL VARIATIEI HB = HB(C,Si,Mn)

TABELUL 1. DATE EXPERIMENTALE

1.92	0.7	0.85	395
1.9	0.79	0.8	378
1.9	0.79	0.8	380
1.9	0.79	0.8	383
1.9	0.79	0.8	389
1.85	0.72	0.83	389
1.85	0.72	0.83	384
1.85	0.72	0.83	375
1.82	0.75	0.83	373
1.88	0.65	0.82	381
2	0.75	0.87	408
2	0.75	0.87	412
1.98	0.72	0.8	400
1.92	0.7	0.85	392
1.85	0.72	0.83	378
1.8	0.72	0.77	368
1.82	0.63	0.84	370
1.95	0.6	0.84	398
1.85	0.7	0.8	380
2.03	0.65	0.9	420
1.9	0.76	0.9	383
1.74	0.48	0.76	360
1.8	0.6	0.78	368
1.84	0.78	0.8	310
1.94	0.67	0.75	396
1.82	0.53	0.84	374
1.82	0.6	0.7	369
1.95	0.72	0.77	396
1.82	0.53	0.84	374

TABELUL 2. LIMITE DE VARIATIE ALE VARIABILELOR

C	1.74	2.03
Si	0.48	0.79
Mn	0.7	0.9
HB	310	420

limitele de reprezentare grafica

limxi =	1.78833333333333
limxs =	1.98166666666667
limyi =	0.51875000000000
limys =	0.75125000000000
limzi =	0.72000000000000
limzs =	0.88000000000000

TABELUL 3. VALORILE MEDII SI ABATERILE VARIABILELOR

C		
1.8828	0.068526	
Si		
0.69069	0.082459	
Mn		
0.81724	0.043063	
HB		
382.17	19.508	

ECUATIA HIPERSUPRAFETEI DE REGRESIE

$$HB = -249.9905 \cdot C^2 + -968.5799 \cdot Si^2 + 1.2254 \cdot Mn^2 + 1310.0881 \cdot C \cdot Si + 305.8805 \cdot Si \cdot Mn + 169.9657 \cdot Mn \cdot C + 121.6014 \cdot C + -955.5616 \cdot Si + -58.6473 \cdot Mn + 420.7182$$

COEFICIENTUL DE CORELATIE

$$r_f = 0.83543104870423$$

ABATEREA DE LA SUPRAFATA DE REGRESIE

$$s_f = 10.72142591019631$$

TABELUL 4. COMPARAREA DATELOR EXPERIMENTALE CU CELE TEORETICE

1	1.92	0.7	0.85	395	396.31	-1.3091
2	1.9	0.79	0.8	378	375.25	2.7494
3	1.9	0.79	0.8	380	375.25	4.7494
4	1.9	0.79	0.8	383	375.25	7.7494
5	1.9	0.79	0.8	389	375.25	13.749
6	1.85	0.72	0.83	389	375.36	13.636
7	1.85	0.72	0.83	384	375.36	8.6357
8	1.85	0.72	0.83	375	375.36	-0.36431
9	1.82	0.75	0.83	373	359.24	13.757
10	1.88	0.65	0.82	381	388.07	-7.0678
11	2	0.75	0.87	408	413.65	-5.6511
12	2	0.75	0.87	412	413.65	-1.6511
13	1.98	0.72	0.8	400	405.88	-5.8763
14	1.92	0.7	0.85	392	396.31	-4.3091
15	1.85	0.72	0.83	378	375.36	2.6357
16	1.8	0.72	0.77	368	358.95	9.0503
17	1.82	0.63	0.84	370	379.25	-9.2503
18	1.95	0.6	0.84	398	393.87	4.1299
19	1.85	0.7	0.8	380	377.28	2.7225
20	2.03	0.65	0.9	420	415.5	4.4986
21	1.9	0.76	0.9	383	385.01	-2.0127
22	1.74	0.48	0.76	360	357.1	2.8983
23	1.8	0.6	0.78	368	372.98	-4.9811
24	1.84	0.78	0.8	310	356.9	-46.9
25	1.94	0.67	0.75	396	393.89	2.1099
26	1.82	0.53	0.84	374	374.42	-0.4197
27	1.82	0.6	0.7	369	370.17	-1.1683
28	1.95	0.72	0.77	396	397.69	-1.6908
29	1.82	0.53	0.84	374	374.42	-0.4197

COORDONATELE PUNCTULUI SEA SUNT :

C 1.2739
Si 0.50898
Mn 0.89127
HB 281.127

Deoarece aceasta hipersuprafata nu poate fi reprezentata in spatiul cu 4 dimensiuni, s-a recurs la inlocuirea, succesiv, a cate unei variabile independente cu valoarea ei medie. Aceste suprafete, care apartin spatiului cu 3 dimensiuni pot fi reprezentate si interpretate de tehnologi.

$$HBC_{med} = -968.5799 \cdot Si^2 + 1.2254 \cdot Mn^2 + -305.8805 \cdot Si \cdot Mn + 1511.018 \cdot Si + 261.3571 \cdot Mn + -236.4973$$

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR C1:

$$HB = HB(C_{med}, Si, Mn)$$

$$\text{HBSimed} = 1.2254 \cdot \text{Mn}^2 + -249.9905 \cdot \text{C}^2 + 169.9657 \cdot \text{Mn} \cdot \text{C} + -269.9158 \cdot \text{Mn} + 1026.4656 \cdot \text{C} + -701.3415$$

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR C2:

$$\text{HB} = \text{HB}(\text{C}, \text{Simed}, \text{Mn})$$

»

$$\text{HBMnmed} = -249.9905 \cdot \text{C}^2 + -968.5799 \cdot \text{Si}^2 + 1310.0881 \cdot \text{C} \cdot \text{Si} + 260.5044 \cdot \text{C} + -1205.5398 \cdot \text{Si} + 373.6075$$

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR C3:

$$\text{HB} = \text{HB}(\text{C}, \text{Si}, \text{Mnmed})$$

»

ANEXA III.2.4.

PROGRAMUL MATLAB PENTRU STUDIUL VARIATIEI HB = HB(Cr,Ni,Mo)

TABELUL 1. DATE EXPERIMENTALE

1.16	1.67	0.34	395
1.07	1.78	0.31	378
1.07	1.78	0.31	380
1.07	1.78	0.31	383
1.07	1.78	0.31	389
1.08	1.6	0.3	389
1.08	1.6	0.3	384
1.08	1.6	0.3	375
1.06	1.77	0.33	373
1.08	1.65	0.33	381
1.28	1.73	0.39	408
1.28	1.73	0.39	412
1.05	1.62	0.35	400
1.16	1.67	0.34	392
1.08	1.6	0.3	378
1.01	1.62	0.31	368
1.1	1.66	0.35	370
1.15	1.65	0.42	398
1.1	1.64	0.3	380
1.3	1.62	0.4	420
1.16	1.7	0.3	383
1.04	1.85	0.26	360
1.04	1.65	0.33	368
1.12	1.74	0.31	310
1.1	1.7	0.32	396
1.1	1.73	0.34	374
1	1.55	0.26	369
1.12	1.18	0.33	396
1.1	1.73	0.34	374

TABELUL 2. LIMITE DE VARIATIE ALE VARIABILELOR

Cr 1 1.3
Ni 1.18 1.85
Mo 0.26 0.42
HB 310 420

limitele de reprezentare grafica

limxi = 1.050000000000000
limxs = 1.250000000000000
limyi = 1.263750000000000
limys = 1.766250000000000
limzi = 0.276000000000000
limzs = 0.404000000000000

TABELUL 3. VALORILE MEDII SI ABATERILE VARIABILELOR

Cr
1.1072 0.072488
Ni
1.6683 0.1168
Mo
0.3269 0.036587
HB
382.17 19.508

ECUATIA HIPERSUPRAFETEI DE REGRESIE

$$HB=815.1388*Cr^2+-36.8481*Ni^2+762.8368*Mo^2+-1280.475*Cr*Ni+1637.9158*Ni*Mo+-828.9962*Mo*Cr+644.347*Cr+965.1077*Ni+-2165.581*Mo+-442.5145$$

COEFICIENTUL DE CORELATIE

$$rf = 0.67430279119981$$

ABATEREA DE LA SUPRAFATA DE REGRESIE

$$sf = 14.40567391377988$$

TABELUL 4. COMPARAREA DATELOR EXPERIMENTALE CU CELE TEORETICE

1	1.16	1.67	0.34	395	385.15	9.8543
2	1.07	1.78	0.31	378	373.34	4.6588
3	1.07	1.78	0.31	380	373.34	6.6588
4	1.07	1.78	0.31	383	373.34	9.6588
5	1.07	1.78	0.31	389	373.34	15.659
6	1.08	1.6	0.3	389	377.92	11.076
7	1.08	1.6	0.3	384	377.92	6.0756
8	1.08	1.6	0.3	375	377.92	-2.9244
9	1.06	1.77	0.33	373	381.91	-8.9103
10	1.08	1.65	0.33	381	379.28	1.7174
11	1.28	1.73	0.39	408	404.36	3.6393
12	1.28	1.73	0.39	412	404.36	7.6393
13	1.05	1.62	0.35	400	380.96	19.041
14	1.16	1.67	0.34	392	385.15	6.8543
15	1.08	1.6	0.3	378	377.92	0.075606
16	1.01	1.62	0.31	368	376.44	-8.4373
17	1.1	1.66	0.35	370	382.94	-12.938
18	1.15	1.65	0.42	398	398.6	-0.60396
19	1.1	1.64	0.3	380	377.55	2.4549
20	1.3	1.62	0.4	420	428.92	-8.9241
21	1.16	1.7	0.3	383	376.7	6.2984
22	1.04	1.85	0.26	360	357.16	2.8431
23	1.04	1.65	0.33	368	379.84	-11.839
24	1.12	1.74	0.31	310	371.64	-61.644
25	1.1	1.7	0.32	396	376.64	19.363
26	1.1	1.73	0.34	374	380.46	-6.4588
27	1	1.55	0.26	369	372.68	-3.6822
28	1.12	1.18	0.33	396	396.75	-0.74688
29	1.1	1.73	0.34	374	380.46	-6.4588

COORDONATELE PUNCTULUI SEA SUNT :

Cr0.97666
Ni1.5876
Mo0.24572
HB372.1663

Deoarece aceasta hipersuprafata nu poate fi reprezentata in spatiul cu 4 dimensiuni, s-a recurs la inlocuirea, succesiv, a cate unei variabile independente cu valoarea ei medie. Aceste suprafete, care apartin spatiului cu 3 dimensiuni pot fi reprezentate si interpretate de tehnologi.

$$HBCrmed=-36.8481*Ni^2+762.8368*Mo^2+1637.9158*Ni*Mo+-452.6872*Ni+-3083.4799*Mo+1270.2798$$

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR C1:

HB= HB(Crmed,Ni,Mo)

»

$$HB_{Nimed} = 762.8368 * Mo^2 + 815.1388 * Cr^2 - 828.9962 * Mo * Cr + 566.9144 * Mo + -1491.8385 * Cr + 1064.9978$$

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR C2:

$$HB = HB(Cr, Nimed, Mo)$$

»

$$HB_{Momed} = 815.1388 * Cr^2 - 36.8481 * Ni^2 - 1280.475 * Cr * Ni + 373.351 * Cr + 1500.5367 * Ni - 1068.9177$$

MATRICEA LINIILOR DE CONTUR C3:

$$HB = HB(Cr, Ni, Momed)$$

»

FIȘIERUL DE DATE al programului de simulare COSMOS/M 2.5

```

*****
*****
**
**
** CCCC OOOO SSSS M M OOOO SSSS / M M **
** C O O S MM MM O O S / MM MM **
** C O O SSSS M M M M O O SSSS / M M M M **
** C O O S M M M O O S / M M M **
** CCCC OOOO SSSS M M OOOO SSSS / M M **
**
**
**
**
**          VERSION: 2.5
**      DISTRIBUTED BY:
** STRUCTURAL RESEARCH AND ANALYSIS CORPORATION
**      12121 WILSHIRE BLVD. SUITE 700
**      LOS ANGELES, CALIFORNIA 90025
**      TEL. NO. (310) 207-2800
**      COPYRIGHT 1988 S. R. A. C.
**
*****
*****

```

```

Problem name: ana2a
Date       : 04/29/2003      Time: 17:04:56
Title      :
Subtitle   :

```

CONTROL INFORMATION

```

NUMBER OF LOAD CASES . . . . . (NLCASE) = 1
SOLUTION MODE . . . . . (MODEX) = 0
EQ. 0, STATIC ANALYSIS
EQ. 1, BUCKLING ANALYSIS
EQ. 2, DYNAMIC ANALYSIS
SOLVER TYPE . . . . . (ISOL) = 0
EQ. 0, DIRECT SPARSE SOLVER
EQ. 1, DIRECT SKYLINE SOLVER
EQ. 2, ITERATIVE SOLVER

THERMAL LOADING FLAG . . . . . (ITHERM) = 0
EQ. 0, NO THERMAL EFFECTS CONSIDERED
EQ. 1, ADD TEMPERATURE EFFECT
GRAVITY LOADING FLAG . . . . . (IGRAV) = 0
EQ. 0, NO GRAVITY LOADING CONSIDERED
EQ. 1, ADD GRAVITY LOADING EFFECT
CENTRIFUGAL LOADING FLAG . . . . . (ICNTRF) = 0
EQ. 0, NO CENTRIFUGAL LOADING CONSIDERED
EQ. 1, ADD CENTRIFUGAL LOADING EFFECT
IN-PLANE STIFFENING FLAG . . . . . (INPLN) = 0
EQ. 0, NO IN-PLANE EFFECTS CONSIDERED
EQ. 1, IN-PLANE EFFECTS CONSIDERED
SOFT SPRING ADDITION FLAG . . . . . (ISOFT) = 0
EQ. 0, NO SOFT SPRING OPTION
EQ. 1, SOFT SPRING ADDED

SAVE DECOMPOSED STIFFNESS MATRIX FLAG . . . (ISAVK) = 0
EQ. 0, DO NOT SAVE DECOMPOSED K
EQ. 1, SAVE DECOMPOSED K
FORM STIFFNESS MATRIX FLAG . . . . . (IFORMK) = 0
EQ. 0, FORM STIFFNESS MATRIX
EQ. 1, USE EXISTING DECOMPOSED STIFFNESS MATRIX
SPIN SOFTENING FLAG . . . . . (ISPIN) = 0

```

EQ. 0, NO SPIN SOFTENING EFFECTS CONSIDERED
 EQ. 1, SPIN SOFTENING EFFECTS CONSIDERED
 INERTIA RELIEF FLAG (IFORMK) = 0
 EQ. 0, NO INERITA RELIEF EFFECTS CONSIDERED
 EQ. 1, INERITA RELIEF EFFECTS CONSIDERED
 RIGID CONNECTIONS FLAG (IRIGID) = 0
 EQ. 0, HINGE CONNECTIONS BETWEEN SOLIDS & SHELLS
 EQ. 1, RIGID CONNECTIONS BETWEEN SOLIDS & SHELLS

TOTAL SYSTEM DATA

NUMBER OF EQUATIONS (NEQ) = 144984
 MAXIMUM HALF BANDWIDTH (MK) = 1
 MEAN HALF BANDWIDTH (MM) = 133
 NUMBER OF ELEMENTS. (NUME) = 253613
 NUMBER OF NODAL POINTS. (NUMNP) = 49768

 ORIGINAL NO. OF MATRIX ELEMENTS (NWK) = 3082096

 * RESPONSE PRINTOUT (LOAD CASE 1) *

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

- Thermal flag is off (no thermal effect)

FOR REQUESTED (Global Cartesian Coord. System)
 NODES FX FY FZ MX MY MZ
 Total React. -.6487E-05 0.2353E+06 0.1055E-04 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00

SOLUTION TIME LOG IN SEC

FOR PROBLEM

TIME FOR INPUT PHASE = 48
 TIME FOR CALCULATION OF STRUCTURE STIFFNESS MATRIX = 6
 TRIANGULARIZATION OF STIFFNESS MATRIX = 4052
 TIME FOR LOAD CASE SOLUTIONS = 23
 TIME FOR REACTION/GRID FORCE BALANCE = -4127
 TOTAL SOLUTION TIME = 9
 (0: 0: 9)

STRESS EVALUATION FOR STATIC ANALYSIS

 * STRESS PRINTOUT (LOAD CASE 1) *

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

- Thermal flag is off (no thermal effect)

**** NOTE: <STRESS PRINT FLAG IS OFF> ****

MINIMUM/MAXIMUM AVG. NODAL STRESSES

	SIGMA-X1	SIGMA-X2	SIGMA-X3	TAU-X12	TAU-X13	TAU-X23
NODE 35105	50334	48679	47239	48000	49237	
MIN.	-233.4	-900.5	-217.0	-233.3	-56.59	-179.3
NODE 46433	46011	47024	48419	45989	48407	

MAX. 112.4 254.7 74.72 196.4 90.61 144.4

MAXIMUM NODAL VON MISES STRESS

NODE 50362
MAX. 931.5

ERROR ESTIMATION
(for requested elements)

Total Strain Energy (TSE) = .837525E+04
Total Error Energy (TEE) = .877224E+04
Ave. Percentage Error (APE) = .586262E+02
(APE = sqrt (TEE / (TSE * 2. + TEE)) * 100.)

SOLUTION TIME LOG IN SEC FOR STRESS CALCULATIONS

READING GENERAL INFORMATION AND ELEMENT DATA. . . = 69
STRESS CALCULATION AND PRINTOUT = 52
UPDATING DATABASE = 0
TOTAL SOLUTION TIME = 121
(0 : 2 : 1)

**
**
** CCCC OOOO SSSS M M OOOO SSSS / M M **
** C O O S MM MM O O S / MM MM **
** C O O SSSS M M M M O O SSSS / M M M M **
** C O O S M M M O O S / M M M **
** CCCC OOOO SSSS M M OOOO SSSS / M M **
**
**
** VERSION: 2.5 **
** DISTRIBUTED BY: **
** STRUCTURAL RESEARCH AND ANALYSIS CORPORATION **
** 12121 WILSHIRE BLVD. SUITE 700 **
** LOS ANGELES, CALIFORNIA 90025 **
** TEL. NO. (310) 207-2800 **
** COPYRIGHT 1988 S. R. A. C. **
**

Problem name: ana3
Date : 05/29/2003 Time: 15:06:19
Title :
Subtitle :

CONTROL INFORMATION

NUMBER OF LOAD CASES (NLCASE) = 5
SOLUTION MODE (MODEX) = 0
EQ. 0, STATIC ANALYSIS
EQ. 1, BUCKLING ANALYSIS
EQ. 2, DYNAMIC ANALYSIS
SOLVER TYPE (ISOL) = 0
EQ. 0, DIRECT SPARSE SOLVER
EQ. 1, DIRECT SKYLINE SOLVER
EQ. 2, ITERATIVE SOLVER

THERMAL LOADING FLAG (ITHERM) = 1
EQ. 0, NO THERMAL EFFECTS CONSIDERED
EQ. 1, ADD TEMPERATURE EFFECT
GRAVITY LOADING FLAG (IGRAV) = 0
EQ. 0, NO GRAVITY LOADING CONSIDERED

EQ. 1, ADD GRAVITY LOADING EFFECT
 CENTRIFUGAL LOADING FLAG(ICNTRF) = 0
 EQ. 0, NO CENTRIFUGAL LOADING CONSIDERED
 EQ. 1, ADD CENTRIFUGAL LOADING EFFECT
 IN-PLANE STIFFENING FLAG(INPLN) = 0
 EQ. 0, NO IN-PLANE EFFECTS CONSIDERED
 EQ. 1, IN-PLANE EFFECTS CONSIDERED
 SOFT SPRING ADDITION FLAG(ISOFT) = 0
 EQ. 0, NO SOFT SPRING OPTION
 EQ. 1, SOFT SPRING ADDED

 SAVE DECOMPOSED STIFFNESS MATRIX FLAG . . . (ISAVK) = 0
 EQ. 0, DO NOT SAVE DECOMPOSED K
 EQ. 1, SAVE DECOMPOSED K
 FORM STIFFNESS MATRIX FLAG(IFORMK) = 0
 EQ. 0, FORM STIFFNESS MATRIX
 EQ. 1, USE EXISTING DECOMPOSED STIFFNESS MATRIX

 SPIN SOFTENING FLAG(ISPIN) = 0
 EQ. 0, NO SPIN SOFTENING EFFECTS CONSIDERED
 EQ. 1, SPIN SOFTENING EFFECTS CONSIDERED
 INERTIA RELIEF FLAG(IFORMK) = 0
 EQ. 0, NO INERITA RELIEF EFFECTS CONSIDERED
 EQ. 1, INERITA RELIEF EFFECTS CONSIDERED
 RIGID CONNECTIONS FLAG(IRIGID) = 0
 EQ. 0, HINGE CONNECTIONS BETWEEN SOLIDS & SHELLS
 EQ. 1, RIGID CONNECTIONS BETWEEN SOLIDS & SHELLS
 T O T A L S Y S T E M D A T A
 NUMBER OF EQUATIONS(NEQ) = 145869
 MAXIMUM HALF BANDWIDTH(MK) = 1
 MEAN HALF BANDWIDTH(MM) = 132
 NUMBER OF ELEMENTS(NUME) = 253613
 NUMBER OF NODAL POINTS(NUMNP)= 50063

 ORIGINAL NO. OF MATRIX ELEMENTS(NWK) = 3089901

 * R E S P O N S E P R I N T O U T (LOAD CASE 1) *

FOR REQUESTED (Global Cartesian Coord. System)
 NODES FX FY FZ MX MY MZ
 Total React. -.4998E-06 0.1216E-05 -.4716E-06 0.0000E+00 0.0000E+00 0.0000E+00

S O L U T I O N T I M E L O G I N S E C
 FOR PROBLEM
 TIME FOR INPUT PHASE = 47
 TIME FOR CALCULATION OF STRUCTURE STIFFNESS MATRIX = 61
 TRIANGULARIZATION OF STIFFNESS MATRIX = 34706
 TIME FOR LOAD CASE SOLUTIONS = 912
 TIME FOR REACTION/GRID FORCE BALANCE = -35738
 T O T A L S O L U T I O N T I M E = 154
 (0: 2:34)

S T R E S S E V A L U A T I O N F O R S T A T I C A N A L Y S I S

 * S T R E S S P R I N T O U T (LOAD CASE 1) *

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

- User Prescribed Nodal Temperatures

**** NOTE: <STRESS PRINT FLAG IS OFF> ****

MINIMUM/MAXIMUM AVG. NODAL STRESSES

	SIGMA-X1	SIGMA-X2	SIGMA-X3	TAU-X12	TAU-X13	TAU-X23
NODE	50334	47286	48844	46479	47038	48844
MIN.	-4997.	-6643.	-3917.	-2097.	-1207.	-2282.
NODE	35245	35245	35245	50334	46433	49051
MAX.	6192.	4897.	6163.	3117.	1479.	1859.

MAXIMUM NODAL VON MISES STRESS

NODE 50363
MAX. 6444.

ERROR ESTIMATION
(for requested elements)

Total Strain Energy (TSE) = .997364E+07
Total Error Energy (TEE) = .103614E+07
Ave. Percentage Error (APE) = .222213E+02
(APE = sqrt (TEE / (TSE*2. + TEE)) * 100.)

* STRESS PRINTOUT (LOAD CASE 2) *

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

- Temperatures Loaded from Thermal Analyses
(From Time Step = 1)

**** NOTE: <STRESS PRINT FLAG IS OFF> ****

MINIMUM/MAXIMUM AVG. NODAL STRESSES

	SIGMA-X1	SIGMA-X2	SIGMA-X3	TAU-X12	TAU-X13	TAU-X23
NODE	48677	46549	50334	46479	47038	48753
MIN.	-4353.	-4028.	-2120.	-2356.	-1192.	-1839.
NODE	35402	5347	5347	50334	46433	46487
MAX.	2613.	4613.	2245.	1972.	2678.	1821.

MAXIMUM NODAL VON MISES STRESS

NODE 50363
MAX. 5544.

ERROR ESTIMATION
(for requested elements)

Total Strain Energy (TSE) = .443034E+09
Total Error Energy (TEE) = .417965E+07
Ave. Percentage Error (APE) = .685196E+01
(APE = sqrt (TEE / (TSE*2. + TEE)) * 100.)

* STRESS PRINTOUT (LOAD CASE 3) *

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

- User Prescribed Nodal Temperatures

**** NOTE: <STRESS PRINT FLAG IS OFF> ****

MINIMUM/MAXIMUM AVG. NODAL STRESSES

	SIGMA-X1	SIGMA-X2	SIGMA-X3	TAU-X12	TAU-X13	TAU-X23
NODE 50334	47286	48844	46479	47038	48844	
MIN.	-4997.	-6643.	-3917.	-2099.	-1208.	-2282.
NODE 35245	35245	35245	50334	46433	49051	
MAX.	6193.	4897.	6164.	3117.	1481.	1859.

MAXIMUM NODAL VON MISES STRESS

NODE 50363
MAX. 6443.

ERROR ESTIMATION
(for requested elements)

Total Strain Energy (TSE) = .999331E+07
Total Error Energy (TEE) = .104249E+07
Ave. Percentage Error (APE) = .222652E+02
(APE = sqrt (TEE/(TSE*2. + TEE)) * 100.)

* STRESS PRINT OUT (LOAD CASE 4) *

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

- User Prescribed Nodal Temperatures

**** NOTE: <STRESS PRINT FLAG IS OFF> ****

MINIMUM/MAXIMUM AVG. NODAL STRESSES

	SIGMA-X1	SIGMA-X2	SIGMA-X3	TAU-X12	TAU-X13	TAU-X23
NODE 5373	5373	5702	5842	5380	5920	
MIN.	-112.9	-121.0	-116.4	-11.52	-9.378	-26.50
NODE 32252	32547	32470	5394	5367	5770	
MAX.	51.38	72.83	55.69	8.949	10.43	24.55

MAXIMUM NODAL VON MISES STRESS

NODE 50363
MAX. 47.57

ERROR ESTIMATION
(for requested elements)

Total Strain Energy (TSE) = .122984E+05

Total Error Energy (TEE) = .358231E+04
 Ave. Percentage Error (APE) = .356548E+02
 (APE = sqrt (TEE/(TSE*2. + TEE)) * 100.)

 * S T R E S S P R I N T O U T (LOAD CASE 5) *

STATUS OF THERMAL EFFECTS FOR THIS LOAD CASE:

- User Prescribed Nodal Temperatures

**** NOTE: <STRESS PRINT FLAG IS OFF> ****

MINIMUM/MAXIMUM AVG. NODAL STRESSES

	SIGMA-X1	SIGMA-X2	SIGMA-X3	TAU-X12	TAU-X13	TAU-X23
NODE 50334	47286	48844	46479	47038	48844	
MIN.	-4998.	-6643.	-3917.	-2098.	-1207.	-2282.
NODE 35245	35245	35245	50334	46433	49051	
MAX.	6192.	4897.	6164.	3118.	1480.	1859.

MAXIMUM NODAL VON MISES STRESS

NODE 50363
 MAX. 6444.

E R R O R E S T I M A T I O N
 (for requested elements)

Total Strain Energy (TSE) = .997401E+07
 Total Error Energy (TEE) = .103617E+07
 Ave. Percentage Error (APE) = .222213E+02
 (APE = sqrt (TEE/(TSE*2. + TEE)) * 100.)

S O L U T I O N T I M E L O G I N S E C F O R S T R E S S C A L C U L A T I O N S

READING GENERAL INFORMATION AND ELEMENT DATA. . . = 125
 STRESS CALCULATION AND PRINTOUT = 1087
 UPDATING DATABASE = 0
 T O T A L S O L U T I O N T I M E = 1212
 (0:20:12)

%%%