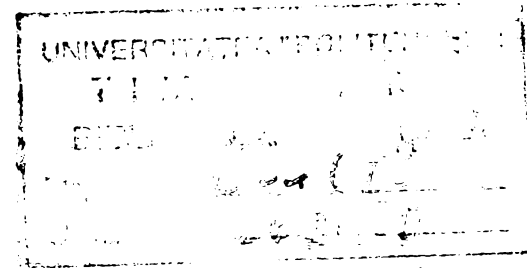


UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" TIMIȘOARA

FACULTATEA DE MECANICĂ

CATEDRA "TEHNOLOGIE MECANICĂ"



TEZĂ DE DOCTORAT

CONTRIBUȚII LA OPTIMIZAREA RECONDIȚIONĂRII CILINDRILOR DE LAMINOR DIN OȚEL

**BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA**

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

Prof.dr.doc.șt.ing.d.h.c. AUREL NANU

Ing. STOICOIU FLORIN

- Timișoara 2002 -

CUPRINS

pag.

CAPITOLUL 1:	5
Introducere	5
CAPITOLUL 2:	12
Stadiul actual al prelucrării și recondiționării cilindrilor de laminor din oțel.	12
2.1. - Oțeluri utilizate pentru confecționarea cilindrilor de laminor.....	12
2.1.1. - Cerințe impuse cilindrilor de laminare.....	12
2.1.2. - Proprietăți ale oțelurilor pentru confecționarea cilindrilor de laminor și criterii de alegere a acestora	14
2.2. - Tehnologii de prelucrare a cilindrilor de laminor din oțel	20
2.2.1. – Clasificare.....	20
2.2.2. - Etape tehnologice și parametri în vederea realizării procesului de forjare.....	20
2.2.3. - Tehnologii specializate de prelucrare a cilindrilor de laminor din oțel pentru laminare la rece	23
2.2.4. - Tehnologii specializate de prelucrare a cilindrilor de laminor din oțel pentru laminare la cald	35
2.3. - Tehnologii de recondiționare a cilindrilor de laminor din oțel	40
2.3.1. - Tehnologii clasice utilizate în prezent pentru recondiționarea cilindrilor de laminor din oțel	40
2.3.2. - Stadiul actual al cercetării și aplicării tehnologiilor de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață la oțelurile cu caracteristici fizico-chimice și mecanice superioare. Instalații și dispozitive utilizate. ...	45
CAPITOLUL 3:	61
Optimizarea recondiționării cilindrilor de laminor din oțel, prin varianta tehnologică ce include strunjirea cu preîncălzire inductivă	

a stratului de suprafață.....	61
3.1. - Direcții de optimizare evidențiate în cadrul procesului de recondiționare a cilindrilor de laminor din oțel, prin varianta tehnologică ce include strunjirea cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață.....	61
3.2. - Proiectarea pinolei adaptabile la strungul SNA500, capabilă să compenseze dilatățile termice axiale ale cilindrilor de laminor supuși strunjirii cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață.....	64
3.3. - Optimizarea recondiționării cilindrilor de laminor din oțel, prin modelarea matematică a procesului de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, în vederea stabilirii unei tehnologii de prelucrare aplicabilă tuturor oțelurilor.....	73
3.3.1. - Abordarea sistemică în vederea creării modelului matematic.....	73
3.3.1.1. - Modelul intrări-ieșiri al sistemului tehnologic de prelucrare prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață.....	73
3.3.1.2. - Funcții obiectiv pentru modelul generalizat al sistemului.....	74
3.3.1.3. - Factorii de influență potențiali la prelucrarea prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață.....	75
3.3.2. - Modelarea matematică a acțiunii principalilor factori de influență asupra componentelor forței de așchiere și rugozității suprafeței prelucrate.....	80
3.3.2.1. - Alegerea modelului matematic.....	80
3.3.2.2. - Modelarea matematică a acțiunii principalilor factori de influență asupra componentelor forței de așchiere.....	86
3.3.2.3. - Modelarea matematică a acțiunii principalilor factori de influență asupra rugozității suprafeței prelucrate.....	111

CAPITOLUL 4:120

Verificarea experimentală a preciziei de exprimare a modelelor matematice care vizează acțiunea factorilor de influență “rezistență la ruperea oțelului prelucrat”, “avansul longitudinal”, “adâncimea

de aşchiere” și “temperatura de aşchiere” asupra componentelor forței de aşchiere și rugozității suprafețelor prelucrate prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață.....	120
4.1. - Verificarea experimentală a modelării matematice a forței de aşchiere	120
4.1.1. - Analiza structurală și a durității suprafețelor active la cilindri de laminor din oțel 90VMoC15, supuși strujirii cu și fără preîncălzire inductivă a stratului de suprafață	121
4.1.2. - Stabilirea concordanței dintre valorile determinate experimental pentru componentele forței de aşchiere și cele rezultate prin modelare matematică, în cazul oțelurilor 90VMoC15, RUL1 și 50CrNi12	133
4.2. - Verificarea experimentală a modelării matematice a rugozității suprafețelor prelucrate	140
4.3. - Aplicabilitatea modelelor matematice create și verificate în domeniul recondiționării cilindrilor de laminor din oțel	146
4.4. - Norme de protecție a muncii la utilizarea instalației de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață.....	147
 CAPITOLUL 5:	150
Concluzii generale și contribuții originale	150
5.1. - Concluzii generale	150
5.2. - Contribuții originale	151
 BIBLIOGRAFIE	154

CAPITOLUL 1

INTRODUCERE

Având în vedere tendințele de utilizare pe scară tot mai largă a materialelor cu proprietăți fizico-chimice superioare, a căror prelucrabilitate devine tot mai dificilă, se impune ca, în paralel cu cercetările efectuate în scopul introducerii unor tehnologii noi, neconvenționale, să se perfecționeze continuu și procedeele clasice de prelucrare, întrucât acestea prezintă o serie de avantaje, cum ar fi:

- perfecționarea este posibilă fără întreruperea procesului de fabricație;
- nu sunt necesare investiții mari;
- se pot utiliza mașinile, instalațiile și sculele existente, adaptându-se, eventual, unele dispozitive;
- poate fi utilizat personal cu calificarea existentă etc. [2][5][6][41][52][54]

O aplicație directă o constituie domeniul recondiționării cilindrilor de laminor, respectiv a cilindrilor de laminare, care reprezintă scula propriu-zisă, deformatoare, în procesul de laminare. Aceasta preia efortul de deformare și îl transmite celorlalte componente ale sistemului, motiv pentru care este supusă unor solicitări multiple și complexe, în principal de încovoiere, torsiune și uzură [1][2][54][81]. În consecință, în alegerea materialelor pentru confecționarea cilindrilor de laminare - cu precădere pentru cei folosiți în domeniul laminării la rece, se ține cont de cerința tehnologică de scădere a valorii indicilor de plasticitate și creștere a celor mecanici (rezistență la rupere, duritate), fapt ce impune folosirea unor materiale cu proprietăți fizico-chimice superioare, greu prelucrabile.

În prezent, toți cilindrii de laminare uzați sunt refolosiți în urma adoptării uneia din următoarele variante tehnologice: [3][4][5][52][54]

- restrunjirea cilindrilor, redurificarea tăbliei cilindrilor, respectiv rectificarea acestora;
- reforjarea cilindrilor pentru obținerea unor cilindri de dimensiuni mai mici;
- folosirea cilindrilor ca electrozi în instalații de încălzire electrică;
- utilizarea cilindrilor ca încărcătură în cuptoare electrice bazice cu arc, la procesul de elaborare-turnare,

În cazul adoptării primei variante tehnologice, de refolosire a cilindrilor de laminare uzați, respectiv în vederea strunjirii cilindrilor confecționați din materiale (oțeluri) cu caracteristici fizico-chimice superioare, este esențială adoptarea unei tehnologii care să aibă la bază o creștere a prelucrabilității materialelor supuse prelucrării (așchierii prin strunjire).

Noțiunea de prelucrabilitate prin așchiere a unui material (oțel) se referă la capacitatea acestuia de a fi adus la forme și dimensiuni corespunzătoare, prin îndepărtarea adausului de material sub formă de așchii. Este, însă, necesară o prezentare mai completă a noțiunii de prelucrabilitate, de altfel, [2][22][41] evidențiază importanța și interacțiunea dintre cei trei factori:

- materialul de prelucrat;
- materialul sculei;
- condițiile de lucru.

Având în vedere influența acestor factori, se poate afirma că un material este mai prelucrabil în măsura în care așchieria în sine satisface următoarele condiții:

- energie minimă consumată pentru îndepărtarea așchiilor;
- durabilitatea ridicată a sculei;
- timp scurt de îndepărtare a adausului de material sub formă de așchii;
- calitate superioară a suprafeței prelucrate;

- precizie de prelucrare ridicată;
- aşchii ușor de îndepărtat.

Totalitatea acestor condiții este cuprinsă în noțiunea de condiții optime de prelucrare prin aşchiere.

Noțiunea de prelucrabilitate prin aşchiere nu are, până în prezent, o definiție unanim acceptată [2][22][58][66], fapt evidențiat și prin aceea că nu există o metodă unică, universal valabilă pentru aprecierea ei.

Cu toate acestea, cunoașterea prelucrabilității unui material prezintă o importanță deosebită, întrucât ea stă la baza stabilirii unor regimuri optime de aşchiere.

În acest scop, în cadrul studiului prelucrabilității prin aşchiere a cilindrilor de laminor din oțel, o direcție primordială de abordare o reprezintă studiul variației componentelor forței de aşchiere, în funcție de parametrii regimului de aşchiere, cu ajutorul căreia se vor determina regimuri optime de aşchiere, funcție de materialul supus prelucrării.

Cercetările teoretico-experimentale efectuate până în prezent [2][41][42][50][52][54][63][66] au demonstrat că prelucrabilitatea prin aşchiere a unui material (oțel) crește prin aplicarea unui procedeu de preîncălzire:

încălzirea cu ajutorul căldurii rămase de la operațiile precedente, procedeu limitat doar la oțelării, pentru decojirea lingourilor și debitarea capetelor acestora;

încălzirea totală înainte de prelucrarea prin aşchiere, procedeu complicat, neeconomic și care duce la scăderea rigidității sistemului mașină-piesă, precum și la apariția unor transformări de structură nedorite în toată masa piesei;

încălzirea locală a stratului de suprafață (procedeu care elimină dezavantajele menționate anterior), care se poate efectua:

- cu ajutorul flăcării unui arzător oxiacetilenic cu propan sau cu plasmă (încălzire incomodă, costisitoare și neuniformă);
- prin trecerea unui curent electric prin rezistență de contact (încălzire dificilă din cauza necesității izolării sistemului piesă-sculă și mașină, precum și datorită unor neajunsuri ca distrugerea contactului rotativ din cauza scânteilor formate între perii și colector etc.);
- prin inducție, cu ajutorul curenților de înaltă frecvență.

Acest ultim procedeu elimină toate dezavantajele prezentate anterior, având în plus avantajul că oferă posibilitatea reglării corespunzătoare a temperaturii de încălzire, a adâncimii stratului încălzit, a vitezei de încălzire, prin alegerea (reglarea) frecvenței și a curentului.

Studiul procesului de așchiere, respectiv studiul deformațiilor puternice, atât elastice, cât, îndeosebi, plastice, care preced așchiera metalului sau aliajului este foarte complex, fiind influențat de un număr mare de parametri, ca: proprietățile fizice ale materialului supus prelucrării, îndeosebi plasticitatea acestuia; elementele regimului de așchiere (t, s, v); geometria sculei; condițiile de răcire-ungere etc. [1][2][21][31][66].

Gradul de complexitate a fenomenului crește și mai mult dacă se ține cont de faptul că un număr mare dintre parametrii amintiți se influențează reciproc, modificându-și valoarea chiar în procesul de formare a așchiei. Astfel, proprietățile fizice ale materialului supus prelucrării influențează asupra lucrului mecanic necesar formării așchiei și, implicit, asupra temperaturii materialului din zona formării așchiei.

La rândul său, temperatura are influență asupra proprietăților mecanice ale materialului și anume: rezistența la rupere, limita de curgere, duritatea etc.

Din aceste considerente, studiul teoretic complet al fenomenelor ce au loc la aşchiere este foarte dificil, astfel că s-a recurs la studii bazate pe analiza rezultatelor unor cercetări experimentale. [2][21][22][41].

Pornind de la datele existente în literatura de specialitate cu privire la influenţa preîncălzirii inductive a stratului de suprafaţă la unele oţeluri supuse prelucrării prin aşchiere la strung (pentru OLC45, OLC60, Rp3, oţelul austenitic manganos turnat T105M120-tratat şi netratat termic) –cercetare efectuată de către prof.dr.ing. Aurel Breştin în cadrul tezei de doctorat [2], autorul prezentei teze de doctorat şi-a propus stabilirea, cu ajutorul modelării matematice, a unei tehnologii aplicabile tuturor oţelurilor greu prelucrabile datorită proprietăţilor fizico-mecanice superioare, o aplicaţie directă fiind în domeniul prelucrării şi recondiţionării (recalibrării) cilindrilor de laminor.

Structura logică pe baza căreia a fost construită prezenta teză de doctorat este următoarea:

a) Analiza stadiului actual al prelucrării şi recondiţionării cilindrilor de laminor din oţel.

Această sinteză bibliografică - ce formează obiectul Capitolului 2 - este astfel structurată, încât să fie evidenţiate distinct aspectele privitoare la:

oţeluri utilizate pentru confecţionarea cilindrilor de laminare;

tehnologiile de prelucrare a cilindrilor de laminor din oţel;

tehnologiile de recondiţionare a cilindrilor de laminor din oţel;

b)Stabilirea principalelor direcţii de optimizare, evidenţiate în cadrul procesului de recondiţionare a cilindrilor de laminor din oţel, prin varianta tehnologică ce include strunjirea cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafaţă, respectiv crearea unor modele matematice care să permită stabilirea unei tehnologii

de prelucrare aplicabilă tuturor oțelurilor, pornind de la cercetările experimentale evidențiate în sursa bibliografică [2], efectuate asupra unui număr limitat de oțeluri.

Aspectele menționate constituie obiectul Capitolului 3, care reprezintă un mod de abordare original - sub aspectul concepției și modului de rezolvare - a procesului de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață.

c) Verificarea experimentală a preciziei de exprimare a modelelor matematice create, la trei oțeluri greu prelucrabile utilizate în confecționarea cilindrilor de laminor, precum și efectuarea unei analize structurale și de duritate a suprafețelor active la cilindri de laminor din oțel destinați domeniului laminării la rece.

Această problemă face obiectul Capitolului 4 - capitol în cadrul căruia au fost evidențiate și aspecte privind aplicabilitatea modelelor matematice create și verificate, respectiv normele de protecție a muncii la utilizarea instalației de strunjire cu preîncălzire inductivă.

În finalul lucrării, este prezentat un capitol de sinteză (Capitolul 5), în care s-au formulat concluziile finale și s-au precizat principalele contribuții originale.

Realizarea cercetărilor teoretice și experimentale evidențiate în cadrul prezentei teze de doctorat a fost posibilă datorită sprijinului și îndrumării permanente de care autorul a beneficiat din partea conducătorului științific prof.dr.doc.șt.ing.d.h.c. Aurel Nanu. Autorul prezentei teze de doctorat, cu adâncă recunoștință și deosebit respect, aduce calde mulțumiri distinsului conducător științific care, prin competența binecunoscută, prin experiența acumulată în decursul unei vieți de muncă și perseverență, a constituit și un exemplu demn de urmat.

Totodată, autorul aduce calde mulțumiri prof.dr.ing. Aurel Breștin, ale cărui sprijin, susținere și implicare în vederea realizării acestei teze de doctorat le-a simțit permanent.

Un ajutor important atât în planul cercetării teoretice, cât și experimentale, a fost acordat autorului prezentei teze de doctorat de către conf.dr.ing. Mircea Vasilescu și prof.dr.ing. Mihai Ghiță, cărora acesta le este profund recunoscător.

Autorul aduce sincere mulțumiri pentru sprijinul acordat în vederea documentării și realizării unei importante părți din cercetarea experimentală conf.dr.ing. Antoniu Reviczky, prof.dr.ing. Zenoviu Lăncrăngean, prof.dr.ing. Aurel Dreucean, ș.l.dr.ing. Ioan Groza de la Catedra de Tehnologie Mecanică a Universității “Politehnica” Timișoara, precum și Catedrei de Studiul Metalelor a Facultății de Mecanică Timișoara.

De asemenea, autorul prezentei teze de doctorat a beneficiat de sprijinul și colaborarea ș.l.Constantin Milici de la Catedra de Matematică a Universității “Politehnica” Timișoara, căruia i se aduc mulțumiri.

În scopul documentării cu privire la stadiul actual al prelucrării și recondiționării cilindrilor de laminor, autorul a fost sprijinit de dr.ing. Cristian Orszari, director tehnic la S.C.”GAVAZI STEEL” S.A. Oțelu-Roșu, căruia i se aduc, de asemenea, mulțumiri.

CAPITOLUL 2

STADIUL ACTUAL AL PRELUCRĂRII SI RECONDIȚIONĂRII CILINDRILOR DE LAMINOR DIN OȚEL

2.1. Oțeluri utilizate pentru confecționarea cilindrilor de laminor

2.1.1. - Cerințe impuse cilindrilor de laminare

Cilindrii de laminare reprezintă scula propriu-zisă, deformatoare, în procesul de laminare, care - în contact cu laminatul - preia efortul de deformare și îl transmite celorlalte componente, în consecință, cerințele impuse acestora fiind multiple și complexe: rezistență la solicitările mecanice, statice și dinamice, la temperatura de lucru; rezistență la uzură în condiții de durabilitate; suprafață convenabilă; prindere satisfăcătoare a metalului de laminat. [3][4][5][54].

Aceste cerințe nu pot fi integral îndeplinite. Astfel, rezistența mecanică și rezistența la șoc sunt în contradicție cu rezistența la uzură, obligând la abordarea de priorități în funcție de specificul laminatului produs, deci, la compromisuri. În general, problema este soluționată prin alegerea corectă a materialului cilindrilor (ușurată, pe de o parte, de experiența bogată disponibilă în momentul de față și îngreunată, în același timp, de diversitatea bogată a materialelor utilizate), sens în care se are în vedere, prioritar, faptul că cilindrii, în procesul prelucrării semifabricatului, sunt supuși la solicitări complexe, în principal de încovoiere, torsiune și uzură (fig.2.1.1.) [1][54].

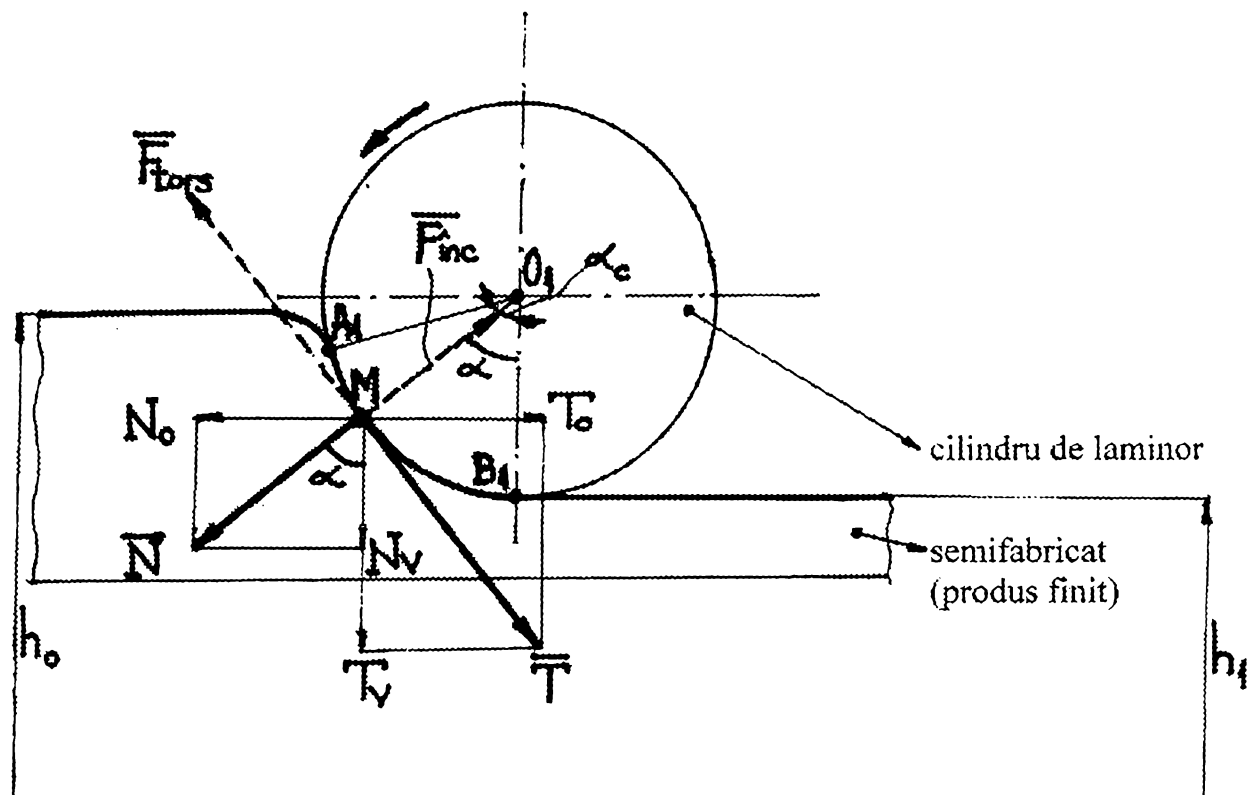


Fig.2.1.1. Forțe ce acționează în zona de contact, dintre cilindrul de laminor și semifabricat.

În zona de contact dintre cilindrul de laminor și semifabricat acționează două forțe principale:

forța radială de apăsare \bar{N} (N_0 ; N_v);

forța tangențială de antrenare (frecare) \bar{T} (T_0 ; T_v).

Aceste două forțe determină reacțiuni care solicită cilindrul, astfel:

la încovoiere: $\bar{F}_{inc} = -\bar{N}$ (determinată de forța radială de apăsare);

la torsiune: $M_{tors} = F_{tors} b$, unde b - brațul forței

$\bar{F}_{tors} = -\bar{T}$ (determinată de forța tangențială de antrenare).

Suplimentar, cilindrul este solicitat la uzură, datorită frecării cu semifabricatul în vederea antrenării acestuia.

În consecință, materialul folosit pentru confecționarea cilindrilor de laminare trebuie să aibă o duritate ridicată și, de asemenea, o tenacitate (a miezului) și rezistență la uzură bune. [1][2][52][54].

2.1.2. - Proprietăți ale oțelurilor pentru confecționarea cilindrilor de laminor și criteriile de alegere a acestora

Alegerea materialului pentru cilindri de laminare pune în balanță atât solicitările proprii procesului de laminare în cauză, cât și caracteristicile materialelor utilizate.

Grupele de materiale folosite pentru confecționarea cilindrilor din oțel sunt următoarele: [3][4][5][6][7][11][52]

a) Oțel turnat, nealiat sau aliat cu Cr, Ni, Mo, de structură hipoeutectoidă, eutectoidă sau hipereutectoidă. Ultimele pot avea peste 2% C și, în stare aliată, poartă denumirea de adămit. Creșterea conținutului de carbon în gama de structuri se traduce prin scăderea rezistenței mecanice și alungirii, respectiv prin creșterea durtății, deci a rezistenței la uzură și prin micșorarea susceptibilității de ardere a materialului.

Oțelurile hipoeutectoide se utilizează la laminarea grosieră cu reduceri mari pe trecere, iar oțelurile eutectoide și hipereutectoide - în cazul unor eforturi mai mici de laminare, dar în condițiile unei productivități ridicate și cerinței pentru calitate superioară a suprafeței. Oțelurile eutectoide și parțial hipereutectoide pot fi combinate în sistem duplex cu oțeluri mai moi, pentru miezul cilindrilor. Se practică tratamentul termic de îmbunătățire a stratului exterior al cilindrilor din oțel eutectoid.

b) Oțel forjat, nealiat sau aliat cu Cr, Ni, Mo, de structură hipoeutectoidă, eutectoidă sau ușor hipereutectoidă. Oțelul forjat se caracterizează prin tenacitate

superioară, ceea ce, în stare hipoeutectoidă, permite utilizarea în solicitări ridicate de degrosare. În stare eutectoidă, se execută îmbunătățirea care conferă, în plus, rezistență superioară la uzură.

O aplicație importantă a acestui material este laminarea la rece, domeniu în care se poate folosi, în unele cazuri care impun solicitări mai mari ale cilindrilor, și oțel de rulment.

Pentru creșterea durtății se execută călirea în aer sau apă sau dubla călire.

Cilindrii din această grupă se toarnă, uneori, duplex, miezul fiind din oțel moale sau fontă cenușie. De asemenea, se realizează cilindri cu cămașă forjată, fretată sau presată pe ax, utilizați ca cilindri de sprijin sau în laminarea degrositoare la cald.

Cilindrii din oțel forjat sunt, datorită prelucrării respective, mai scumpi decât cilindrii din oțel turnat.

În tabelul 2.1.2.1., este redată compoziția chimică a materialelor reprezentative din fiecare grupă - [3][4][5]

Nr. Crt	C	Mn	Si	P _{max}	S _{max}	Cr	Ni	Mo	Ti
a) Oțel turnat									
1.	0,55-0,65	0,5-0,8	0,17-0,37	0,04	0,04	0,6-0,9	1-1,5	-	-
2.	0,6-0,7	0,6-0,8	0,3-0,5	0,05	0,05	0,5-0,7	max 0,5	0,2-0,3	-
3.	0,55-0,65	0,81-1	0,17-0,37	0,04	0,04	1-1,3	max.0,4	-	-
4.	0,8-0,95	0,25-0,35	0,25-0,45	0,04	0,04	1,4-1,7	-	-	-
5.	0,9-1	0,7-0,9	0,3-0,4	0,05	0,05	Max.1	-	-	-
6.	1,5-1,65	0,4-0,55	0,5-0,65	0,05	0,05	Max.1	-	-	-
7.	1,8-2	0,6-0,9	0,6-0,9	0,04	0,04	0,9-1,1	1,5-1,8	0,3-0,5	-
b) Oțel forjat									
8.	0,32-0,4	0,5-0,8	0,17-0,37	0,035	0,035	-	-	-	-
9.	0,45-0,55	0,5-0,8	0,2-0,35	0,035	0,035	0,45-0,65	-	-	-
10.	0,55-0,65	0,5-0,8	0,2-0,35	0,035	0,035	0,45-0,65	-	-	-
11.	0,65-0,75	0,9-1,1	0,25-0,4	0,035	0,035	0,9-1,2	-	-	-
12.	0,8-0,9	0,25-0,5	0,15-0,35	0,035	0,035	1,5-2	-	0,15-0,25	-
13.	0,75-0,9	0,5-0,8	0,2-0,3	0,035	0,035	1,5-1,75	-	max.0,35	-
14.	0,8-0,9	1,8-2,3	0,6-0,8	0,035	0,035	0,3-0,4	-	-	0,08-0,15
15.	1-1,1	0,3-0,5	0,2-0,7	0,035	0,035	1-1,3	-	-	-
16.	0,6-0,75	0,3-0,65	0,2-0,45	0,05	0,04	1,7-2,2	0,5-1	0,5-0,9	-
17.	0,85-0,95	0,25-0,35	0,5-0,7	0,05	0,05	Max.3	-	max.0,35	-
18.	0,9-1	0,3-0,4	0,25-0,35	0,05	0,05	2,3-2,5	-	-	max.0,8

Nr. Crt	C	Mn	Si	P _{max}	S _{max}	Cr	Ni	Mo	Ti
19.	0,6-0,7	0,35-0,45	0,8-1	0,05	0,05	5-5,5	-	1,2-1,4	max.0,4
20.	1,5-1,7	0,25-0,35	0,25-0,35	0,05	0,05	11,5-12,5	-	0,8-1	max.1,1
21.	2,1-2,4	0,3-0,4	0,4-0,5	0,05	0,04	12-13	-	-	-
22.	0,8-0,9	0,2-0,3	0,2-0,3	0,05	0,04	3,5-4,5	max.1,6	max.0,8	max.1,1
23.	0,9-1	0,9-1	0,3-0,4	0,05	0,04	1,6-1,8	-	-	-

Tabel 2.1.2.1. - Compoziția chimică a materialelor reprezentative pentru cilindrii de laminoare din oțel

În tabelul 2.1.2.2., este redat domeniul de utilizare a cilindrilor de laminare, precum și câteva caracteristici mecanice și geometrice ale acestora.

Tipul laminorului tipul cajei	Material cilindri (vezi nr.crt.din tab.2.1.2.1.)	Duritate Shore C	R _{max} DaN/mm ²	Diametrul nominal mm	Lungimea tăbliei mm
Slebing	oțel turnat				
	-slab aliat (1,2)	30-36	63-71	cilindru orizontal 1100-1400	2100-2800
	-mediu aliat (3,4)	30-47	71-79		
	-hipereutectoid(5,6,7)	37-52	63-71		
	oțel forjat			cilindru vertical 900-1100	1900-3000
-nealiat,slab aliat(8,9)	30-40	60-75			
-aliat eutectoid(10,11)	30-47	65-80			
Bluming	Idem Slebing			850-1350	1900-3400
Laminor de țagle Caje pregătitoare și intermediare tren I Caje finisoare tren II Cajă reversibilă	oțel turnat și oțel forjat.			700-950	900-1200
	Idem Slebing cu duritate superioară			800-950	1200-2000
	oțel turnat aliat hipereutectoid (5,6,7)	37-52	63-71	450-700	700-1000
	oțel forjat eutectoid și hipereutectoid (11-15)	45-55	60-75	700-850	1000-1800
Laminor de profile grele Caje degrosisoare	Idem caje pregătitoare și intermediare la			750-1050 600-1050	1800-2500 1800-2500

Tipul laminorului tipul cajei	Material cilindri (vezi nr.crt.din tab.2.1.2.1.)	Duritate Shore C	R _{max} DaN/mm ²	Diametrul nominal mm	Lungimea tăbliei mm
	laminoare țagle				
Caje intermediare Caje finisoare	oțel aliat turnat hipereutectoid(5,6,7) Idem caje finisoare la laminoare de țagle	37-52	63-71	600-950	max.2200
Laminor de profile mijlocii și ușoare și sârmă Caje pregătitoare și intermediare Caje finisoare	Idem caje pregătitoare și intermediare la laminor de țagle oțel turnat aliat (4,5,6)			330-500 270-500	600-1250 400-850
Laminor de tablă groasă Caje degrositoare: cilindri de lucru cilindri de sprijin Caje finisoare: cilindri de lucru cilindri de sprijin	oțel turnat mediu aliat(3,4) oțel forjat eutectoid și hipereutectoid (11-15) oțel turnat și forjat Idem caje degrositoare Idem caje degrositoare Idem caje degrositoare	46-52 45-65	71-79 65-80	800-1200 1800-2200 1800-2200	max.5350 max.5350 max.4850
Laminor bandă la cald Caje desțunderizare:	oțel turnat slab aliat (1,2)	30-36	63-71		

63.04

36.8

Tipul laminorului tipul cajei	Material cilindri (vezi nr.crt.din tab.2.1.2.1.)	Duritate Shore C	R _{max} DaN/mm ²	Diametrul nominal mm	Lungimea tăbliei mm
cilindri verticali	oțel turnat slab aliat (1,2) și hipereutectoid (5,6,7)	30-36	63-71	1000-1200	max.450
		37-52	63-71		
Caje degrositoare: cilindri de lucru cilindri de sprijin	Idem caje degrositoare Re pentru laminoare de tablă groasă			800-1250	max.2700
Caje finisoare: cilindri de lucru				1200-1700	max.2700
cilindri de sprijin	oțel turnat mediu aliat (3,4) și hipereutectoid (5,6)	46-52	71-79	1200-1700	max.2700
		46-75	63-71		
Caje Steckel: cilindri de sprijin	oțel turnat aliat eutectoid și hipereutectoid (4,5,6,7)	45-65	65-75	850-1350	max.1500
Caje planetare: cilindri de lucru cilindri de sprijin	oțel forjat aliat eutectoid (12,13) Idem caje Steckel	60-85	70-80	75-200	max.1500
Laminor bandă la rece Caje cuarto: cilindri de lucru	oțel forjat aliat eutectoid și hipereutectoid (12,13,14,18)	72-100	75-90	1250-1870	max.3300
cilindri de sprijin					

Tipul laminorului tipul cajei	Material cilindri (vezi nr.crt.din tab.2.1.2.1.)	Duritate Shore C	R _{max} DaN/mm ²	Diametrul nominal mm	Lungimea tăbliei mm
Caje de dresare: cilindri de lucru	(13,14,15) oțel forjat aliat eutectoid (12) oțel forjat aliat hipereutectoid (15)	65-75 72-100 79-85	70-85 75-90 22-30	duo 600-1050 400-600	max.2250 max.2200
Caje Sendzimir: cilindri de lucru	oțel forjat aliat eutectoid și hipereutectoid (20,21,22)			30-90	max.1600
cilindri intermediari	oțel forjat aliat eutectoid și hipereutectoid (18,19)	100	80-95	80-300	max.1600
cilindri de sprijin	oțel forjat (13,14,15)	65-75	70-85	300-430	
Laminoare de țevi					
Caje perforatoare	oțel aliat turnat sau forjat (4,5,11-15)	35-65	63-85	600-1300	400-750
Tren continuu	oțel aliat turnat hipereutectoid (5,6,7)	37-52	63-71	450-600	200-300
Tren reductor - alungitor	Idem tren continuu		-	280-500	100-250
Caje Pilger la cald	oțel aliat forjat eutectoid (16)	45-65	65-80	200-1250	150-850
Caje Pilger la rece	oțel aliat forjat hipereutectoid (23)	85-100	75-90	300-1250	100-500
Banc împingător (role)	oțel forjat aliat hipereutectoid și eutectoid (10,11)	30-47	65-80	150-300	75-200

2.2. Tehnologii de prelucrare a cilindrilor de laminor din oțel

2.2.1. Clasificare

Tehnologiile folosite în cadrul etapelor de fabricație a cilindrilor de laminor pot fi clasificate în tehnologii de elaborare-turnare, de forjare, de prelucrare dimensională (eboșare, finisare, rectificare), în toleranțele desenelor de execuție oficializate, respectiv de tratament termic (propriu-zis). [3][4][52][54]

Pe de altă parte, clasificarea cilindrilor de laminor din oțel poate fi efectuată și după tipul laminării, respectiv în cilindri pentru laminare la cald și cilindri pentru laminare la rece, aceștia din urmă fiind confecționați exclusiv din oțel forjat. [3][4][52][54][81]

2.2.2. Etape tehnologice și parametri în vederea realizării procesului de forjare

Standardele de ramură și documentația existentă acordă o atenție sporită tehnologiei de forjare a oțelurilor (aliate) pentru cilindri destinați laminării la rece, domeniu în care acestora li se impun caracteristici fizico-chimice și mecanice superioare.

Etapa de elaborare-turnare presupune tratarea în vid (metoda RH - pentru clasele de duritate 1,2,3, respectiv metoda VAD - pentru clasele de duritate 4,5,6), cu utilizarea unui cuptor electric bazic cu arc (50 t), respectiv turnarea indirectă, la sifon, în lingou.

În vederea realizării etapei de forjare, se aplică următoarea tehnologie: [3][4][6][7][41][52][54]

a) Pregătirea semifabricatului (cilindrului) pentru forjare:

În scopul eliminării tuturor tensiunilor interne și omogenizării durității, semifabricatul se supune unui tratament termic de recoacere subcritică, astfel:

- cuptorul de tratament termic se încălzește la 400°C ;
- se introduce cilindrul în cuptor, menținându-se timp de o oră focurile stinse;
- se aprind arzătoarele pentru încălzirea cilindrului în intervalul de temperatură $650-670^{\circ}\text{C}$;
- se realizează o menținere pentru omogenizare de 12 ore;
- în cazul când tratamentul termic nu se efectuează în secția forjă, cilindrul se răcește în cuptor până la $350-400^{\circ}\text{C}$, apoi liber, până la temperatura mediului ambiant;
- în cazul când tratamentul termic se efectuează în secția forjă, cilindrul se introduce în cuptorul de încălzire pentru prelucrarea la cald;

b) Forjarea cilindrului:

Se impune respectarea următorilor parametri: [3][4][6][52][54]

- temperatura începutului de deformare (spre exemplu, pentru oțelul aliat 90VMoC15, aceasta este $1150-1180^{\circ}\text{C}$);
- temperatura de sfârșit de deformare (pentru oțelul aliat 90VMoC15: $800-850^{\circ}\text{C}$);
- după forjare, se aplică o răcire lentă pentru prevenirea formării fulgilor.

Cilindrii vor fi forjați la presă cu o utilizare a lingoului în proporție de 55-58%, asigurându-se un coroaiaj de minim 3.

Încălzirea cilindrului pentru forjare se realizează astfel:

b.1. Pentru forjare în stare caldă (de la 600⁰C):

Parametrii principali ai regimului de încălzire sunt următorii:

- încălzire până la 800⁰C, cu 100⁰C/oră, urmată de o încălzire până la temperatura începutului de deformare, cu 150⁰C/oră;
- menținere pentru omogenizare, timp de 5 ore;
- când temperatura materialului a ajuns la 800⁰C, semifabricatul se introduce din nou în cuptorul pentru încălzire;

b.2. Pentru forjare în stare “rece”:

În vederea încălzirii cilindrului pentru forjare până la temperatura începutului de deformare, se efectuează, în prealabil, operația de preîncălzire până la 800⁰C, într-un cuptor anume destinat acestei operații. Modul de încălzire este asemănător celui prezentat la subpunctul a), iar atunci când temperatura cilindrului a ajuns la 800⁰C, acesta se introduce în cuptorul de încălzire pentru forjare. În continuare, regimul de încălzire este identic celui prezentat la subpunctul b.1. [3][4][6]

Repetatele încălziri ale oțelului până la temperatura începutului de deformare și deformările suferite la forjare conduc la o structură grosolană a oțelului, cu proprietăți fizico-mecanice scăzute, fapt ce impune - în cadrul următoarei etape de fabricație - efectuarea unui tratament termic primar, obligatoriu pentru refacerea structurii, eliminarea tensiunilor interne și îmbunătățirea prelucrabilității prin așchiere. [3][4][6][24][66]

2.2.3. Tehnologii specializate de prelucrare a cilindrilor de laminor din oțel, pentru laminare la rece

Pentru cilindrii de laminor destinați deformării plastice la rece, se utilizează, cu precădere, oțelul aliat de scule de deformare 90VMoC15, caracterizat prin rezistență la uzură și tenacitate bune, dar și VMoC120, respectiv VWC62, atunci când se cere tenacitate ridicată. [3][6][52][54][81]

Acești cilindri sunt organe de mașini greu solicitate, fiind definiți ca cilindri obținuți din oțel vidat RH prin forjare, triplu tratați termic (primar, îmbunătățire și de suprafață), în exploatare normală ei trebuind să prezinte o duritate ridicată în stratul activ, pentru a asigura o uzură cât mai bună (mică), o rezistență și tenacitate optime în miez și fus, toate aceste proprietăți în condiția unei integrități avansate de material și a unor minime tensiuni reziduale. Oțelul - în strat activ, călit de suprafață - trebuie să prezinte o structură foarte fină, formată din structuri succesive de martensită, martensită + bainită, bainită + perlită, perlită + carburi, la un conținut de maxim 8-10% austenită reziduală.

În principiu, la nivelul țării noastre, S.C."IMGB" S.A. București, în actuala dotare, poate fabrica cilindri - în această variantă - la performanțele mașinii de călit a stratului de suprafață ELPHIAC - MTCL18 (singura la nivelul țării), după cum urmează: [3][52][54]

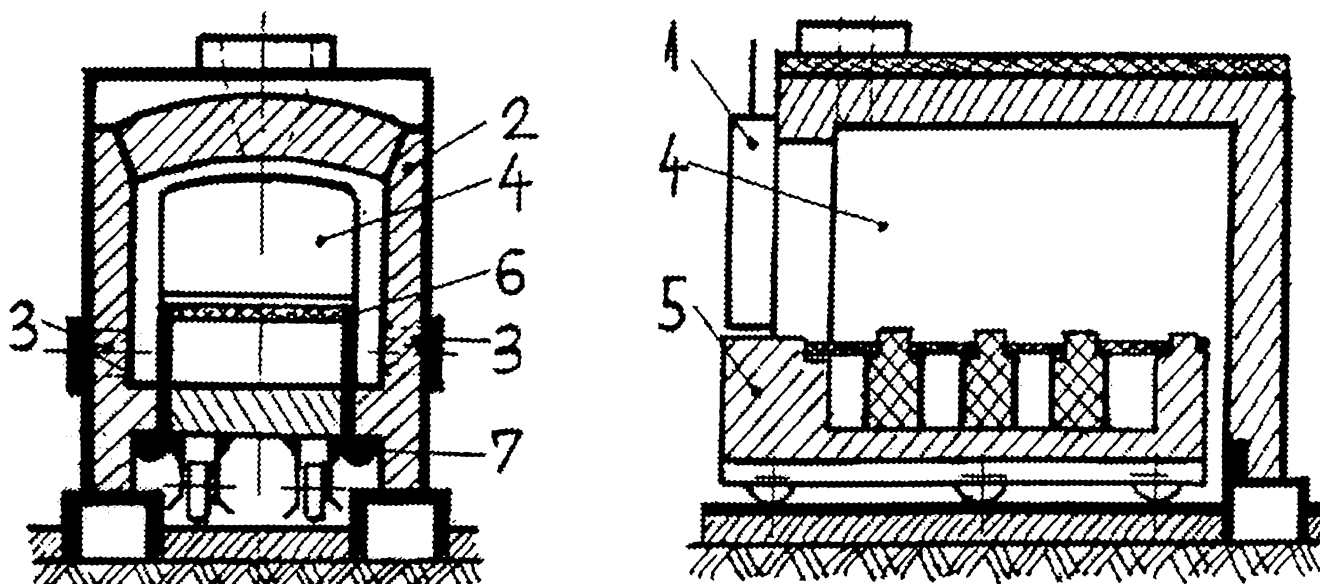
- diametrul tăbliei - $D=200-800$ mm;
- lungimea tăbliei - $l = \max.2700$ mm;
- lungimea totală - $L = \max.5250$ mm;
- masa totală - $G = \max.18$ t.

După etapa de forjare, cilindrilor de laminor pentru laminarea la rece li se aplică, în cadrul tratamentului termic primar (utilizându-se un cuptor orizontal cu vatră mobilă, prezentat schematic în fig.2.2.3.1.), tratamentul de normalizare care

asigură o finisare a structurii (distruge rețeaua de carburi) și ameliorarea caracteristicilor mecanice. Pentru oțelurile aliate, întrucât, de regulă, duritatea după normalizare este prea mare, se poate aplica și o revenire înaltă, inclusiv cu rol de îmbunătățire a prelucrabilității prin așchiere, pe seama globulizării cementitei perlitice, precum și de mărire a stabilității dimensionale în timpul tratamentului termic secundar. [3][6][24][52]

Regimul termic pentru normalizare și revenirea înaltă se determină funcție de calitatea oțelului și dimensiunile cilindrilor și constă în:

- încălzire la aprox. 950°C ;
- menținere pentru omogenizare timp de 10 ore, plus câte o oră pentru fiecare 100 mm diametru;
- răcire dispersată a cilindrilor sub jet de aer.



1 - ușa cuptorului; 2 - zidărie refractară; 3 - locaș injectoare; 4 - camera cuptorului; 5 - cărucior; 6 - vatra cuptorului; 7 - jgheab cu nisip pentru etanșare.

Fig.2.2.3.1. - Schema unui cuptor tip cameră cu vatră orizontală mobilă,
7 utilizat la tratamentul termic primar al cilindrilor

În cazul aplicării unei reveniri înalte, se efectuează o încălzire la 550-650⁰C, cu menținere timp de aprox.10 ore și răcire lentă.

În cadrul tratamentului termic primar, se realizează, după normalizare, respectiv după răcirea în aer a cilindrilor până la 350⁰C și menținerea timp de 8-10 ore la această temperatură, o recoacere de înmuiere cu dehidrogenare, întrucât hidrogenul, în cantitate prea mare, datorită faptului că se combină cu oxizii metalici, reacționează la temperaturi înalte, făcând oțelul casant. Regimul termic constă într-o încălzire la 690-710⁰C și menținerea la această temperatură un timp ce depinde de concentrația de hidrogen, după relația $t = 92F$, unde F este un factor de corecție a cărui valoare e dată în tabelul 2.2.3.1.: [3][6][52][54]

Conținut hidrogen cm/100 gr	<2,5	<2,75	<3	<3,25	<3,5	<3,75	<4	<4,25	<4,5	<4,75	<5
Factor F	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

După această etapă a tratamentului termic primar, se realizează și o recoacere de globulizare, eventual în două etape, prin încălzirea cilindrilor la 780-840⁰C, menținere la această temperatură un timp de șase ore, plus câte o oră pentru fiecare 100 mm diametru și răcire în cuptor oprit, până la 150⁰C, apoi în aer.

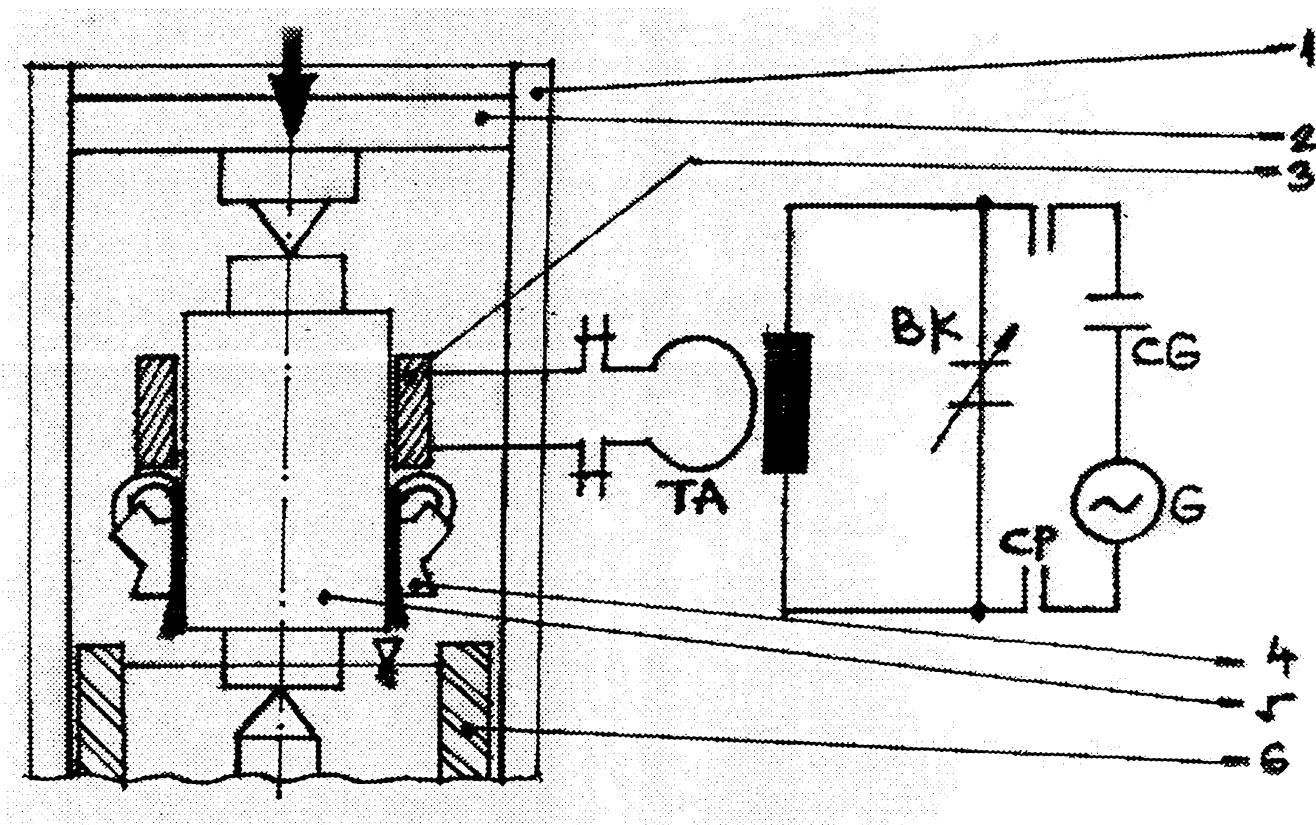
După eboșare (etapă pentru care se utilizează strunguri speciale pentru cilindri de laminor), se efectuează un tratament termic secundar de îmbunătățire, utilizându-se cuptoare electrice verticale îngropate în solul atelierului și deservite cu ajutorul podurilor rulante. Tratamentul termic constă dintr-o călire în masă, cu încălzire la 840-860⁰C, menținerea timp de o oră pentru fiecare 100 mm diametru și răcirea în ulei agitat, urmată de una până la trei reveniri înalte, realizate prin încălzire la 500-570⁰C, cu menținere timp de două ore pentru fiecare 100 mm diametru și răcire în cuptor până la 300⁰C, respectiv în aer. [3][24][54]

După finisare (etapă pentru care se utilizează, de asemenea, strunguri speciale pentru cilindri de laminor), se efectuează tratamentul termic de durificare a tăbliei cilindrilor, care constă într-o preîncălzire la 300⁰C, cu menținere timp de 3-4 ore pentru fiecare 100 mm diametru, urmată de călirea de suprafață propriu-zisă, cu încălzire prin inducție electromagnetică în bifrecvență (50 și 250 Hz), la temperatura de 870-920⁰C și răcire bruscă, în duș și bazin cu apă.

Cu toate că, în prezent, în România nu se realizează, se recomandă - pentru cilindrii din clasele de duritate 4,5 și 6, când se impune un conținut de austenită reziduală sub 8-10% - și un tratament termic sub 0⁰C (la - 70⁰C), cu menținere de minim șase ore la această temperatură (minim 38 de ore, în total sub 0⁰C).
[3][6][24][52]

În final, se aplică o revenire joasă, cu încălzire la 120-160⁰C și menținere timp de 4-8 ore pentru fiecare 100 mm diametru și răcire în cuptor (aer), scopul fiind reducerea sau eliminarea tensiunilor și fragilității, îmbunătățirea tenacității, menținerea unei durități ridicate și a unei rezistențe la uzură și oboseală mari.
[3][6][24][54][81]

Instalația pentru călirea de suprafață a cilindrilor de laminor (ELPHIAC - MTCL18) , aflată în cadrul S.C."IMGB" SA București, a cărei schemă de principiu este prezentată în fig.2.2.3.2., realizează o călire succesivă a cilindrilor pe verticală, inductorul fiind fix, iar cilindrul - centrat între vârfuri - deplasat pe verticală, prin intermediul traversei superioare acționate printr-un sistem hidraulic. [3][6][8][15]
[53]



- sistem de ghidare pe verticală; 2 - traversă superioară; 3 - inductor circular; 4 - inel cu orificii pentru răcire sub duș; 5 - cilindru de laminor; 6- bazin cu apă; G - generator de frecvență; CG - condensator serie al generatorului; CP - contactor principal dublu; BK - baterie de condensatori; TA - transformator de adaptare

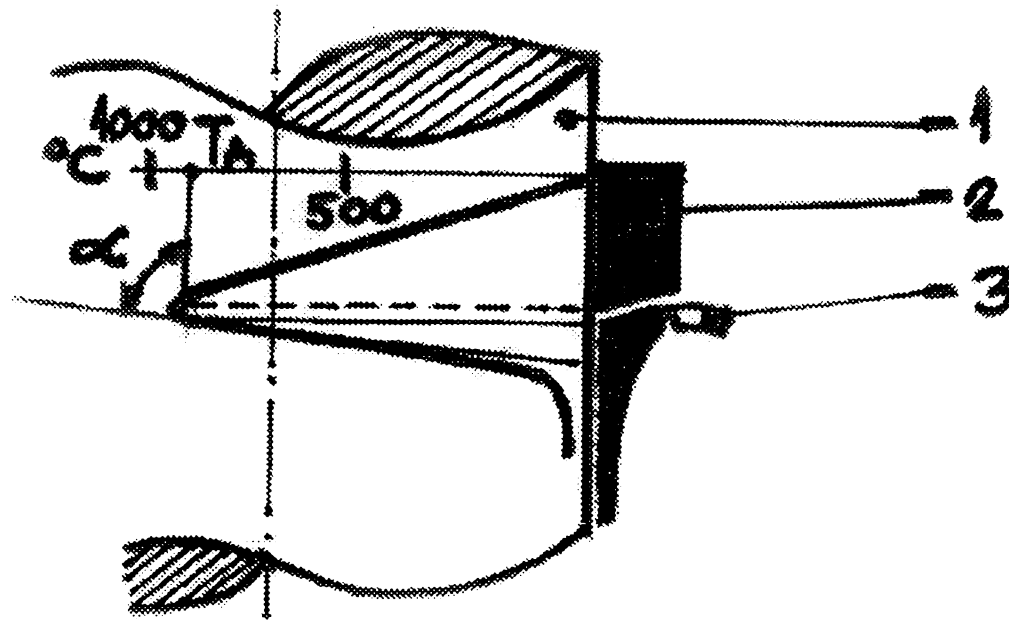
Fig. 2.2.3.2. - Schema de principiu a instalației pentru călirea de suprafață a cilindrilor de laminor

Pentru realizarea unei încălziri omogene pe întreaga suprafață a cilindrului, la nivelul instalațiilor similare din străinătate (Rusia, Germania), se asigură, în plus, o rotire a acestuia cu 10-30 rot/min. Inductorul se construiește cu cât mai multe spire, pentru a obține o repartizare cât mai corectă a temperaturii pe zona de încălzire, el fiind răcit într-un circuit continuu de apă. Sub inductor se află dispozitivul care

proiectează jetul de apă de răcire pentru călire. Încălzirea prin inducție electromagnetică are la bază fenomenul de inducție magnetică și efect pelicular, potrivit căruia, în piesa de călit introdusă într-un câmp magnetic de flux variabil, se induce o tensiune electrică distribuită doar în straturile periferice ale piesei. Efectul Joule - ce apare sub acțiunea curentului indus - duce la încălzirea peste punctele critice de transformare, într-un timp scurt. Factorii care determină adâncimea de pătrundere a călirii și duritatea de suprafață sunt: puterea utilă a generatorului, frecvența, jocul dintre inductor și cilindru, rezistivitatea electrică și permeabilitatea magnetică a materialului din care este executat cilindrul, viteza de deplasare a cilindrului față de inductor și calitatea răcirii. [3][6][24][53]

La călirea cilindrilor de laminor, răcirea prezintă o importanță deosebită. În cazul inexistenței bazinului de răcire, dușul cu apă de răcire a zonei cilindrului încălzită de inductor trebuie construit astfel, încât să împiedice stropirea apei, să asigure scurgerea ei pe suprafața călită și să realizeze o răcire până la 80-50⁰C, în toată masa cilindrului, necesară împiedicării “întoarcerii” de căldură din straturile interioare spre stratul de suprafață călit. Trecerea treptată de la zona rece până la temperatura de călire se face prin calcularea exactă a parametrilor de care depinde încălzirea.

Sub influența inductorului, temperatura crește până la temperatura de austenizare, sistemul de răcire calculându-se astfel, încât trecerea de la această temperatură la zona rece de sub duș să fie cât mai bruscă posibil, pentru obținerea unei durități maxime (aspect prezentat schematic în figura 2.2.3.3., cu următoarea precizare: cu cât tangenta unghiului α este mai mare, cu atât se realizează mai bine această condiție și se evită pericolul supraîncălzirii) [3][16][53][54]



1. Cilindru de laminor

2. Inductor

3. Duș

T_A - temperatura de austenitizare

Fig.2.2.3.3. - Schema de răcire sub duș a cilindrului de laminor

Viteza de avans care, de asemenea, influențează adâncimea de pătrundere a călirii, variază de la circa 0,2 la 1,2 mm/sec, pentru cilindri mari, respectiv până la câțiva mm/sec la cilindrii mici.

Instalația ELPHIAC - MTCL18, fiind prevăzută doar cu două trepte de frecvență (50 și 250 Hz), asigură o adâncime de călire - în principal, funcție de diametrul cilindrilor, teoretică de până la 20 mm (practic, realizându-se adâncimi de călire de max.10-12 mm)

Diagrama de variația a durității, în urma călirii de suprafață a cilindrilor din oțel forjat pentru laminare la rece, este prezentată în fig.2.2.3.4.

Funcție de domeniul de utilizare, trebuie asigurate cilindrilor de laminor condițiile impuse de duritate, furnizorul garantând variația durității în profunzimea cilindrilor, limita de curgere, rezistența la tracțiune, stricțiune, reziliența.

Compoziția chimică a celui mai utilizat oțel pentru cilindrii de laminare la rece, 90VMoC15, este următoarea:

C: 0,85 - 0,95%; Cr: 1,4 - 1,7%; Si: 0,25-0,45%; Mn: 0,25-0,35%; Mo:0,2-0,3%; V: 0,1-0,2%; P_{max} : 0,03%; S_{max} : 0,03%; Ni_{max} : 0,3%; Cu_{max} : 0,2%; suma - max 3% (este necesară o duritate de 63,66 HRC, în stratul de suprafață al tăbliei cilindricului).

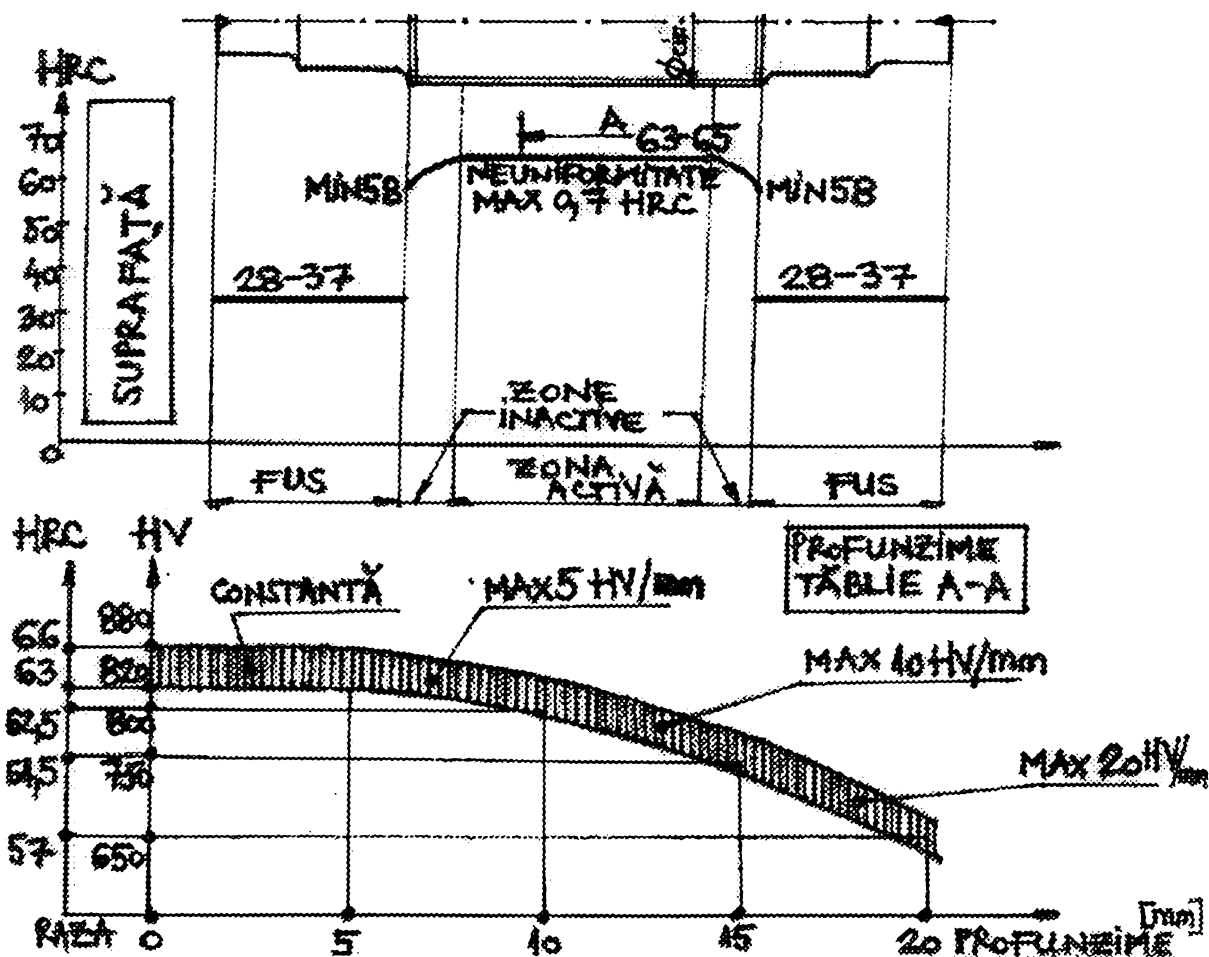


Fig.2.2.3.4. - Diagrama de variație a durității în urma călirii de suprafață a cilindrilor din oțel forjat pentru laminarea la rece

Macroscopic, oțelul nu trebuie să prezinte defecte vizibile cu ochiul liber la fus și cu lupa la tăblie, de genul urme de retasură, porozități, crăpături, sufluri, fulgi, incluziuni nemetalice sau o segregatie puternică.

Microscopic, oțelul în stare recoaptă trebuie să prezinte o structură perlitică cu carburi globulare uniform distribuite. În stare îmbunătățită, acesta trebuie să prezinte o structură uniformă și fină, formată din bainită + perlită + carburi, ajungând în centrul piesei la perlită + carburi.

Oțelul, în strat activ (călit în stratul de suprafață), trebuie să prezinte o structură foarte fină formată din structuri succesive de martensită, martensită + bainită, bainită + perlită, perlită + carburi, la un conținut de max.8-10% austenită reziduală.
[3][6][52][54]

Pe lângă condițiile impuse materialului, respectiv microstructura, se impun cilindrilor anumite condiții de exploatare, precum și un nivel calitativ prescris.

În cadrul condițiilor normale de exploatare, se are în vedere ca manipulările și lucrul în cajă să nu conducă la șocuri, alunecări, blocări sau loviri locale, deosebite de cele normale procesului tehnologic de laminare. De asemenea, se are în vedere ca rectificările dintre campaniile de lucru să fie efectuate în regim de prelucrare adecvat și controlat, pentru a se evita supraîncălziri locale, implicit producerea unor fisuri de rectificare care, în regim de lucru, se dezvoltă rapid, finalizând prin exfolieri.

Fiecare cilindru se urmărește în exploatare și în recondiționarea prin rectificare cu fișa de urmărire proprie. [3][4][5][6][28][81]

Nivelul calitativ prescris al cilindrilor pentru laminare la rece presupune, pe lângă cerințele privind microstructura, cerințe de forme, dimensiuni, abateri limită, cerințe privind duritatea și stratul activ.

Forma geometrică, dimensiunile și abaterile limită la dimensiunile cilindrilor pentru laminare la rece, în stare finită, corespund desenelor beneficiarului și

condițiilor tehnice prevăzute în contract. Din motive tehnologice generate de adausurile necesare durificării tăbliei, se admite ca abaterile limită ale diametrului tăbliei față de diametrul nominal să fie conform tabelului 2.2.3.2.: [3][6][54]

Diametrul nominal D_n mm		250-350	351-499	500-650	651-800
Abatere admisă față de D_n	mm	+ 2; - 1	+ 2; - 1	+ 3; - 2	+ 3...4; - 2
	% $D_n (R_n)$	+/- 0,8...0,6	+/- 0,6...0,5	+/- 0,6...0,5	+/- 0,5...0,4
Diametrul de livrare D_l mm	max	252-352	353-501	503-653	654-804
	min	249-349	350-498	498-648	649-798
Adaus tehn. față de D_n	mm	4	5	6	6
	% $D_n (R_n)$	1,6-1,2	1,2-1,0	1,2-1,0	1,0
Diametrul D_{tmax}	tehnologic mm	254-354	356-504	506-656	657-806
Maxim	($D_{CIF} - D_l$)	5	5	6	7

Cilindrii pentru laminarea la rece se execută în șase clase de duritate, în funcție de caracteristica cajei de lucru, produsul care se laminează, caracteristicile geometrice ale tăbliei, conform tabelului 2.2.3.3.: [3][52][54]

Clasa		1	2	3	4	5	6	
Caracteristici duritate table	Duritate medie HV (HRC)	570 (53)	710 (59)	770 (62,5)	810 (64)	850 (65,5)	890 (66,5)	
	Limită Clasă	+/- HV	+/- 30	+/- 30	+/- 20	+/- 20	+/- 20	+/- 20
		HV min	540	680	750	790	830	870
		HV max	600	740	790	830	870	910
	Variație Pe	duritate generat.	+/- 15	+/- 15	+/- 10	+/- 10	+/- 10	+/- 10
	Ecart Duritate	ΔHV_G	+/- 15	+/- 15	+/- 12	+/- 10	+/- 10	+/- 10
ΔHV_T		+/- 12	+/- 12	+/- 10	+/- 8	+/- 8	+/- 8	
FUS	Duritate med.HV	320	320	320	320	320	320	
	+/- HV	+/- 40	+/- 40	+/- 40	+/- 40	+/- 40	+/- 40	
	HV min HV max	280-360	280-360	280-360	280-360	280-360	280-360	
în al	Austenită reziduală durificat Stratul Tăbliei	Nu este cazul	12-16%	12-16%	< 10%	< 10%		

La solicitarea beneficiarului, cilindrii de sprijin se pot livra și cu valori de duritate mai scăzute decât cele prezentate pentru clasa 1.

Funcție de diametrul nominal și clasa de duritate în care se încadrează cilindrul pentru laminare la rece, prin tratamentul de durificare a tăbliei, se asigură următoarele adâncimi minime de strat activ (tabelul 2.2.3.4.):

		Diametrul nominal D_n (mm)			
		250-350	351-499	500-650	650-800
Strat activ	% D_n (R_n)	8-7,5	7,5-7	7-6	6-5
	Adâncime min (mm)	10-13,2	13,2-17,5	17,5-20	20

Duritatea minimă la limita stratului activ, în funcție de clasa de duritate, este prezentată în tabelul 2.2.3.5.:

Clasa de duritate	1	2	3	4	5	6
HV mediu	570+/- 30	710+/- 30	770+/- 20	810+/- 20	850+/- 20	890+/- 20
HV min strat activ	505+/- 30	628+/- 30	671+/- 20	694+/- 20	717+/- 20	757+/- 20
Cădere	65	82	99	116	133	133

Variația durității în stratul activ (reprezentată grafic în figura 2.2.3.4.) este următoarea: [3][6][24][52][54]

HV constantă 0-5 mm de la suprafață;

max 5HV/mm..... 5-10 mm de la suprafață;

5-10HV/mm..... 10-15 mm de la suprafață;

20 HV/mm..... peste 20 mm de la suprafață.

Controlul cilindrilor de laminor presupune atât controlul interfazic, ultrasonic, după tratamentul termic primar, respectiv secundar, cât și un control final care vizează aspectul, dimensiunile, duritatea și integritatea cilindrilor. [3][6][14][24][26][27][52][56][81]

Controlul aspectului se efectuează pe fiecare cilindru, cu ochiul liber în regiunea fusurilor și cu lupa - în zona tăbliei. Pentru controlul structurii, se recurge la operații de control distructiv, aplicându-se metoda replicilor, respectiv secționarea pieselor de probă și studierea secțiunilor la microscopul metalografic.

Controlul dimensional al cilindrilor trebuie să se încadreze în cotele, toleranțele și rugozitățile prevăzute în desenele de livrare. La recepție, se folosesc instrumente universale de măsurat (verificate metrologic).

Controlul analizei chimice a oțelului se efectuează pe fiecare șarjă de elaborare, prin probe luate la turnare, valorile obținute trebuind să se încadreze în limitele prevăzute. Față de limitele prescrise, se are în vedere ca abaterile să nu depășească următoarele corecții: la C - realizarea limitei inferioare, la Mn, Mo - se poate aplica o corecție la 0,05%, la Cr - se poate aplica o corecție de 0,1%.

Controlul caracteristicilor mecanice se efectuează prin determinarea durițăților atât pe tăblie, pe trei generatoare dispuse la 120 grade, în minim cinci puncte echidistante pe fiecare generatoare, cât și la fusuri.

Controlul integrității cilindrilor se efectuează prin metode nedistructive, respectiv ultrasonic, cu lichide penetrante sau endoscopic. Controlul ultrasonic se realizează cu unde longitudinale, unde transversale la 90 grade, 60 grade și 45 grade, precum și cu unde de suprafață 3-5 mm/rază.

2.2.4. Tehnologii specializate de prelucrare a cilindrilor de laminor din oțel pentru laminare la cald

Pentru cilindrii de laminor destinați deformării plastice la cald, se utilizează, cu precădere, mărcile de oțeluri aliate redate în tabelul 2.2.4.1. [4][5][6][24][52][54][81]

Cilindrii de laminare la cald se execută în următoarele plaje de caracteristici: [4][5][6][20][52]

diametrul tăbliei: $D = 350-1500$ mm

lungimea tăbliei: $l = 350-3300$ mm

lungimea totală: $L = 450 - 7000$ mm

masa totală: $G = 2-50$ t.

Marca de oțel	Procente (%)									
	C	Si	Mn	P	S	Mo	V	Cr	Ni	Obs
55VmoC12	0,5	0,2	0,35	max	max	0,3	0,1	1,0	max	Cu
	0,6	0,37	0,65	0,04	0,04	0,5	0,2	1,3	0,3	<0,2
65VmoC15	0,6	0,2	0,65	max	max	0,3	0,1	1,4	max	Cu
	0,7	0,37	0,9	0,025	0,025	0,5	0,2	1,7	0,3	<0,2
75MoCr11	0,7	0,2	0,65	max	max	0,3	-	1,0	max	Cu
	0,8	0,37	0,9	0,03	0,03	0,4	-	1,25	0,3	<0,2
85MoCNi10	0,8	0,2	0,6	max	max	0,2	-	1,8	0,9	Cu
	0,88	0,4	0,8	0,03	0,03	0,3	-	2,1	1,1	<0,3
65MnCr15	0,62	0,17	0,8	max	max	-	-	1,0	max	-
	0,67	0,37	1,0	0,04	0,04	-	-	1,5	0,3	-
C60Mo	0,55	0,2	0,6	max	max	0,2	0,05	max	max	Cu
	0,65	0,41	0,75	0,035	0,035	0,3	0,15	0,25	0,5	<0,2
85VCr15	0,8	0,2	0,25	max	max	-	0,1	1,4	-	-
	0,9	0,4	0,5	0,045	0,045	-	0,2	1,7	-	-
50CrNi12	0,45	0,17	0,5	max	max	-	-	0,45	1,0	-
	0,55	0,37	0,8	0,04	0,04	-	-	0,75	1,5	-

Tabel 2.2.4.1. Principalele mărci de oțel forjat utilizate la fabricația cilindrilor de laminare la cald și compoziția lor chimică

Etapele tehnologice de prelucrare a cilindrilor de laminor din oțel forjat pentru laminare la cald corespund celor descrise pentru cilindrii de laminare la rece, cu

precizarea că, în acest caz, livrarea cilindrilor se efectuează, în funcție de prevederile din contract, în una din cele trei situații posibile: [4][6][24][54]

- brut forjat și tratat termic primar la o duritate de maxim 230 HB;
- eboșat și tratat termic secundar;
- finisat și tratat termic secundar.

Parametrii tehnologici aferenți fiecărei mărci de oțel sunt redați în tabelul 2.2.4.2.: [4][6][7][52]

Marca de Oțel	Parametrii tehnologici (⁰ C)						
	Forjare	Normaliz	Recoacere	Rec.de dehidrog.	Călire	Revenire	Detens ionare
55VmoC12	1180-850	860+/-10	700+/-10	700+/-10	860+/-10	550-650	T _{detens} = = T _{rev.} = = 30 ⁰ C
65VmoC15	1180-850	860+/-10	700+/-10	700+/-10	850+/-10	550-650	
75MoCr11	1180-850	850+/-10	730+/-10	670+/-10	840+/-10	550-680	
85MoCNi10	1180-850	900+/-10	800+/-10	680+/-10	830+/-10	550-650	
85VCr15	1180-850	900+/-10	800+/-10	680+/-10	830+/-10	550-630	
C60Mo	1180-850	840+/-10	680+/-10	680+/-10	850+/-10	550-650	
50CrNi12	1180-850	860+/-10	670+/-10	670+/-10	870+/-10	550-650	
65MnCr15	1150-850	840+/-10	700+/-10	700+/-10	830+/-10	550-650	

Tabel 2.2.4.2. - Parametrii tehnologici aferenți principalelor mărci de oțel forjat, utilizate la fabricația cilindrilor de laminare la cald

Condițiile specifice și etapele de control ale cilindrilor de laminor din oțel forjat pentru laminarea la rece sunt valabile și pentru cilindrii din oțel forjat destinați laminării la cald, cu următoarele precizări suplimentare: [4][6][14][54]

- cilindrii prevăzuți a fi livrați, în stare finisată, vor avea cotele din desenul de execuție al beneficiarului, pentru cilindri în stare finită, asigurându-se pentru cotele netolerate o precizie de prelucrare de clasă mijlocie, conform standardelor existente. Pentru cotele tolerate, nu se va adopta o precizie superioară clasei a VII-a. Pentru diametre de fusuri mai mici de 500 mm, se poate accepta o precizie până la clasa a VI-a;

- pentru cilindrii prevăzuți a se livra în stare brut forjată, cu tratamentul primar efectuat, dimensiunile vor fi cele ale piesei finite, la care se adaugă adausurile de prelucrare (STAS2171/1-84), adausurile pentru prelucrarea epruvetelor necesare încercărilor mecanice, precum și alte adausuri tehnologice (capete de prindere la tratament etc.);
- cilindrii prevăzuți a se livra în stare eboșată și cu tratament termic secundar efectuat se vor prelucra cu adausuri față de desenul în stare finită, conform tabelului 2.2.4.3.

Poziția	La lungime	La diametru
Pentru tăblie	+ 20	+ 10
Pentru fusuri	+ 10	+ 20
Pentru lungimea totală	+ 40	-

Tabel 2.2.4.3. - Adausuri față de desenul în stare finită al cilindrilor din oțel forjat pentru laminare la cald, livrați în stare eboșată și cu tratamentul termic secundar efectuat.

- analiza chimică se verifică pe baza probei medii, la elaborarea-turnarea oțelului în cuptor bazic, cu vidare, iar la forjare se asigură un corioaj de minim 5, care să asigure o structură fină a cilindrului, precum și caracteristicile mecanice impuse;
- la controlul ultrasonic, care se execută după eboșare, după tratamentul termic secundar și după finisare, nu se admit urme de retasuri sau alte defecte. În secțiune, nu se admit defecte “ascunse” ca: fisuri, crăpături sau alte defecte care pot constitui amorse de rupere și care influențează comportarea cilindrilor în exploatare. Suprafața tăbliei trebuie să fie, ca aspect, netedă, fără sufluri, incluziuni sau alte defecte. Se admit pete de forjare locale la eboșare, înaintea operației de tratament termic secundar, cu condiția ca, la operația de finisare, aceste defecte să fie înlăturate;

—verificarea durtății și a caracteristicilor mecanice se face după tratamentul termic secundar și valorile se încadrează în prescripțiile din tabelul 2.2.4.4.:

Marcă Oțel	Rezistență La rupere Kgf/mm ²		Limită de curgere kgf/mm ²		Alungirea		Gătuirea		Reziliență KCU3012 kgf/cm ²		Durtate pe fus și tăblie	
	L	T	L	T	L	T	L	T	L _{min}	T _{min}	HB	HS
55VmoC12	>80	>76	>45	>42	>9	>6	>30	>15	3	2	260 320	-
65VmoC15	95 110	90 104	>50	>47	>9	>8	>30	>15	3	2	275 325	-
75MoCr11	85 105	81 100	>50	>47	>10	>7	>30	>15	2	1,5	260 300	-
85MoCNi10	120 140	114 134	-	-	-	-	-	-	-	-	360* 420	54 59
65MnCr15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	285 320	44 48
C60Mo	>70	>67	>40	>37	-	-	-	-	1	0,8	210 240	-
85VCr15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42 40
50CrNi12	77	73	-	-	-	-	-	-	-	-	223 277	32 39

Tabel 2.2.4.4. - Durtăți și caracteristici mecanice prescrise cilindrilor din oțel forjat pentru laminare la cald, funcți de marca de oțel utilizată. [4][7][24][52][81]

Observație: * - durtate pe fus = 260 HB; L reprezintă valori pentru probe longitudinale; T reprezintă valori pentru probe tangențiale; pentru mărcile de oțel 65MnCr15 și 85VCr15 nu se execută probe pentru verificarea caracteristicilor mecanice.

—proporțiile și numărul probelor pentru verificarea calității cilindrilor se încadrează în următoarele prevederi: [4][5][54]

1. verificarea dimensională: pentru fiecare cilindru, cu instrumente universale de măsurat. Se rebutează cei necorespunzători, după eliminarea tuturor posibilităților de încadrare a cotelor din documentație;
2. aspect: pentru fiecare cilindru, cu ochiul liber, se rebutează cei necorespunzători;
3. analiza chimică: pe probe luate la turnarea fiecărei șarje, conform STAS2015/1-83. Se admit cei ce se încadrează în tabelul 2.2.4.1.;
4. caracteristici mecanice: pe lot de tratament termic și șarjă. Se execută o probă pe tăblie (longitudinal sau transversal). Axele probelor vor fi la 35 mm de suprafața cilindrului. Cei necorespunzători se rebutează. Se pot face retratări, după care, în cazul rezultatelor necorespunzătoare, se rebutează. Repetarea revenirii nu se consideră retratare;
5. duritate: pe fiecare cilindru. Pe tăblie, se verifică pe trei generatoare la 120 grade și în trei puncte echidistante pe fiecare generatoare, respectiv pe fiecare fus, în câte două puncte la 180 grade unul de altul (total 13 verificări pe cilindru). Pentru cilindrii necorespunzători, se procedează conform celor menționate la numărul curent 4. Neuniformitatea de duritate pe tăblia unui cilindru trebuie să fie de maxim 25 HB;
6. controlul ultrasonic: pe fiecare cilindru. Cilindrii care prezintă defecte în zona fusului de antrenare nu se admit.

Observație: La cilindrii din oțel 65MnCr15 și 85VCr15 nu se execută verificările de la punctul 4.

Documentele de livrare a cilindrilor cuprind: compoziția chimică realizată, încercările mecanice efectuate, rezultatul controlului ultrasonic, fișe de măsurători, diagrama de tratament termic secundar, fișa individuală de urmărire a comportării cilindrilor în exploatare.

2.3. Tehnologii de recondiționare a cilindrilor de laminor din oțel

2.3.1. Tehnologii clasice utilizate în prezent pentru recondiționarea cilindrilor de laminor din oțel

În prezent, toți cilindrii de laminare uzați sunt refolosiți - funcție de gradul de uzură - în urma aplicării uneia din următoarele variante tehnologice: [3][4][5][6][7][52][54]

- restrunjirea cilindrilor, redurificarea tăbliei cilindrilor, respectiv rectificarea acesteia;
- reforjarea cilindrilor pentru obținerea unor cilindri de dimensiuni mai mici;
- folosirea cilindrilor ca electrozi în instalații de încălzire electrică;
- utilizarea cilindrilor ca încărcătură în cuptorul electric bazic cu arc, la procesul de elaborare-turnare.

În cazul adoptării primei variante tehnologice de refolosire a cilindrilor de laminare uzați, respectiv în vederea strunjirii cilindrilor confecționați din materiale (oțeluri) cu caracteristici fizico-chimice superioare, dificil de prelucrat, se pot utiliza, în scopul preîncălzirii acestora (pentru reducerea componentelor forței de așchiere, potrivit concluziilor evidențiate la Capitolul 1 - Introducere) mai multe procedee: [2][41][52][54]

- a) Încălzirea semifabricatelor cu ajutorul căldurii rămase de la operațiile precedente

Acest tip de încălzire poate fi utilizată doar în atelierele de prelucrare ale uzinelor metalurgice prelucrătoare și doar dacă între acestea distanțele nu sunt prea mari, pentru a permite efectuarea transportului fără ca semifabricatul să se răcească prea mult. Domeniul de aplicare a acestui procedeu de încălzire este limitat doar în oțelării, pentru decojirea lingourilor și debitarea capetelor acestora;

b) Încălzirea totală a pieselor înainte de prelucrarea prin aşchiere

Acest procedeu este complicat și neeconomic, din cauza cantității mari de căldură necesară încălzirii complete, precum și a repetării acestei încălziri până la prelucrarea completă.

De asemenea, încălzirea completă duce la scăderea rigidității sistemului mașină-piesă, precum și la apariția unor transformări de structură nedorite, în toată masa piesei;

c) Încălzirea locală, direct pe mașina-unealtă, în timpul aşchierii, doar a stratului de metal care se îndepărtează

Această metodă poate fi aplicată cu mai mult succes, deoarece nu prezintă dezavantajele expuse la punctele a) și b).

Încălzirea locală a suprafeței semifabricatului se poate efectua:

c1) cu ajutorul flăcării unui arzător oxiacetilenic cu propan sau cu plasmă [2][34][35][36][41], metodă ce este incomodă, costisitoare și neuniformă, fapt pentru care nu poate fi generalizată;

c2) prin rezistență electrică de contact [2][34][35][41], metodă mai avantajoasă, întrucât se utilizează o mare cantitate de căldură pentru ridicarea gradului de plasticitate a oțelului în zona de aşchiere.

Principiul încălzirii prin rezistență de contact este prezentat în figura 2.3.1.1.:

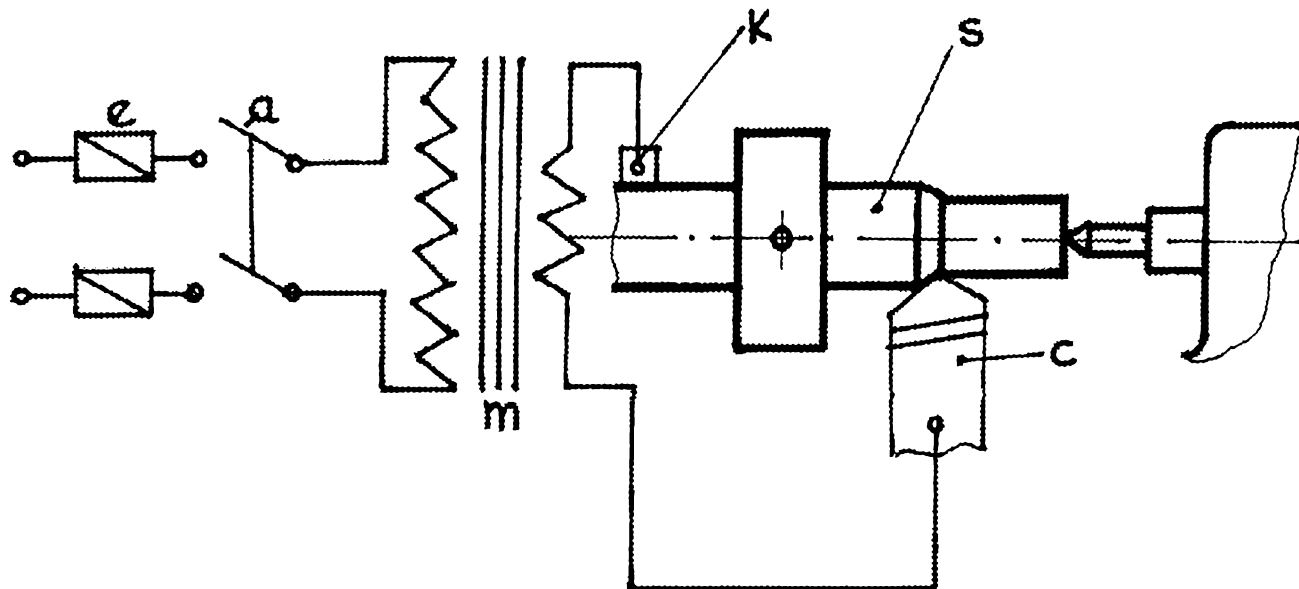


Fig.2.3.1.1. - Principiul încălzirii prin rezistența de contact

În figura 2.3.1.1., s-au notat cu “e” siguranțele fuzibile, cu “a” - întrerupătorul principal, cu “m” - transformatorul, cu “k” - contactul rotativ; cu “s” - semifabricatul și cu “c” - cuțitul.

Căldura totală care apare în zona de așchiere:

$$Q_t = Q_1 + Q_2, \text{ unde } Q_1 = \frac{0,163 F_z v}{427} \text{ [J], în care:}$$

F_z - componenta tangențială a forței de așchiere [N];
 v - viteza de așchiere [m/s];

$Q_2 = I^2 R t$ [J], unde:

I - curentul [A]

R - rezistența [Ω]

t - timpul [s]

Cercetările efectuate până în prezent în acest domeniu [2][34][35][36][41] au scos în evidență o serie de neajunsuri:

- Q_1 și Q_2 se găsesc într-o anumită interdependență, pentru că, la creșterea vitezei de așchiere, se mărește Q_1 , însă scade Q_2 , deoarece scade timpul de trecere a curentului electric prin contact;
- este necesară izolația sistemului piesă-sculă și mașină, ceea ce prezintă dificultăți;
- contactul electric al sistemului de încălzire trebuie efectuat după ce semifabricatul se rotește și cuțitul a pătruns în așchie, pentru a evita arcul electric ce poate apărea la vârful cuțitului, deteriorându-l. De asemenea, datorită arcului electric, se poate știrbi suprafața piesei de prelucrat. Uzura cuțitului după o prelucrare timp de aprox. 10 minute se prezintă ca în figura 2.3.1.2.:

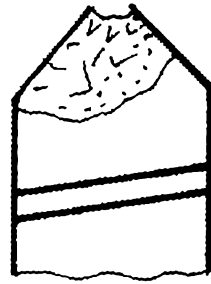


Fig.2.3.1.2.- Forma vârfului cuțitului după circa 10 min. de lucru, cu introducerea de curent electric în zona de așchiere

- contactul electric după pornire prezintă, la rândul său, dezavantajul că, la început, așchiera nu se desfășoară în aceleași condiții (fără încălzire, datorită lui Q_2). Pentru a adapta regimul de așchiere la condițiile încălzirii, ar fi necesare mașini-unelte cu variatori continui ai turației și care sunt reduse la număr;

— așchia îndepărtată trebuie evacuată, astfel încât să nu atingă cuțitul sau portcuțitul, pentru că, în acest caz, se formează o punte supusă încălzirii, iar suprafața piesei va pierde căldura Q_2 .

Cu toate acestea, în [34][35] se arată că, la piese din oțel având dimensiuni mari, prin încălzirea cu rezistență de contact a stratului de suprafață la o temperatură $\Theta = 800...830^{\circ}\text{C}$, s-au obținut rezultate bune, forța de așchiere scăzând de 3-4 ori;

c3) prin inducție electromagnetică, cu ajutorul curenților de înaltă frecvență

Cu toate că, în prezent, tehnologia reconstrucției (recalibrării) cilindrilor de laminor din oțel, prin utilizarea fenomenului de inducție electromagnetică, nu poate fi considerată încă o tehnologie clasică (datorită ariei restrânse de utilizare în domeniu), avantajele evidențiate impun considerarea acesteia ca o tehnologie de viitor, cu atât mai mult cu cât inducția electromagnetică este folosită pe scară largă în cadrul procesului de prelucrare a cilindrilor de laminor pentru tratamentul termic final - călirea de suprafață a tăbliei, obligatoriu în domeniul laminării la rece. [3][6][52][81][82]

Acest procedeu de încălzire elimină toate dezavantajele prezentate la metodele de încălzire expuse anterior, având, în plus, avantajul că oferă posibilitatea reglării corespunzătoare a temperaturii de încălzire, a adâncimii stratului încălzit, a vitezei de încălzire prin alegerea (reglarea) frecvenței și a curentului, calculând forma și dimensiunile inductorului, reglându-i poziția (distanța la suprafața semifabricatului) etc.

Analizând critic metodele de încălzire descrise în literatura de specialitate - [3][4][6][16][17][41][52][53][54][81][82], precum și utilajele necesare acestei încălziri, s-a ajuns la concluzia că încălzirea de suprafață prin inducție a oțelului supus prelucrării prin așchiere este cea mai indicată din toate punctele de vedere.

2.3.2. Stadiul actual al cercetării și aplicării tehnologiilor de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, la oțelurile cu caracteristici fizico-chimice și mecanice superioare. Instalații și dispozitive utilizate

Cercetările întreprinse de [2][3][4][15][16][17][34][35][36][41] în domeniul prelucrării prin așchiere a oțelurilor în stare încălzită au scos în evidență importanța și avantajele acestui procedeu și au indicat mijlocul de încălzire cel mai adecvat (prin inducție electromagnetică), fără să se stabilească cu exactitate toate condițiile desfășurării acestui proces de prelucrare decât pentru un număr limitat de oțeluri [2][34][35][36].

Borisov B.I. și Kulbaka I.S. [35] și Liubimov V.G. [36] au scos în evidență avantajele prelucrării oțelurilor în stare încălzită, chiar la oțelurile austenitice manganoase și au demonstrat că, încălzind aceste oțeluri la temperatura de 650⁰C, se pot îndepărta așchii pe o adâncime de 10 mm. Astfel, productivitatea crește de 16...20 ori, iar durabilitatea sculei - de 3...8 ori, obținând calități superioare ale suprafeței.

Dr.Clausen R. [34] a aplicat procedeul de strunjire la cald a unor oțeluri termorezistente cu Ni, Cr și Ti călite. Au fost evidențiate reduceri ale forțelor de așchiere cu 24-25%, la temperatura de 500⁰C și cu 45,5 - 46% la temperatura de 800⁰C.

În concluziile experiențelor efectuate de firma Cincinnati Millin din SUA [2][41], s-a arătat că ridicarea temperaturii până la 573⁰C (1000⁰F) duce la o reducere cu 40-50% a efortului de așchiere și o reducere cu 33-66% a apăsării de așchiere.

Temperaturile recomandate în literatură sunt cuprinse între 550-850⁰C, la diferite oțeluri utilizate.

În general, experimentări organizate s-au efectuat doar pentru un anumit oțel, care era utilizat mai frecvent în uzina de prelucrare respectivă și care era dificil prelucrabil la temperatura ambiantă.

Breștin A.[2] a efectuat un studiu amănunțit al tuturor factorilor ce intervin în procesul de prelucrare (în primul rând, a factorului termic la încălzirea prin inducție), precum și asupra modificărilor sistematice ale parametrilor ce intervin în proces. Cercetarea a fost efectuată, însă, pe un număr limitat de oțeluri (OLC45, OLC60, Rp3, oțel austenitic manganos T105M120), nefiind stabilită o tehnologie aplicabilă oricărui oțel.

Încălzirea prin inducție electromagnetică are la bază fenomenul de inducție magnetică și efect pelicular, potrivit căruia, în piesa de prelucrat introdusă într-un câmp magnetic de flux variabil, se induce o tensiune electrică distribuită doar în straturile periferice ale piesei. Efectul Joule - ce apare sub acțiunea curentului indus- duce la încălzirea, într-un timp scurt, a stratului de suprafață al piesei (cilindrului).

În vederea prelucrării la strung, încălzirea se poate realiza cu un inductor circular (semicircular), format din una sau mai multe spire ce se deplasează de-a lungul semifabricatului de prelucrat, împreună cu căruciorul, inductorul fiind așezat pe direcția de avans înaintea cuțitului (fig.2.3.2.1.):

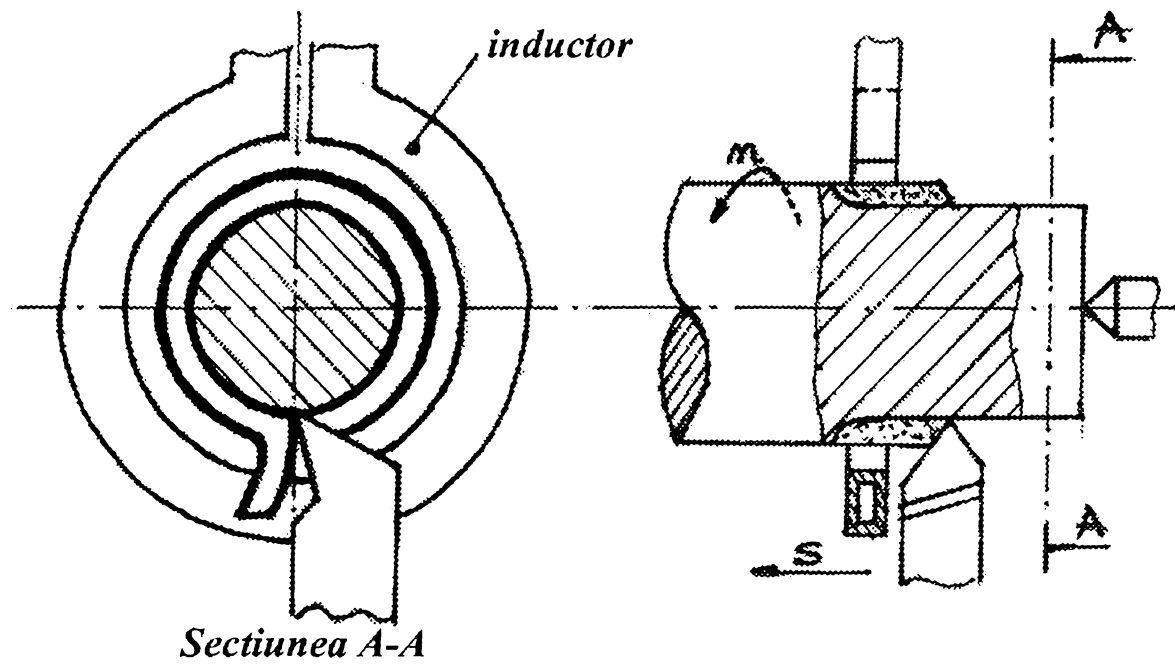


Fig. 2.3.2.1. - Schema strunjirii cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață
Schematic, instalația de principiu se prezintă în fig.2.3.2.2.:

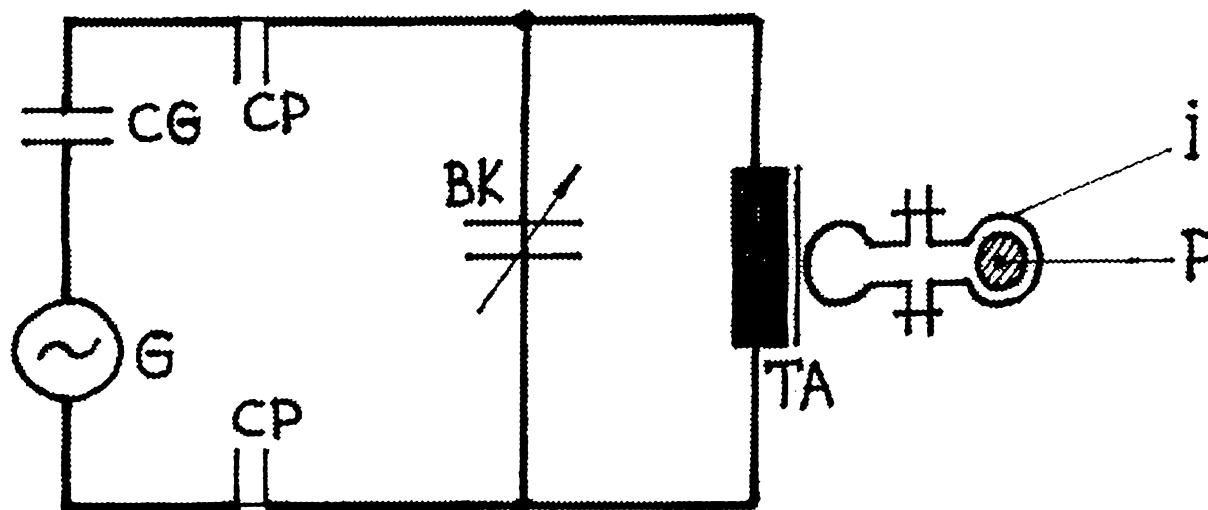


Fig.2.3.2.2. - Principiul încălzirii prin inducție.

În schemă, s-a notat cu:

G - generatorul de înaltă (medie) frecvență;

CG - condensatorul serie al generatorului;

CP - contactor principal dublu;

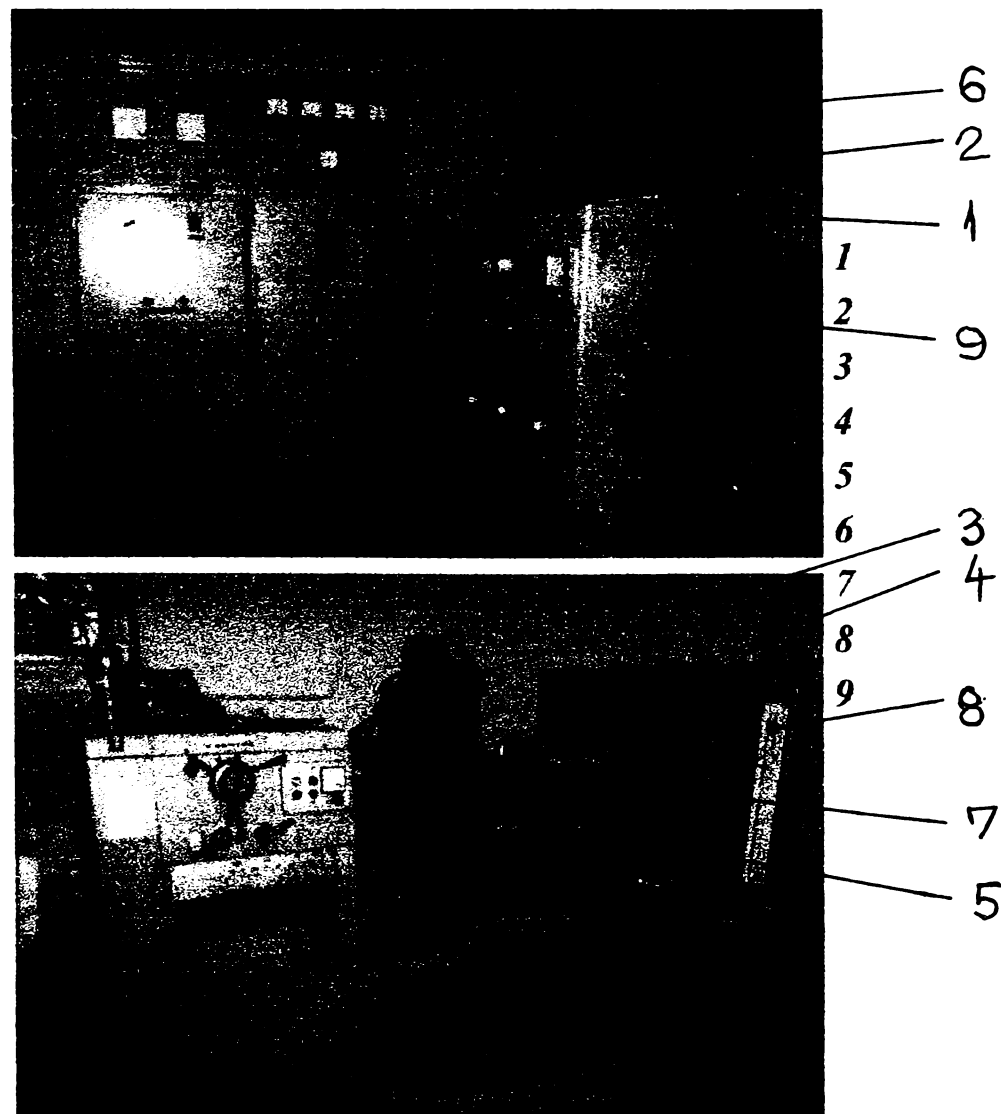
BK - bateria de condensatoare;

TA - transformatorul de adaptare;

I - inductorul;

P - piesa;

În vederea efectuării experimentărilor evidențiate în cadrul acestei teze de doctorat, s-a utilizat instalația de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață al cilindrilor de laminor, aflată în dotarea Catedrei de “Tehnologie mecanică” a Universității “Politehnica” din Timișoara, instalație prezentată în fig.2.3.2.3.:



1. Strungul SNA500
2. Grup convertizor MF $f=8000$ Hz, $U=750$ V, $P=110$ kW
3. Transformator de adaptare prototip MF-ISC-0
4. Inductor circular (semicircular) cu o singură spiră
5. Baterie de condensatori $C=0,16 \dots 32$ μ F
6. Dulap de comandă și automatizare GEF-AV
7. Portcuțit dinamometric $F_{\max} = 750$ daN
8. Stabilizator de presiune cu traductor pentru determinarea valorii componentelor forțelor de așchiere
9. Cilindru de laminor

1. Mașina-unealtă folosită: strung normal SNA500, având următoarele caracteristici principale:

diametrul maxim de strunjit peste pat	500 mm
diametrul maxim de strunjit deasupra saniei transversale	265 mm
distanța între vârfuri	1000 mm
diametrul găurii arborelui principal	62 mm
conul arborelui principal	Morse 5
numărul treptelor de turații	24
gama turațiilor arborelui principal	16-1600 rot/min
gama avansurilor longitudinale	0,28-5 mm/rot
gama avansurilor transversale	0,007-1,25 mm/rot
gama filetelor: metric	0,5-160 mm
modul	0,5-80 mm
Withworth	1/2 - 160 pași/1"
Diametral Pitch	1-160 DP
puterea motorului electric	11kW

2. Grup convertizor de medie frecvență tip GEF-AVE 110/8000, produs de IME-București, având următoarele caracteristici:

2.1. motor de antrenare: asincron trifazat, cu rotorul în colivie

Putere nominală	125 kW
Tensiune nominală	380V sau 420V

Curent nominal	233A sau 211A
Frecvența	50Hz
Turația sincronă	3000 rot/min
Factorul de putere	$\cos\varphi = 0,89$
Curent de pornire relativ	2x(stea)
Timp de pornire	45 sec (stea)
Regim de funcționare	s1
Clasa de izolație	B
Întrefier nominal	1,6mm (rece)
Puterea absorbită de motor la puterea nominală a generatorului	137 kW

2.2. generator de medie frecvență monofazat:

Puterea nominală	110 kW
Tensiunea nominală	750 V
Curent nominal la $\cos\varphi = 0,7$	209A
Frecvența	8000 Hz
Turația sincronă	3000 rot/min
Tensiunea nominală de excitație	120 V _{max}
Curent de excitație nominal (excitație separată)	10 A _{max}
Clasa de izolație	B
Regim de funcționare	s1
Întrefier nominal	0,9 mm (rece)
Valori limită pentru regimul continuu; temperatura apei la intrare	25 ⁰ C

3. Transformatorul de adaptare în medie frecvență, alimentat cu cablu special de racord m.f., răcit cu apă, permite legarea directă a unui inductor de joasă impedanță în circuitul secundar, astfel încât inductorul va fi alimentat la tensiuni cuprinse între 35-70V. Transformatorul a fost montat, prin intermediul unui suport, pe căruciorul strungului, putându-se deplasa împreună cu acesta (poz.1, fig.2.3.2.4):

Secundarul are o singură spiră, formată dintr-o cămașă de tablă de cupru răcită cu ajutorul unei serpentine din țevă de cupru, prin care circulă apă de răcire. Puterea transformatorului este de 500 kVA.

Înfășurarea primară a transformatorului este legată la barele colectoare ale bateriei de condensatoare, prin două cabluri răcite cu apă.



Fig.2.3.2.4. - Transformatorul de adaptare și inductorul în timpul lucrului

Transformatorul de adaptare, împreună cu bateria de condensatoare, formează circuitul oscilant care, la rezonanță, conduce la un transfer maxim de putere din inductor în piesa ce este supusă procesului de electrotermie prin inducție.

Acordul acestui circuit se face cu ajutorul separatorului de capacitate, dar orice manevră se execută numai cu circuitul de 8000 Hz întrerupt.

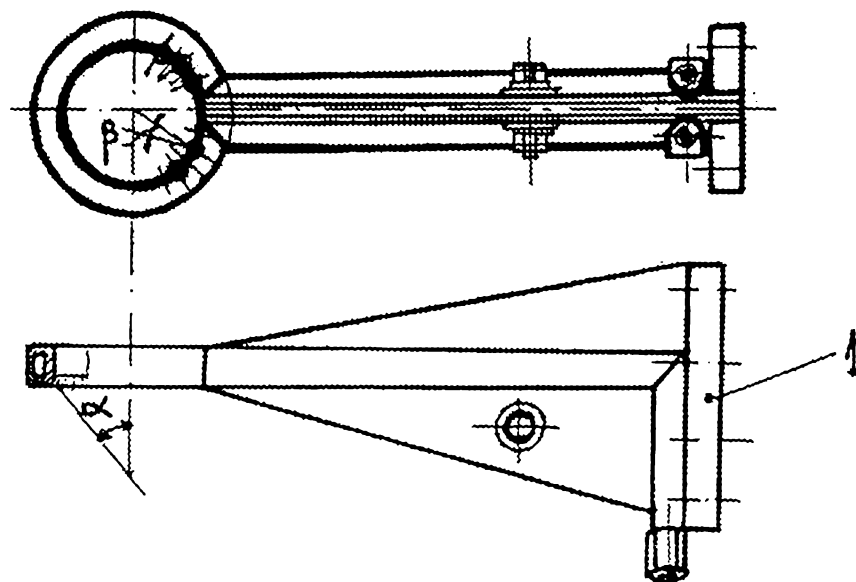
4. Inductoarele utilizate au un număr de spire ce poate varia de la o spiră la mai multe spire, funcție de dimensiunea suprafeței de încălzit și de tensiunea înfășurării secundare a transformatorului coborât. Totuși, inductorul cu o spiră are o serie de avantaje față de cel cu mai multe spire [13][17][53]. Acesta nu are nevoie de izolare electrică a spirei, iar costul său este mai mic. Alimentarea cu lichid de răcire este, de asemenea, mai simplă. În inductorul cu o singură spiră, străpungerea electrică între piesa de încălzit și inductor este posibilă numai dacă piesa atinge conductorul inductor în punctul unde se leagă șina de alimentare.

Într-un inductor cu mai multe spire, străpungerea poate să se producă la atingerea piesei în două puncte oarecare ale inductorului, făcând scurtcircuit între spire [13][15][16][53].

Totodată, varianta folosirii inductorilor semicirculari pentru încălzirea cilindrilor de laminor - variantă utilizată și în cadrul experimentărilor evidențiate în această teză de doctorat - oferă posibilitatea asigurării unui nou parametru variabil pentru regimul de lucru și anume distanța dintre inductor și cilindru, creându-se și posibilitatea folosirii aceluiași inductor pentru o plajă largă de diametre de cilindru [13][53].

Inductorul semicircular utilizat la efectuarea experimentărilor a fost prevăzut cu tole de tablă silicioasă, în vederea concentrării fluxului magnetic înspre piesa supusă prelucrării.

Pe scară mondială, cel mai utilizat inductor pentru încălzirea (călirea) simultan-succesivă de suprafață a cilindrilor de laminor din oțel este cel prezentat în fig.2.3.2.5.[13][17][53]:



1- șine parcurse de curent

Fig.2.3.2.5.- Inductor “clasic” pentru încălzirea (călirea) simultan-succesivă a cilindrilor de laminor din oțel

Acest tip de inductor se execută din țeavă de cupru dreptunghiulară, care fie se sudează de șinele parcurse de curent 1, fie se leagă cu ajutorul clemelor de înfășurarea secundară a transformatorului coborâtor. Axul găurilor pentru lichidul de călire este înclinat față de axul inductorului sub un unghi de 30-45 grade. Cu creșterea acestui unghi, jetul lichidului de răcire cade mai aproape de inductor și prin aceasta se reduce timpul trecerii suprafeței de călit din zona de încălzire în zona de răcire. Precizăm că, din punct de vedere al transformărilor de fază (în această metodă de încălzire rapidă), austenita rezultată se obține la temperaturi cu atât mai înalte, cu cât viteza de încălzire (frecvența) este mai mare și, totodată, ea este foarte neomogenă chimic, lucru ce se accentuează odată cu neomogenitatea structurii inițiale. Ca urmare a obținerii austenitei neomogene, și stabilitatea sa la răcire se diminuează și drept consecință, prin mărirea vitezei critice de călire, călibilitatea oțelului scade, lucru care, la călirea de suprafață, este benefic. La un unghi oarecare, începe o “fugă” a căldurii din zona de încălzire, ceea ce duce la coborârea randamentului termic. La un unghi de cădere mai mare de 45 grade, se

observă intrarea în zona de încălzire a apei reflectate și ca urmare, apar pete moi pe suprafața călită. La o micșorare a unghiului, timpul între sfârșitul încălzirii și începutul răcirii crește, cresc nerațional pierderile de căldură pe seama conductibilității și a radiației. Unghiul se alege experimental, în așa fel încât răcirea să înceapă imediat după ce în stratul încălzit s-au produs transformările termice necesare obținerii tratamentului termic dorit. Suprafața secțiunii transversale a țevii ce formează conductorul inductor și, deci, a țevilor de răcire, trebuie să fie de 2-4 ori mai mare decât suprafața totală a găurilor pentru ieșirea apei de călire.

Sunt posibile două metode de aducere a lichidului de călire în inductor, pentru o călire succesivă arătată în fig.2.3.2.5.[13][53].

În primul caz, apa se aduce prin furtunuri la ambele ștuțuri. Ea trece prin țevile ce răcesc șinele purtătoare de curent, conductorul inductor și, mai departe, ajunge la suprafața de călit. În acest caz, într-un punct al conductorului inductor ce se găsește aproape de mijlocul lui, viteza lichidului de răcire este aproape egală cu zero. Și în cazul când conductorul inductor este executat din țeavă cu pereți subțiri, este posibilă arderea lui. În activitatea de producție, astfel de cazuri se întâlnesc des.

În al doilea caz, apa de răcire intră în inductor prin robinet și apoi prin furtun, trece prin țevile ce răcesc talpa și numai o șină purtătoare de curent, apoi intră în conductorul inductor, de unde iese parțial pe suprafața de călit. După aceasta, apa rămasă trece prin țevile ce răcesc o a doua șină de curent, a doua talpă și, prin furtunul de ieșire la capătul căruia se montează un robinet de reglare, se trimite la căminul colector. Robinetele de la intrare și ieșire permit să se varieze presiunea apei la intrarea în inductor și în conductorul inductor și, în acest fel, se reglează intrarea generală a apei în inductor, precum și consumul ei pentru răcirea suprafeței de călit. În acest caz, secțiunea țevii pentru aducerea lichidului de răcire trebuie să

fie de două ori mai mare decât în primul caz. Arderea conductorului inductor este mai puțin probabilă.

Uneori, pentru creșterea siguranței răcirii conductorului inductor și a celorlalte elemente ale inductorului, se prevăd sisteme separate de aducere a lichidului de călire și a apei de răcire (fig.2.3.2.6.) [13][17][53]

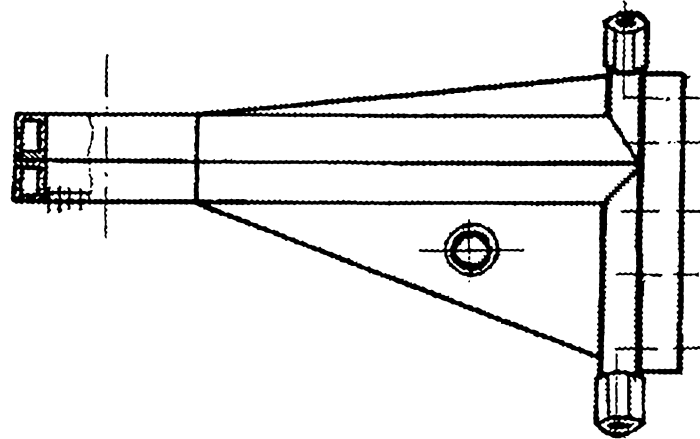
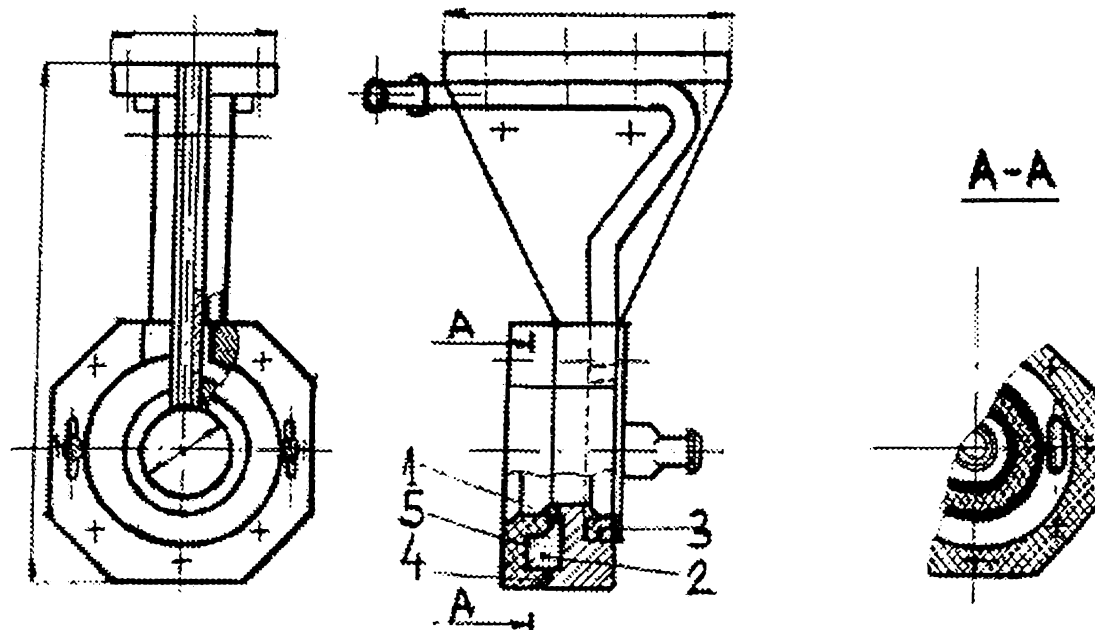


Fig.2.3.2.6. - Inductor pentru călirea simultan-sucsesivă a cilindrilor de laminor cu alimentare separată a apei de răcire și a lichidului de călire

Apa de răcire a inductorului vine dintr-un sistem separat, umplut cu apă curată distilată. În acest caz, lichidul de călire poate fi adus după un timp oarecare de la începerea încălzirii, de exemplu, în cazul când călirea cilindrului începe sub un prag de diametru mai mare. Dacă unele găuri din inductorul pentru călire succesivă se înfundă, pe suprafața piesei se formează fâșii moi. Curățirea găurilor în construcțiile reprezentate în figurile 2.3.2.5. și 2.3.2.6. este dificilă. Destul de anevoioasă este și operația de efectuare a găurilor mici.

Pentru ca unghiul de cădere a jetului să fie același, operația de găurire trebuie executată în dispozitive speciale. Dacă unghiurile sunt diferite din cauza neuniformității răcirii, de asemenea este posibilă apariția de fâșii moi. De aceea, uneori, pentru căliri simultan-sucsesive, se folosesc inductoare de tipul celui prezentat în figura 2.3.2.7. [13][53]



1 - fantă; 2 - cavitate; 3 - spira activă; 4 - garnitură; 5 - piesa izolantă suprapusă

Fig.2.3.2.7. - Inductor pentru călire simultan-sucsesivă cu fantă pentru aducerea lichidului de răcire

La acest tip de inductor, cavitatea pentru aducerea apei de răcire este formată dintr-o piesă izolantă 5 (din sticlotextolit, ebonită). Apa de răcire permanentă circulă prin spira activă 3, iar lichidul de călire - prin cavitatea 2 și, prin fanta 1, ajunge la suprafața de călit. Deschiderea fantei poate fi reglată cu ajutorul unor garnituri 4.

În cazul înfundării cavității sau a fantei, piesa suprapusă se scoate prin demontarea șuruburilor și se face curățirea necesară. Fiindcă piesele care formează fanta pentru trecerea lichidului de călire se prelucrează pe strung, unghiul de cădere a lichidului este uniform. Dacă axul piesei este așezat orizontal, atunci chiar și la un unghi mai mic de cădere, jetul de apă reflectat de pe suprafață ajunge uneori pe zona încălzită. Pentru aceste cazuri, inductorul se dotează cu un dispozitiv de suflare cu aer. Țeava de aducere a aerului se așează alături cu conductorul inductor, concentric cu el. Această țeavă nu trebuie să fie închisă. Jetul

de aer dirijat în spațiul dintre conductorul inductor și suprafața de încălzit nu permite ca lichidul să pătrundă în zona de sub inductor.

5. Bateria de condensatori s-a realizat astfel, încât să permită acordarea inductoarelor de diferite dimensiuni la generatorul de medie frecvență, asigurând, odată cu variația tensiunii generatorului, acoperirea unei game de temperaturi de 300-900⁰C.

Pe un cadru metalic prevăzut cu panouri de protecție demontabile, sunt fixați suportii izolatori pe care sunt așezate condensatoarele ce formează bateria (în cazul instalației descrise - opt condensatoare). O parte din condensatoare sunt legate direct la barele colectoare (formând partea fixă a bateriei), iar de altă parte sunt conectate la bare, prin intermediul unui separator de capacitate prevăzut cu cuțite (formând partea reglabilă a bateriei). Fiecare din cele patru cuțite ale separatorului sunt acționate independent, iar valoarea capacității diferă de la un cuțit la altul. Prin combinarea adecvată a cuplării cuțitelor, se obțin 15 trepte de reglaj al valorii capacităților introduse în circuitul de medie frecvență (MF), de la o treaptă la alta având un salt de 0,9 μ F.

6. Dulapul de comandă și automatizare cuprinde următoarele componente:

6.1. Dulapul de pornire al grupului convertizor are: un autotransformator, un contactor pentapolar, un contactor tripolar, un releu minimal de curent și un releu intermediar, iar pe panoul frontal, două butoane pentru comanda pornirii și opririi grupului convertizor.

Autotransformatorul are rolul de a reduce valoarea curentului absorbit de motor în perioada tranzitorie de pornire a grupului convertizor.

6.2. Dulapul de comandă și reglare a grupului convertizor conține:

- un grup motor - amplidină - pentru excitarea generatorului;
- un contactor bipolar CB - 275/8, pentru circuitele principale de medie frecvență;
- un transformator de tensiune pentru alimentarea circuitelor instrumentelor de măsură;
- aparataj de protecție, comandă și conectare.

Pe panoul frontal:

- ampermetru de tablou cu scala 0...20A, pentru măsurarea curentului în circuitul de excitație;
- voltmetru de tablou cu scala 0...1000V, pentru măsurarea tensiunii în circuitul de 8000Hz;
- ampermetru de tablou cu scala 0...200A, pentru măsurarea intensității curentului în circuitul de 8000 Hz;
- kilowattmetru de tablou, pentru măsurarea puterii active în circuitul de 8000 Hz;
- cosfimetru de tablou, pentru măsurarea factorului de putere în circuitul de 8000 Hz;
- reostat pentru reglarea tensiunii generatorului, prin variația curentului de excitație;
- buton pornire-oprire electromotor amplidină;
- buton cuplare-decuplare excitație;
- comutator circuite secundare;
- întrerupător principal pentru alimentare circuite de comandă;
- lămpi de semnalizare.

Reglarea tensiunii generatorului poate fi făcută în limite largi (100-750V), prin acționarea butonului de la reostatul de excitație.

7. Portcuțitul dinamometric a fost conceput și realizat în cadrul Catedrei de “Tehnologie mecanică” a Universității “Politehnica” din Timișoara (prof.dr.ing. Aurel Dreucean). Considerațiile care au condus la alegerea acestui tip de dinamometru cu traductori pneumatici sunt:

- simplitatea construcției;
- precizia măsurărilor;
- posibilitatea determinării simultane a celor trei componente F_x , F_y , F_z ale forței de așchiere, la strunjire;
- posibilitatea determinării acestor valori atât în cazul prelucrării la cald, cât și la rece;
- posibilitatea adaptării instalației pe orice strung;
- sensibilitatea extrem de mare a aparatului;
- influența neglijabilă a vibrațiilor sistemului mașină-unealtă - sculă asupra măsurărilor, datorită capacității de amortizare a sistemului traductor-semnalizator;
- posibilitatea modificării ușoare a rapoartelor de amplificare.

Aparatura de măsurare este formată din două părți distincte și anume: un portcuțit dinamometric și stabilizatorul de presiune 8, cu semnalizator.

8. Stabilizatorul de presiune cu semnalizatorul a fost așezat pe patul strungului, la extremitatea din dreapta acestuia, confecționându-se, în acest scop, un suport din lemn corespunzător. Pe partea frontală a stabilizatorului se observă tuburile piezometrice 1...4 ale semnalizatorului, având în spate scările gradate etalonate corespunzător duzelor utilizate.

În cadrul experimentărilor efectuate, pentru determinarea și reglarea temperaturii s-a ales și utilizat un pirometru electronic de radiație tip PYROPTRON 2-Hartmann - Braun, care se utilizează pentru determinarea fără contact a temperaturii suprafețelor. Această alegere a avut la bază faptul că semifabricatul efectuează o mișcare de rotație continuă în tot timpul încălzirii și prelucrării.

Dintre avantajele aparatului, se menționează: [2][41][53][60]

- timpul scurt de măsurare, 5 milisecunde;
- influența redusă a distanței la care este așezat de suprafața încălzită;
- indicațiile sunt date direct în grade Celsius;
- etalonarea aparatului care se bazează pe emisivitatea corpului negru, se poate efectua și pentru obiecte care au o emisivitate mai mică decât 1;
- completat cu aparate auxiliare, pirometrul poate comanda procese de comutare sau poate memora sau prelungi indicația unor valori care au apărut pentru scurt timp, până când această valoare poate fi indicată de un instrument indicator uzual, citită pe el sau poate fi înregistrată de un înregistrator obișnuit.

Aparatul are domeniul de măsurare a temperaturii 350... 1700⁰C.

Verificarea valorii temperaturii - în cadrul experimentărilor efectuate - s-a făcut și prin utilizarea creioanelor "Thermocolor" de proveniență germană (A.W.Faber - Castell.Stein Bei Nurnberg), dar a căror eroare de măsurare este mai mare (5-7%).

CAPITOLUL 3

OPTIMIZAREA RECONDIȚIONĂRII CILINDRILOR DE LAMINOR DIN OȚEL PRIN VARIANTA TEHNOLOGICĂ CE INCLUDE STRUNJIREA CU PREÎNCĂLZIRE INDUCTIVĂ A STRATULUI DE SUPRAFAȚĂ

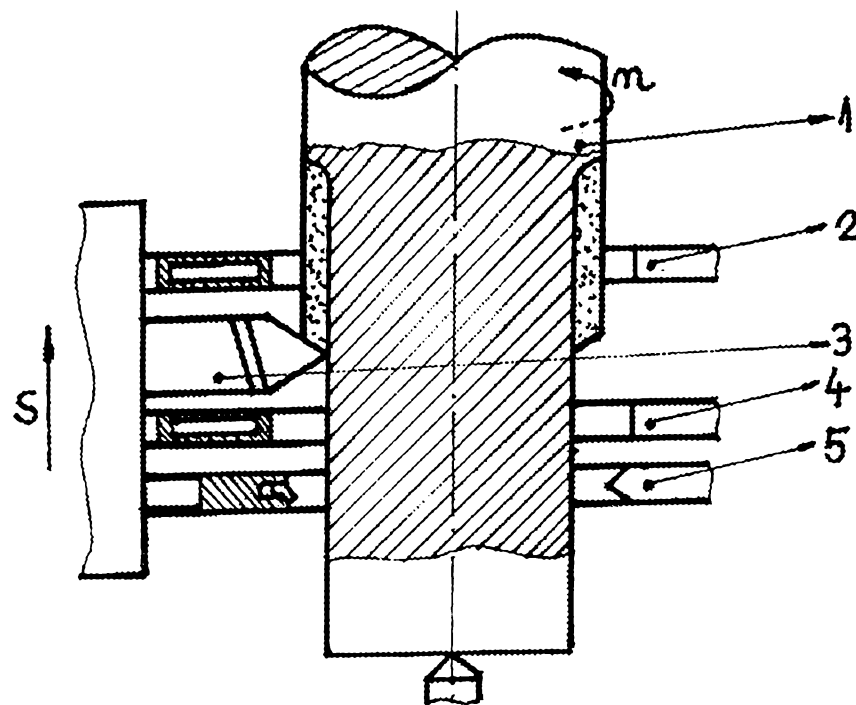
3.1. Direcții de optimizare evidențiate în cadrul procesului de recondiționare a cilindrilor de laminor din oțel, prin varianta tehnologică ce include strunjirea cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață

Așa cum a fost menționat la Capitolul 2, subcapitolul 2.3., paragraful 2.3.1., o variantă tehnologică de recondiționare a cilindrilor de laminor din oțel uzati o constituie restrunjirea (cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață) cilindrilor, urmată de redurificarea tăbliei cilindrilor prin călire de suprafață, respectiv de rectificarea acestora.[2][3][4][6][41][52][54][81]

a) O primă direcție de optimizare evidențiată - care a fost abordată în cadrul prezentei teze de doctorat - constă în stabilirea, cu ajutorul modelării matematice, a unei tehnologii aplicabile tuturor oțelurilor greu prelucrabile datorită proprietăților fizico-mecanice superioare supuse prelucrării prin așchiere la strung cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, la bază fiind datele existente în literatura de specialitate[2], în urma experimentărilor efectuate pe un număr limitat de oțeluri (vezi Capitolul 1 - Introducere).

Privitor la această direcție de optimizare, autorul prezentei teze de doctorat și-a propus crearea și verificarea unui model matematic ce are la bază un număr limitat de factori de influență ce intervin și se influențează reciproc în cadrul procesului tehnologic (rezistența la rupere a materialului prelucrat, avansul longitudinal, adâncimea de așchiere și temperatura de așchiere), precum și un număr limitat de funcții obiectiv analizate (componentele forței de așchiere și rugozitatea suprafeței așchiate), acest mod de abordare putând fi extins și la alți factori de influență (exemplu: diametrul piesei de prelucrat, turația, unghiul de degajare a cuțitului, materialul din care este confecționat cuțitul etc.), respectiv la alte funcții obiectiv (durabilitatea cuțitului, respectiv uzura acestuia; timpul de lucru; energia consumată etc.).

b)O a doua direcție de optimizare evidențiată constă în stabilirea unei tehnologii care să permită efectuarea simultană atât a etapei de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață al cilindrilor de laminor, cât și a etapei de călire de suprafață a acestora. În acest scop, s-ar impune o modificare a instalației evidențiate în fig.2.3.2.3., pentru a putea fi asigurată aplicarea procedurii după următoarea schemă de principiu (fig.3.1.1.)



1-cilindru de laminor; 2-inductor de preîncălzire a stratului de suprafață; 3-cuțit de așchiere; 4-inductor de supraîncălzire la $870-920^{\circ}\text{C}$, în vederea efectuării călirii de suprafață, succesivă, prin inducție electromagnetică; 5-inel cu orificii pentru răcire bruscă sub duș.

Fig.3.1.1. - Schemă de principiu pentru metoda de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață al cilindrului de laminor, simultan cu aplicarea tratamentului termic de călire de suprafață a acestora

Inductoarele 2 și 4 pot fi înlocuite printr-un singur inductor cu două spire, dimensionat corespunzător.

Întrucât se impune omogenitatea călirii pe toată suprafața tăbliei cilindrului, dar și în profunzime, este recomandabil ca procesul să se desfășoare pe verticală (utilizându-se o mașină-unealtă adecvată)

În scopul menționat, trebuie adaptat un dispozitiv special, care să permită prinderea și deplasarea simultană, pe verticală, de jos în sus, a ansamblului format din elementele 2,3,4 și 5, în timp ce cilindrul este rotit cu turația n .

În acest mod, la o singură trecere se pot efectua atât strunjirea, cât și călirea de suprafață a cilindrului de laminor.

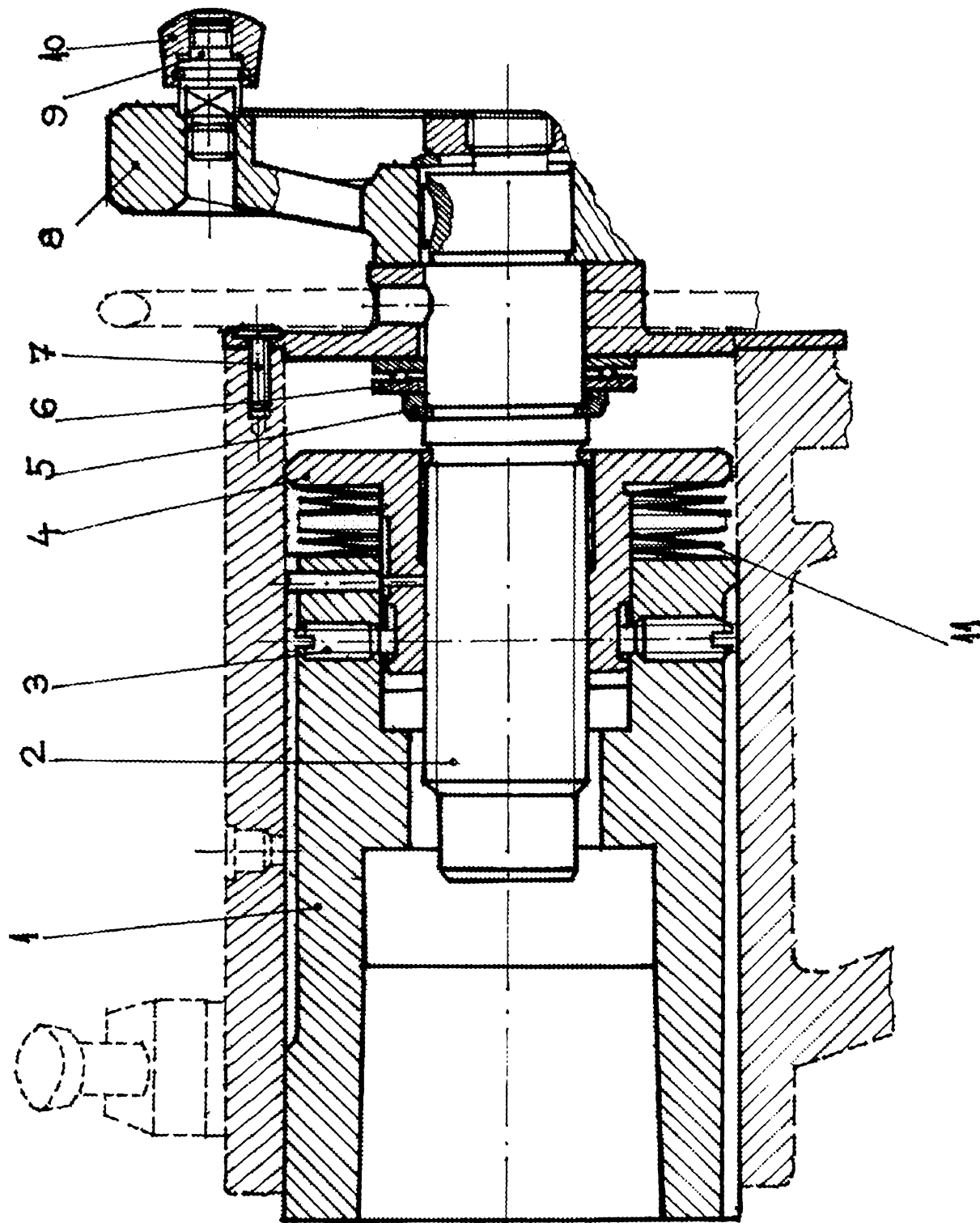
c)O a treia direcție de cercetare și optimizare evidențiată o constituie stabilirea unei tehnologii de aşchiere pe strung cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață a cilindrilor de laminor profilați, atât cercetările efectuate până în prezent în domeniul aşchierii cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, cât și prezenta teză de doctorat, referindu-se la piese (cilindri de laminor) netezi, destinați, prioritar, laminării la rece a tablelor și benzilor;

d)O cerință impusă de desfășurarea procesului tehnologic de aşchiere cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață al cilindrilor de laminor, cu instalația evidențiată în figura 2.3.2.3. a reprezentat-o necesitatea compensării dilatărilor termice ale cilindrilor supuși prelucrării (respectiv a celor axiale), sens în care s-a adus o modificare strungului utilizat, introducându-se un sistem elastic la pinola păpușii mobile. Calculele efectuate pentru determinarea caracteristicilor sistemului elastic sunt prezentate în subcapitolul 3.2.

3.2. Proiectarea pinolei adaptabile la strungul SNA500, capabilă să compenseze dilatățile termice axiale ale cilindrilor de laminor supuși aşchierii cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață

Încălzirea cilindrilor de laminor determină dilatarea lor axială.

La fixarea cilindrilor pe strungul SNA500 în universal și vârful păpușii mobile, dilatarea termică axială a acestora este împiedicată. Pentru a nu suprasolicita vârful păpușii mobile și arborele principal, s-a proiectat și realizat o pinolă cu posibilitatea preluării dilatației termice liniare a cilindrilor de laminor încălziți. Pentru compensarea termică axială a dilatației, s-a adoptat soluția cu arcuri disc multiple, în număr de 12, având o săgeată totală de 15 mm (fig.3.2.1.):



1-corp pinolă; 2-tijă; 3-știft filetat (2 buc); 4-piuliță; 5-inel; 6-rulment axial; 7-șurub M8 (3buc); 8-roată manuală; 9-șurub special; 10- mâner; 11-arc disc (12 buc)

Fig.3.2.1. - Ansamblul pinolă adaptabil la strungul SNA500, capabil să compenseze dilatățile termice axiale ale cilindrilor de laminor supuși aşchierii cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață

În continuare, se redau calculele dilatației termice liniare a cilindrilor de laminor și calculul de rezistență a arcului disc: [49][50]

a- calculul alungirii Δl :

$l = 830$ mm (lungimea cilindrului de probă)

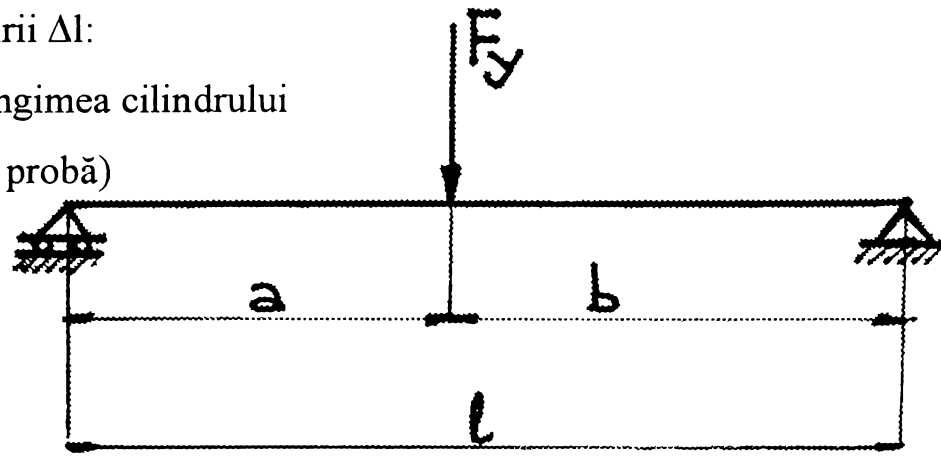
$$\Delta l = l \alpha \Delta t$$

$$t_1 = 300^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 400^\circ\text{C}$$

$$t_3 = 500^\circ\text{C}$$

$$t_4 = 600^\circ\text{C}$$



$$\Delta l_1 = 830 \times 11,5 \times 10^{-6} (300 - 20) = 2,6726 \text{ mm}$$

$$\Delta l_2 = 830 \times 11,5 \times 10^{-6} (400 - 20) = 3,6271 \text{ mm}$$

$$\Delta l_3 = 830 \times 11,5 \times 10^{-6} (500 - 20) = 4,5816 \text{ mm}$$

$$\Delta l_4 = 830 \times 11,5 \times 10^{-6} (600 - 20) = 5,5361 \text{ mm}$$

Pentru cazul când nu există încălzire, săgeata f_c va fi:

$$f_c = \frac{F a^2 b^2}{3E I_z}, \text{ unde:}$$

E - modulul de elasticitate longitudinal

I_z - momentul de inerție al secțiunii $a=535$ mm, $b=295$ mm

$$I_z = \frac{\pi d^4}{64}; \text{ d - diametrul cilindrului de probă; d=125 mm}$$

$$I_z = \frac{\Pi 125^4}{64} = 11984224 \text{ mm}^4$$

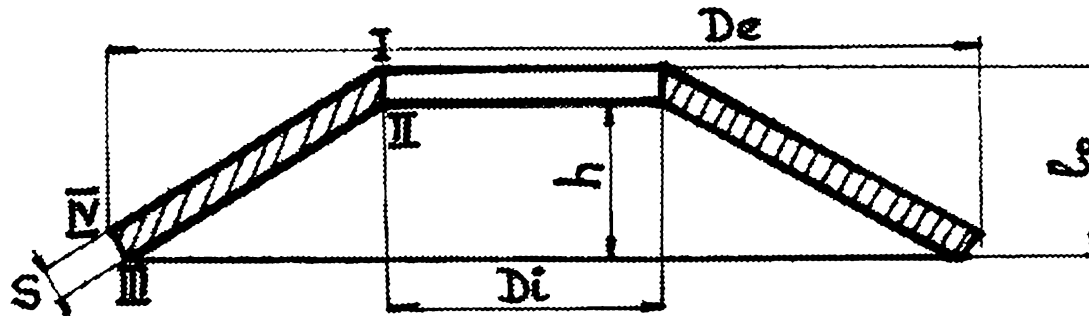
$$f_c = \frac{41 \times 53,5^2 \times 29,5^2}{3 \times 83 \times 2,1 \times 10^6 \times 0,05 \times 12,5^4} = 0,0159 \text{ mm}$$

b) Calculul de rezistență al arcului:

Material: Arc 1STAS795-87

arcuri supuse la solicitări statice sau oscilante de lungă durată,
temperatura de regim max. 150°C;

arcul ales face parte din grupa 2 => S=1... 3,5 mm



Date inițiale: $D_e = 76 \text{ mm}$ - diametru exterior

$D_i = 46 \text{ mm}$ - diametru interior

+0,045

$S = 1,75 \text{ mm}$ - grosimea discului

- 0,055

$h = 1,3 \text{ mm}$

+0,1

$l_o = 3,05 \text{ mm}$

-0,05

$P_{\text{tot}} = 500 \text{ daN}$ - sarcină maximă

$f_{\text{tot}} = 15 \text{ mm}$ - săgeata maximă

$$1. D_i = j_{\min} + 45 \text{ mm}$$

$j_{\min} = 1$ (între dornul de ghidare și D_i indicat, la $D_i = 31 \dots 64$, corespunde $j_{\min} = 1$)

$$D_i = 1 + 45 = 46 \text{ mm}$$

- se impune un $j_{\min} = 1 \text{ mm}$, deoarece, la comprimarea discului, se micșorează D_i al acestuia.

2. Sarcina pe un disc (neglijând efectul forțelor de frecare)

$$P_1 = P_{\text{tot}} / n = 500/2 = 250 \text{ daN}$$

3. Raportul diametrelor:

$$\delta = D_e / D_i = 76/46 = 1,652$$

4. Coeficientul adimensional α :

$$\alpha = \frac{1}{\Pi} \left[\left(\frac{\delta-1}{\delta} \right)^2 / \left(\frac{\delta+1}{\delta-1} - \frac{2}{\ln \delta} \right) \right], \text{ deci } \alpha = f(\delta = D_e / D_i)$$

$$\alpha = 0,6$$

5. Sarcina teoretică de aplatisare:

$$P_h = \frac{4E}{1-u^2} \frac{s^3 h}{\alpha D_e^2} \text{ [daN]}$$

$$P_h = \frac{4 \times 2,1 \times 10^4}{1-0,3^2} \frac{1,75^3 \times 1,3}{0,6 \times 76^2} = 245,9574 \text{ daN}$$

6. Raportul $P_1/P_h = 250/245,9574 = 1,01$

7. Raportul $(\frac{f}{h})_{P_1/P_h=1}$ este stabilit corespunzător raportului P_1/P_h (pentru sarcina dată)

8. Săgeata pachetului de discuri:

$$f_1 = (\frac{f}{h})_{P_1/P_h} \times h = 1 \times 1,3 = 1,3 \text{ mm}$$

9. Numărul necesar de discuri:

$$i = \frac{f_{\text{tot}}}{f_1} = \frac{15}{1,3} = 11,53 \Rightarrow \text{alegem } 12 \text{ discuri.}$$

10. Lungimea arcului disc în stare liberă:

$$L_0 = i(h+s) = 12(1,75 + 1,3) = 12 \times 3,05 = 37 \text{ mm}$$

11. Lungimea arcului disc sub sarcină:

$$P_{\text{tot}} = 500 \text{ daN}$$

$$L_1 = L_0 - i f_1 = 37 - 12 \times 1,3 = 21,4 \text{ mm}$$

c) Calculul de verificare a unui disc:

1. Săgeata maximă la care lucrează discul:

$$f_2 = 1,3 \text{ mm}$$

2. Rapoarte caracteristice discului:

$$h/s = 1,3/1,75 = 0,7428$$

$$f_2/s = 1,3/1,75 = 0,7428$$

$$f_2/(2s) = 1,3/(2 \times 1,75) = 0,3714$$

$$\delta = D_e/D_i = 76/46 = 1,652$$

3. Coeficienții adimensionali $\alpha, \beta, \gamma = f(\delta)$; $\alpha=0,6$; $\beta = 1,14$; $\gamma = 1,26$

4. Sarcina la săgeata f_2 :

$$P_2 = \frac{4E}{1-u^2} \frac{s^4}{\alpha D_e^2} \frac{f_2}{s} \left[\left(\frac{h}{s} - \frac{f_2}{s} \right) \left(\frac{h}{s} - \frac{f_2}{2s} \right) + 1 \right]$$

$$P_2 = \frac{4 \times 2,1 \times 10^4}{1-0,32^2} \frac{1,75^4}{0,6 \times 76^2} 0,7428 [(0,7428 - 0,7428)(0,7428 - 0,3714) + 1] =$$

$$= 185,544 \text{ daN}$$

5. Tensiunea efectivă sub sarcina P_2 în punctul I:

$$\sigma_I = \frac{4E}{1-u^2} \frac{s^2}{\alpha D_e^2} \frac{f_2}{s} \left[-\beta \left(\frac{h}{s} - \frac{f_2}{2s} \right) - \gamma \right] = \frac{4 \times 2,1 \times 10^4}{1-0,3^2} \frac{1,75^2}{0,6 \times 76^2}$$

$$0,7428[-1,14(0,7428-0,3714) - 1,26] = - 101,989 \text{ daN/mm}^2$$

$$\text{La } f=0,75h \Rightarrow \sigma_a=200 \dots 240 \text{ daN/mm}^2$$

$$|\sigma_I| = 101,989 < (200 \dots 240) \text{ daN/mm}^2 = \sigma_a$$

6. Rigiditatea discului la săgeata f_2 :

$$C = \frac{4E}{1-u^2} \frac{s^3}{\alpha D_e^2} \left[\left(\frac{h}{s} \right)^2 - 3 \frac{h}{s} \frac{f_2}{s} + \frac{3}{2} \left(\frac{f_2}{s} \right)^2 + 1 \right] =$$

$$= \frac{4 \times 2,1 \times 10^4}{1-0,3^2} \frac{1,75^3}{0,6 \times 76^2} \left(0,7428^2 - 3 \times 0,7428^2 + \frac{3}{2} \times 0,7428^2 + 1 \right) =$$

$$= 103,3595 \text{ daN/mm}$$

7. Lucrul mecanic acumulat de disc până la săgeata f_2 :

$$A = \frac{2E}{1-u^2} \frac{s^5}{\alpha D_e^2} \left(\frac{f_2}{s} \right)^2 \left[\left(\frac{h}{s} - \frac{f_2}{2s} \right)^2 + 1 \right] = \frac{2 \times 2,1 \times 10^4}{1,0-0,3^2} \frac{1,75^5}{0,6 \times 76^2}$$

$$0,7428^2 [(0,7428 - 0,3714)^2 + 1] = 2,56 \times 10^{-3} \text{ daNmm}$$

8. În punctul II:

$$\sigma_{II} = \frac{4E}{1-u^2} \frac{s^2}{\alpha D_e^2} \frac{f_2}{s} \left[-\beta \left(\frac{h}{s} - \frac{f_2}{2s} \right) + \gamma \right] = 92300 \frac{1,75^2}{0,6 \times 76^2} \times$$

$$\times [-1,14(0,3714) + 1,26] = 50,6863 \text{ daN/mm}^2 < \sigma_a$$

9. În punctul III:

$$\sigma_{III} = \frac{4E}{1-u^2} \frac{s^2}{\alpha D_e^2} \frac{f_2}{s} \frac{1}{\delta} [(2\gamma-\beta)(\frac{h}{s} - \frac{f_2}{2s}) + \gamma] = 92300 \frac{1,75^2}{0,6 \times 76^2}$$

$$\times 0,7428 \times 1,652 [(2 \times 1,26 - 1,14)(0,7428 - 0,3714) + 1,26] = 177,4088 \text{ daN/mm}^2 < \sigma_a$$

10. În punctul IV:

$$\sigma_{IV} = \frac{4E}{1-u^2} \frac{s^2}{\alpha D_e^2} \frac{f_2}{s} \frac{1}{\delta} [(2\gamma-\beta)(\frac{h}{s} - \frac{f_2}{2s}) - \gamma] = 92300 \frac{1,75^2}{0,6 \times 76^2} \times$$

$$\times 0,7428 \times 1,652 [(2 \times 1,26 - 1,14) \times 0,3714 - 1,26] = - 74,8124 \text{ daN/mm}^2;$$

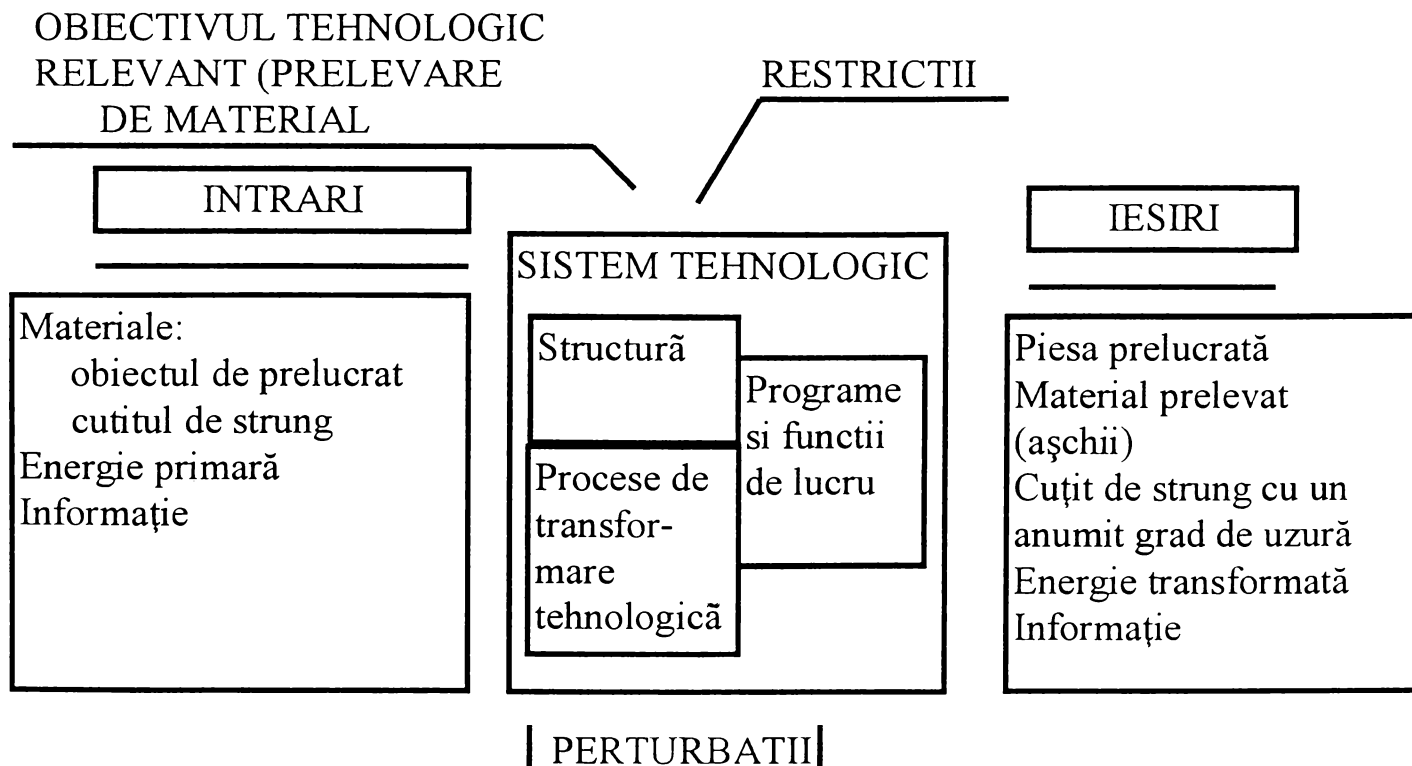
$$|\sigma_{IV}| < \sigma_a$$

3.3.Optimizarea recondiționării cilindrilor de laminor din oțel, prin modelarea matematică a procesului de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, în vederea stabilirii unei tehnologii de prelucrare aplicabilă tuturor oțelurilor.

3.3.1.Abordarea sistemică în vederea creării modelului matematic

3.3.1.1.Modelul intrări-ieșiri al sistemului tehnologic de prelucrare prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață

Sistemele tehnologice de prelucrare prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață se consideră sisteme concrete, având o structură constituită și o funcționalitate determinată exprimată prin capacitatea de realizare a unor transformări specifice de energie, substanță și informație. Aceste transformări sunt concretizate prin acțiunile de prelevare de material de pe suprafața obiectului de prelucrat (cilindrului de laminor).Schema unui astfel de sistem tehnologic generalizat de prelucrare prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, bazată pe modelul intrări-ieșiri, se prezintă în fig.3.3.1.1.:



Se poate considera că intrările sunt constituite din materiale (obiectul de prelucrat, cuțitul de strung), energia primară (încălzirea de suprafață a materialului de prelucrat, prin inducție electromagnetică etc.), precum și din informația tehnologică. Procesele de transformare tehnologică, finalizate prin prelucrarea cilindrului de laminor, se realizează pe baza unor funcții și programe de lucru bine definite. Obiectivul relevant în acest caz este prelevarea de material, care se realizează pe suprafața obiectului de prelucrat. Procesul tehnologic este supus unor restricții cum ar fi: proprietățile fizico-chimice și mecanice ale obiectului de prelucrat, anumite condiții de aplicare a fenomenului de inducție electromagnetică, în vederea preîncălzirii obiectului de prelucrat. Între perturbațiile care influențează procesul tehnologic, poate fi evidențiată, spre exemplu, cea determinată de uzura cuțitului în timpul aşchierii, implicit o modificare a unor unghiuri ale acestuia în timpul prelucrării. Principalele ieșiri din sistem sunt piesa prelucrată cu o anumită precizie și calitate, precum și materialul prelevat sub formă de aşchii.

3.3.1.2. - Funcții obiectiv pentru modelul generalizat al sistemului

Prelucrarea prin strunjire cu preîncălzire inductivă reprezintă rezultatul interacțiunii elementelor factorilor de influență în spațiul de lucru, interacțiune finalizată prin prelevarea de material de pe suprafața obiectului de prelucrat. Factorii de influență trebuie să fie situați pe nivele corespunzătoare, astfel încât să se poată desfășura aşchieria. Ca funcții obiectiv ale sistemului tehnologic pot fi considerate:

- forța de aşchiere (componentele forței de aşchiere), respectiv presiunea de aşchiere, a cărei scădere este determinată, în principal, de creșterea prelucrabilității prin aşchiere a cilindrului de laminor în urma încălzirii de suprafață prin inducție electromagnetică [3][4][6][19][20][21][25][29][30][43][44][52][54]

- rugozitatea suprafeței prelucrate, aspect ce interesează în sensul că o scădere a rugozității implică reducerea numărului de treceri la etapa de rectificare cilindrică exterioară aplicată după tratamentul termic de călire de suprafață, ce succede aşchierea [3][4][6][19][21][43][52][54][55][56][57][76]

Aceste două funcții obiectiv au fost analizate în cadrul modelului matematic creat și verificat în capitolele următoare ale tezei de doctorat;

- duritatea materialului prelucrat;
- uzura, respectiv durabilitatea cuțitului de strung;
- timpul de lucru, respectiv productivitatea prelucrării;
- energia consumată etc.

3.3.1.3. Factorii de influență potențiali la prelucrarea prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață

Pornind de la studiul stadiului actual al prelucrării prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, reiese că această prelucrare este rezultatul acțiunii și interacțiunii unui număr de factori de influență ce pot fi considerați elemente aparținătoare a trei mulțimi disjuncte: [2][19][37][39][40][41][51][52][54][75][77]

- mulțimea factorilor de influență legați de obiectul de prelucrat $OP \Rightarrow P$;
- mulțimea factorilor de influență legați de scula aşchietoare $\Rightarrow S$;
- mulțimea factorilor de influență legați de sistemul de preîncălzire prin inducție electromagnetică $\Rightarrow I$.

Toate aceste mulțimi sunt discrete și ele cuprind un număr finit de elemente, care pot fi evidențiate distinct (D) sau grupate în submulțimi sugestive (SM).

Alcătuirea acestor mulțimi, într-o variantă personală, dar care nu epuizează alte puncte de vedere, se prezintă în cele ce urmează:

a) Mulțimea factorilor de influență FI, legați de obiectul de prelucrat (P), este formată din următoarele elemente:

$E_{IP} \Rightarrow$ natura materialului OP (rezistența la rupere a acestuia, permitivitatea electrică, permeabilitatea magnetică, duritatea)

$E_{DP} \Rightarrow$ diametrul de prelucrat

$E_{RP} \Rightarrow$ rugozitatea inițială a suprafeței ce se prelucrează etc.

b) Mulțimea factorilor de influență legați de scula așchietoare (S) este formată din următoarele elemente:

$E_{IS} \Rightarrow$ natura materialului din care este confecționată scula așchietoare:

$E_{US} \Rightarrow$ geometria părții așchietoare (unghiurile sculei așchietoare), element ce poate fi privit ca sumă a elementelor distincte reprezentate de fiecare din unghiurile cuțitului:

$$E_{US} = \{E_{USi}\}, i=1 \dots n,$$

unde n-numărul unghiurilor analizate ale sculei

(α, γ, K, K_1), etc.)

$E_{RS} \Rightarrow$ raza de ascuțire a sculei așchietoare etc.

c) Mulțimea factorilor de influență legați de sistemul de preîncălzire prin inducție electromagnetică (I) poate fi reprezentată de E_I - temperatura din zona de așchiere sau, indirect, de elementele instalației de încălzire inductivă ce influențează această temperatură $E_I = \{E_{I1}, E_{I2}, E_{I3}, E_{I4}, E_{I5}\}$, în care:

$E_{1I} \Rightarrow$ curentul în circuitul de medie frecvență;

$E_{2I} \Rightarrow$ tensiunea electrică în circuitul de medie frecvență;

$E_{3I} \Rightarrow$ unghiul de defazare φ ;

$E_{4I} \Rightarrow$ aspectele constructive ale inductorului;

$E_{5I} \Rightarrow$ frecvența curentului de lucru, care determină adâncimea stratului încălzit.

Realizarea efectivă a prelucrării presupune și o poziție relativă spațială a elementelor celor trei mulțimi prezentate, precum și o anume cinematică. Acestea vor genera o nouă mulțime de factori de influență FI, suplimentari, care sunt reuniți în mulțimea C, astfel:

$C = \{E_{1C}; E_{2C}; E_{3C}; E_{4C}\}$, în care: $E_{1C} \Rightarrow$ distanța dintre inductor și piesa de prelucrat; $E_{2C} \Rightarrow$ turația de lucru (viteza mișcării principale - de rotație - a OP); $E_{3C} \Rightarrow$ avansul longitudinal cu care se realizează așchiera și care determină și timpul de menținere a inductorului, cu influență directă asupra temperaturii din zona de așchiere; $E_{4C} \Rightarrow$ adâncimea de așchiere.

Observație: În cazul cilindrilor de laminor, dreți și netezi, nu se pune problema avansului transversal.

Reuniunea mulțimilor P,S,I și C formează mulțimea FI: $FI = P \cup S \cup I \cup C$

În tabelul 3.3.1.3., se prezintă mulțimea factorilor de influență, iar în fig.3.3.1.3.- schema sistemului tehnologic de prelucrare prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, în care s-au identificat FI potențiali și au fost grupați în submulțimi disjuncte.

Precizăm că valorile de interes tehnologic pentru factorii de influență au fost prezentate în cadrul Capitolului 2, la descrierea cilindrilor de laminor și a instalației de strunjire cu preîncălzire inductivă.

Mulțimea	Simbol		Denumirea
FI legați de OP (P)	E_{1P}		natura materialului
	E_{2P}		diametrul de prelucrat
	E_{3P}		rugozitatea inițială
FI legați de Scula așchietoare(S)	E_{1S}		natura materialului
	$E_{2S} = \{ E_{2Si} \}$		unghiurile sculei așchietoare (i-ungh.analiz.)
	E_{3S}		raza de ascuțire a sculei așchietoare
FI legați de sistemul de Preîncălzire prin inducție electromag.(I)	E_i (temp.din zona de așchiere)	E_{1I}	curentul în circuitul de medie frecvență
		E_{2I}	tensiunea el.în circuitul de medie frecvență
		E_{3I}	unghiul de defazare φ
		E_{4I}	aspectele constructive ale inductorului
		E_{5I}	frecvența curentului de lucru
FI Suplimentari (C)	E_{1C}		distanța dintre inductor și piesa de prelucrat
	E_{2C}		turația de lucru
	E_{3C}		avansul longitudinal
	E_{4C}		adâncimea de așchiere

Tabel 3.3.1.1. - Factorii de influență potențiali ai prelucrării - Fig.3.3.1.3.

FACTORI DE INFLUENTA

FI legati de OP (P)
 E_{1P} - natura materialului
 E_{2P} - diametrul de prelucrat
 E_{3P} - rugozitatea initială

FI legati de scula aşchietoare(S)
 E_{1S} - natura materialului
 E_{2S} - unghiurile sculei aşchietoare
 $E_{2S} = \{E_{2Si}\}$, i-unghiul
 E_{3S} - raza de ascutire a sculei aşchietoare

FI legati de sistemul de incalzire inductiva(I)
 E_{1I} -curent circuit MF
 E_{2I} -tensiune el. circ.MF
 E_{3I} -unghi defazare φ
 E_{4I} -aspecte constructive ale inductorului
 E_{5I} - frecvența curentului de lucru

FI suplimentari (C)
 E_{1C} -distanță între inductor și OP
 E_{2C} -turația de lucru
 E_{3C} -avans longitudinal
 E_{4C} -adâncimea de aşchiere

FUNCTII OBIECTIV

Forța de aşchiere $F(F_x, F_y, F_z)$, respectiv presiunea de aşchiere
 Rugozitatea suprafeței prelucrate R_a
 Duritatea după prelucrare (HRC)
 Uzura sculei aşchietoare (h_α, h_γ) , respectiv durabilitatea sculei
 Productivitatea prelucrării Q_p , respectiv timpul de prelucrare t_p etc.

SISTEM TEHNOLOGIC

STRUCTURA

 PROGRA-
 ME
 FUNCTII

 PROCESE
 DE TRANS-
 FORMARE
 TEHNO-
 LOGICĂ

3.3.2. - Modelarea matematică a acțiunii principalilor factori de influență asupra componentelor forței de așchiere și rugozității suprafeței prelucrate

3.3.2.1. - Alegerea modelului matematic

În cele ce urmează, ne propunem ca, pornind de la datele existente în literatura de specialitate - cu privire la influența preîncălzirii inductive a stratului de suprafață la unele oțeluri supuse prelucrării prin așchiere la strung [2] - să stabilim, cu ajutorul modelării matematice, o tehnologie aplicabilă tuturor oțelurilor greu prelucrabile datorită proprietăților fizico-mecanice superioare, o aplicație directă fiind în domeniul prelucrării și recondiționării (recalibrării) cilindrilor de laminor.

În acest sens, stabilim ca obiectiv al cercetării modelarea matematică a acțiunii factorilor de influență: x_1 - “rezistența la rupere a oțelului supus așchierii”; x_2 - “avansul longitudinal”; x_3 - “adâncimea de așchiere”; x_4 - “temperatura (din zona de așchiere)”, asupra a patru funcții obiectiv: y_1, y_2, y_3 - “componentele forței de așchiere F_x, F_y, F_z ” și y_4 - “rugozitatea suprafeței prelucrate R_a ”, având la bază, ca și date preliminare, necesare creării modelului matematic, rezultatele experimentale obținute pentru oțelurile OLC45, OLC60, Rp3, T105M120 [2], la valori constante ale celorlalți parametri care influențează procesul (cuțit de strung cu plăcuță P30, $\alpha=10^\circ$, $\gamma=15^\circ$, $K=45^\circ$, $K_1=15^\circ$, $\lambda=4^\circ$, $r=2\text{mm}$; diametrul inițial al cilindrului $D_0=50\text{mm}$ și turația $n=480$ rot/min, deci viteză de așchiere v - constantă).

Precizăm că alegerea factorului de influență x_1 - “rezistența la rupere a oțelului supus așchierii”, ca și caracteristică standardizată, de identificare, a oțelului prelucrat, în cadrul modelului matematic, a fost făcută avându-se în vedere concluziile studiilor analitico-experimentale evidențiate în literatura de specialitate

[21][22][58][66], cu privire la procesul de aşchiere, potrivit căroră, în cazul oţelurilor, influenţa materialului prelucrat în cadrul procesului, respectiv asupra forţei de aşchiere, este evidenţiată prin relaţii confirmate experimental de forma:
 $F=C_F R_m^m$

Matematic, obiectivul cercetării constă în precizarea dependenţelor funcţionale:

$$y_i = f(x_1, x_2, x_3, x_4), \quad i = \overline{1,4} \quad (1)$$

În cazul modelării analitice, dependenţa (1) se evidenţiază pornindu-se de la enunţarea unor ipoteze simplificatoare privind sistemul analizat, ipoteze pe baza cărora se determină un sistem de ecuaţii diferenţiale care se acceptă că descriu fenomenologia proceselor de transformare specifice sistemului studiat. În urma integrării, în condiţii limită, a ecuaţiilor care compun sistemul, rezultă dependenţa, adică modelul analitic al sistemului [19][20][65][70][71][72][73][74][78][79]. Obiectivele urmărite prin modelare constau în:

- studiul şi analiza sistemului cercetat cu ajutorul modelului, pentru obţinerea de date mai complete şi de noi legităţi ale acestuia;
- evidenţierea mecanismului de acţiune a factorilor de influenţă asupra sistemului cercetat;
- verificarea ipotezelor referitoare la interacţiunile interne ale sistemului;
- predicţia stării şi comportamentului sistemului;
- calculul şi proiectarea sistemului;
- optimizarea sistemului în raport cu diferite criterii;
- conducerea sistemului în spaţiu şi timp.

În majoritatea cazurilor reale, sistemele tehnologice sunt: complexe, caracterizate printr-un număr foarte mare de factori de influenţă, de natură diferită;

slab organizate, funcțiile obiectiv putând fi realizate cu o certitudine limitată, cu caracter difuz, având interacțiuni puternice între variabile, ceea ce are drept consecință alterarea preciziei transformărilor realizate.

Din aceste motive, obținerea unor modele analitice care să furnizeze rezultate utilizabile tehnologic, în cazul acestor sisteme, este extrem de dificilă sau chiar imposibilă, apelându-se tot mai frecvent la modelarea experimentală sau la cea mixtă, analitico-experimentală. [19][20][73][74][78]

Principalele cerințe impuse modelelor, în general, și celor experimentale, în particular, sunt: capacitatea de a reflecta adecvat sistemul cercetat, în sensul că valorile funcțiilor obiectiv estimate cu ajutorul modelului să nu difere semnificativ de cele reale; aptitudinea de a furniza informații suficient de precise privind direcția de orientare a experimentării, în vederea atingerii domeniului optim al funcțiilor obiectiv.

Cea mai întâlnită formă a funcției matematice de legătură între funcția obiectiv și factorii de influență (1), în cazul modelelor experimentale, este forma polinomială, datorită facilităților de prelucrare matematică pe care le implică, putându-se, însă, opta și pentru funcții de formă exponențială, logaritmică, trigonometrică etc.

La baza stabilirii funcției polinomiale stă metoda “celor mai mici pătrate”:
[19][20][72][73]

Presupunem că trebuie stabilită relația funcțională $y = f(x)$. Pe baza a N date referitoare la valorile lui x , se obțin N valori ale lui y , fiecare din cuplurile $x_i y_i$ reprezentând coordonatele unui punct al curbei de regresie corespunzătoare funcției.

Deoarece y este o mărime aleatoare, probabilitatea ca prin toate punctele experimentale să se poată trasa o curbă continuă, de formă prescrisă, este foarte mică și, în orice caz, cel puțin unele din aceste puncte vor fi depărtate de curba care reprezintă datele (curba de regresie).

Estimarea dispersiei punctelor față de curba de regresie este dată de relația:

$$S_{\text{con}}^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - y_i)^2 \quad (2)$$

în care:

\tilde{y}_i - valoarea calculată în punctul i ;

y_i - valoarea experimentală în punctul i ;

S_{con}^2 - dispersia de concordanță dintre valorile calculate și cele experimentale.

Dintre curbele de acest fel, cea care va reprezenta cel mai bine datele experimentale va fi aceea pentru care S_{con}^2 va fi minimă.

Metoda celor mai mici pătrate constă în determinarea valorilor coeficienților b_j ai funcției $y=f(x)$, pentru care S_{con}^2 devine minimă; derivând expresia (2) în raport cu fiecare din coeficienții b_j , se obține un sistem de l ecuații cu l necunoscute, de tipul:

$$\frac{\partial}{\partial b_j} \left[\sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - y_i)^2 \right] = 0 \quad (3)$$

$j=0,1,\dots,l-1$ (l este numărul de termeni ai ecuației de regresie) a cărei rezolvare permite determinarea coeficientului b_j

De exemplu, considerând funcția de gradul întâi, de o singură variabilă $\tilde{y}=b_0x_0+b_1x_1$ (4), în care x_0 este o variabilă fictivă, egală cu unitatea, și introducând relația (4) în (3), rezultă expresia:

$$\Phi = S_{\text{con}}^2 = \frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y_i - b_0x_{0i} - b_1x_{1i})$$

al cărei minim se determină prin anularea derivatelor parțiale:

$$\frac{\partial \phi}{\partial b_0} = 0 \quad \text{și} \quad \frac{\partial \phi}{\partial b_1} = 0$$

Sistemul obținut (sistem de ecuații normale) este:

$$b_0 \sum_{i=1}^N x_{0i}^2 + b_1 \sum_{i=1}^N x_{0i} x_{1i} = \sum_{i=1}^N x_{0i} y_i$$

$$b_0 \sum_{i=1}^N x_{0i} x_{1i} + b_1 \sum_{i=1}^N x_{1i}^2 = \sum_{i=1}^N x_{1i} y_i$$

....

Rezolvarea acestui sistem pentru $x_{0i} = 1$ conduce la relații de calcul ale coeficienților b_0 și b_1 .

Cele prezentate pot fi generalizate la o funcție liniară de k variabile $\tilde{y} = \sum_{i=0}^k b_i x_i$

și, în mod analog, se poate alcătui un sistem de ecuații normale pentru funcții polinomiale de grad superior, termenii neliniari ai ecuației de regresie fiind considerați variabile:

$$\tilde{y} = \sum_{i=0}^K b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^K b_{ij} x_i x_j$$

Matriceal, sistemul de ecuații normale capătă următoarea formă:

$$(X'X) B = X'Y \quad (5)$$

în care:

X - matricea valorilor factorilor de influență;

Y - matricea coloană a valorilor experimentale ale parametrului optimizării;

B - matricea coloană a coeficienților de regresie;

X' - transpusa matricei X.

$$X = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{11} \dots & x_{k1} \\ x_{02} & x_{12} \dots & x_{k2} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{0n} & x_{1n} \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \quad X' = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} \dots & x_{0n} \\ x_{11} & x_{12} \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{k1} & x_{k2} \dots & x_{kn} \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}, \text{ în general } n \neq k$$

Soluția sistemului, prin înmulțirea la stânga a ecuației (5), cu matricea inversă

$$(X'X)^{-1} : \quad B = (X'X)^{-1} X'Y \quad (6)$$

Adaptarea metodei menționate la obiectivul stabilit prin relația (1) presupune urmarea mai multor etape, putându-se începe cu organizarea unui experiment factorial complet (EFC), pe baza rezultatelor experimentărilor preliminare, care constă, în esență, în varierea dirijată a tuturor factorilor (parametrilor procesului).

Experimentul factorial de ordinul întâi constă în varierea simultană a tuturor factorilor după un program bine determinat, în prezentarea modelului matematic sub forma unui polinom de gradul întâi și studierea acestuia prin metodele statisticii matematice. Se notează valorile maxime și minime ale factorilor de influență cu simbolurile + 1 și - 1, programul experimental scriindu-se sub forma unei matrice (care reprezintă matricea X din relația (5)), la baza căreia stă tabelul creat prin efectuarea tuturor combinațiilor posibile ale factorilor de influență, în cazul modificării lor la cele două niveluri (maxim și minim).

3.3.2.2. Modelarea matematică a acțiunii principalilor factori de influență asupra componentelor forței de așchiere

Pe baza celor menționate la paragraful 3.3.2.1., respectiv utilizând rezultatele experimentale din sursa bibliografică [2], se constituie tabelul care stă la baza construirii matricei programării, în vederea realizării obiectivului stabilit prin relația (1):

Nr. Crt	daN		mm		X ₃ [mm]		X ₄ [°C]		Y ₁ [daN]	Y ₂ [daN]	Y ₃ [daN]
	X ₁ [-----] mm ²	X ₂ [-----] rot									
1	- 1	62	- 1	0,14	- 1	0,5	- 1	25	6	10	18
2	+1	90	- 1	0,14	- 1	0,5	- 1	25	40	56	105
3	-1	62	+1	0,42	- 1	0,5	- 1	25	14	30	65
4	+1	90	+1	0,42	- 1	0,5	- 1	25	75	166	365
5	- 1	62	- 1	0,14	+1	2,0	- 1	25	20	30	72
6	+1	90	- 1	0,14	+1	2,0	- 1	25	124	180	416
7	- 1	62	+1	0,42	+1	2,0	- 1	25	64	81	175
8	+1	90	+1	0,42	+1	2,0	- 1	25	363	446	1000
9	- 1	62	- 1	0,14	- 1	0,5	+1	550	4	6	11
10	+1	90	- 1	0,14	- 1	0,5	+1	550	19	34	60
11	- 1	62	+1	0,42	- 1	0,5	+1	550	7	16	35
12	+1	90	+1	0,42	- 1	0,5	+1	550	50	94	234
13	- 1	62	- 1	0,14	+1	2,0	+1	550	11	17	40
14	+1	90	- 1	0,14	+1	2,0	+1	550	67	106	254
15	- 1	62	+1	0,42	+1	2,0	+1	550	31	45	93
16	+1	90	+1	0,42	+1	2,0	+1	550	210	281	593

Tabel 3.3.2.2. - Tabelul care stă la baza construirii matricei programării

x₁ - rezistența la rupere a materialului prelucrat;

x₂ - adausul longitudinal;

x₃ - adâncimea de așchiere;

x₄ - temperatura

y₁, y₂, y₃ - forța de așchiere (componentele F_x, F_y, F_z).

Pentru construirea matricei programării X, în coloana întâi a tabelului (în locul numărului curent) se trec valorile variabilei fictive x_0 (identice cu +1), care este utilă la calcularea termenului liber al polinomului.

Această programare a experimentului prezintă o serie de avantaje, motiv pentru care se folosește deseori la obținerea modelelor matematice [19][20][42][68][71][74]. Astfel, pe baza acestui program, se pot calcula coeficienții ecuației de regresie liniară $\tilde{y} = b_i x_i, i = \overline{1,4}$, după relația:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u \quad (7)$$

având în vedere proprietățile matricei programării de simetrie, normare, respectiv ortogonalitate:

$$\sum_{u=1}^N x_{iu} = 0; \quad \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 = N; \quad \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} = 0$$

unde $i, j = \overline{1, n}$, iar $i \neq j$; N - numărul punctelor experimentale (numărul rândurilor din matricea programării); $N = 16$; n - numărul factorilor de influență, $n=4$.

Suplimentar, se pot calcula coeficienții interacțiunilor dintre factorii de influență, prin suplimentarea matricei programării cu coloane corespunzătoare produselor factorilor.

Coeficienții (b_{ij}) interacțiunilor se calculează cu relația:

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u \quad (i \neq j) \quad (8),$$

deoarece proprietatea de ortogonalitate a matricei programării se păstrează dacă aceasta conține și coloana $x_i x_j$. În acest mod, se poate obține un model matematic de forma:

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n b_{ij} x_i x_j \quad (9)$$

unde $N=16$, $n=4$.

Astfel, modelul matematic pentru toate cele trei funcții obiectiv analizate (F_x , F_y și F_z) este un polinom de ordinul întâi, de forma:

$$y_{1,2,3} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4 \quad (10)$$

unde b_i ($i=\overline{0,4}$) și b_{ij} ($i,j=\overline{1,4}$) sunt coeficienții de regresie ai polinomului (modelului).

Semnificațiile lui $y_1, y_2, y_3, x_1, x_2, x_3, x_4$ au fost precizate anterior.

Valorile coeficienților de regresie ai polinomului (10), determinați prin relațiile (7) și (8), cu ajutorul programului STATGRAPHICS, pentru cazul analizat, sunt următoarele (doar pentru cei semnificativi):

Pentru funcția obiectiv y_1 (componenta F_x a forței de așchiere):

$b_0=290,253$; $b_1= -3,40774$; $b_2= -945,026$; $b_3=224,655$; $b_4=-0,0730952$; $b_{12}=11,8941$
 $b_{13}=2,8869$; $b_{23}=219,643$.

Pentru funcția obiectiv y_2 (componenta F_y a forței de așchiere):

$b_0=293,369$; $b_1= -3,55357$; $b_2= -1133,25$; $b_3=-238,548$; $b_4=-0,0952391$; $b_{12}=16,0077$;
 $b_{13}=3,28571$; $b_{23}=190,476$.

Pentru funcția obiectiv y_3 (componenta F_z a forței de așchiere):

$b_0=520,22$; $b_1= -8,13393$; $b_2= -2031,38$; $b_3=-418,738$; $b_4= -0,213333$; $b_{12}=36,0332$;
 $b_{13}=7,42857$.

Prin urmare, ecuațiile modelului matematic devin:

$$y_1 = F_x = 290,253 - 3,40774x_1 - 945,026x_2 - 224,655x_3 - 0,0730952x_4 + \\ + 11,8941x_1x_2 + 2,8869x_1x_3 + 219,643 x_2x_3$$

$$y_2 = F_y = 293,369 - 3,55357x_1 - 1133,25x_2 - 238,548x_3 - 0,0952391x_4 + \\ + 16,0077x_1x_2 + 3,28571x_1x_3 + 190,476 x_2x_3$$

$$y_3 = F_z = 520,22 - 8,13393x_1 - 2031,38x_2 - 418,738x_3 - 0,213333x_4 + \\ + 36,0332x_1x_2 + 7,42857x_1x_3$$

unde: x_1 - rezistența la rupere a oțelului prelucrat;

x_2 - avansul longitudinal;

x_3 - adâncimea de așchiere;

x_4 - temperatura.

Determinarea histogramei efectelor provocate asupra funcțiilor obiectiv, când factorii de influență parcurg intervalul dintre nivelele inferioare și superioare, are la bază următorul raționament: [19][20][46][47][48][61][62][72][73][74]

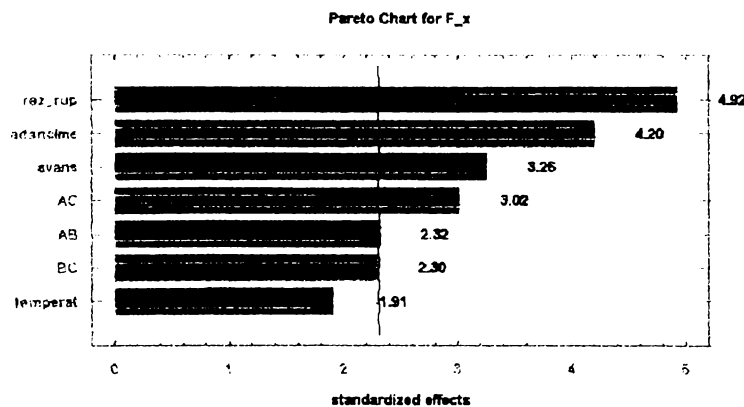
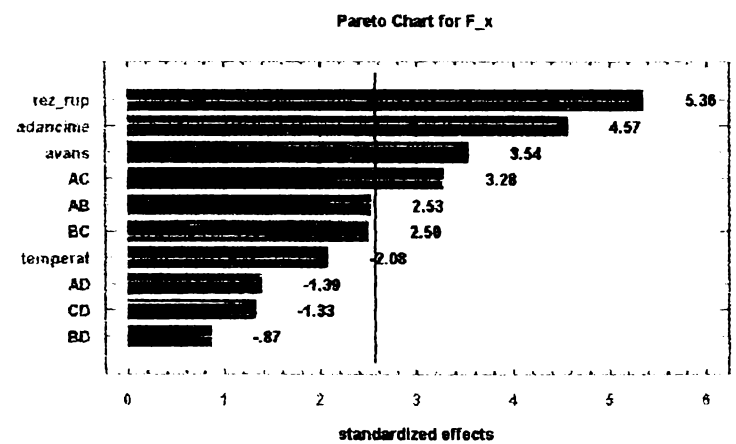
Prin definiție, efectul global produs de factorul de influență x_k ($k=\overline{1,4}$), E_k , asupra funcției obiectiv y_i ($i=\overline{1,3}$) este diferența între media valorilor măsurate ale funcției obiectiv, când x_k este pe nivelul superior ($x_{k\text{sup}}$) și media valorilor măsurate ale funcției obiectiv, când x_k se află pe nivelul inferior ($x_{k\text{inf}}$). Efectul mediu produs de factorul x_k asupra funcției obiectiv este media diferențelor valorilor

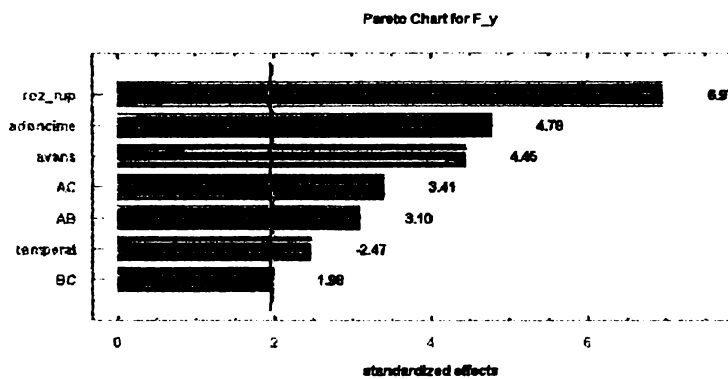
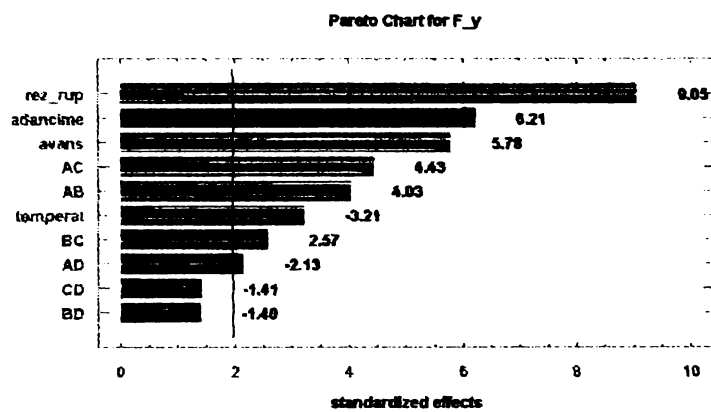
medii sus-menționate. Valoarea medie a răspunsului (efectul mediu al factorului x_k) \overline{E}_T , este valoarea răspunsului când factorii de influență sunt situați pe nivel central, mijlociu, între nivelul minim și cel maxim; ea reprezintă valoarea răspunsului în centrul domeniului experimental.

În general, dacă un factor de influență se află pe un anumit nivel, atunci această stare influențează efectul celorlalți factori de influență asupra funcției obiectiv. În această situație, se spune că există interacțiuni între factorii de influență. Interacțiunile pot fi și ele (ca și efectele) calculate cu ajutorul valorilor măsurate ale funcției obiectiv.

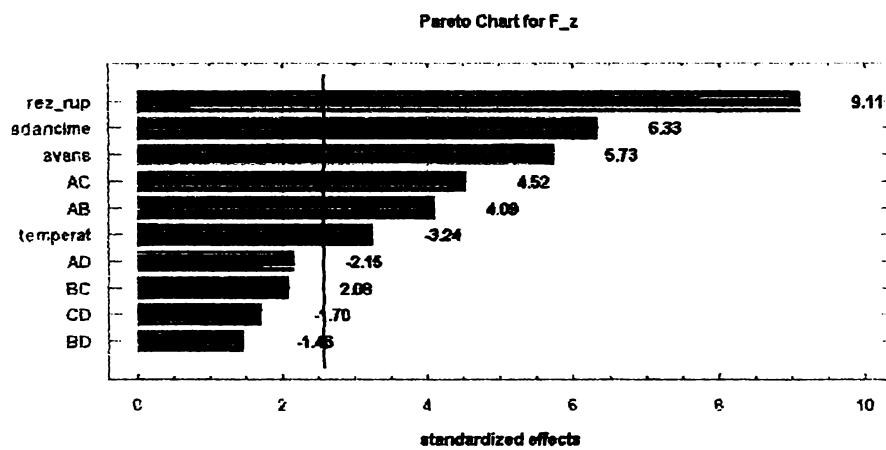
Prin definiție, efectul produs de interacțiunea între factorul x_k și factorul x_l , E_{kl} , asupra funcției obiectiv (sau, pe scurt, interacțiunea între acești factori) este diferența efectelor E_k^+ și E_k^- , iar interacțiunea medie, \overline{E}_{kl} , este egală cu jumătatea acestei diferențe.

Histogramele efectelor provocate asupra funcțiilor obiectiv F_x , F_y , F_z , determinate cu ajutorul programului STATGRAPHICS, au următoarea formă:





1



1

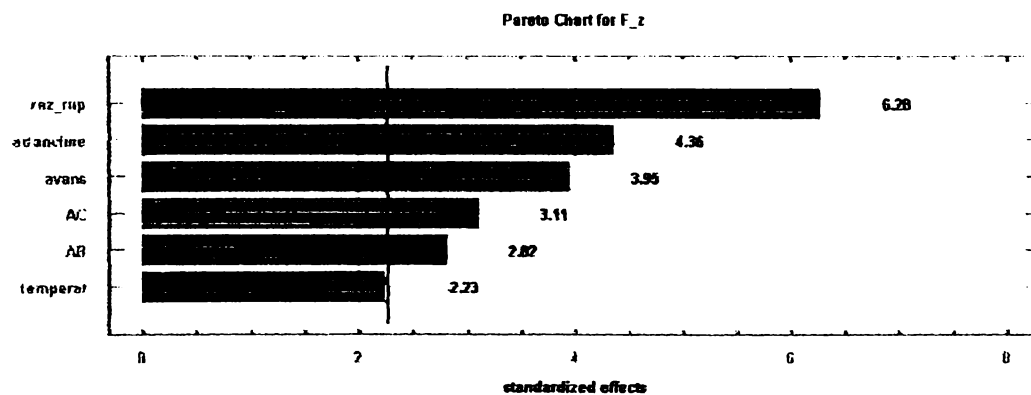


Fig.3.3.2.2.1. Histogramele efectelor provocate asupra funcțiilor obiectiv

Observație: Notățiile la histograme $A=x_1$, $B=x_2$, $C=x_3$, $D=x_4$, $AB=x_1x_2$, $AC=x_1x_3$, $AD=x_1x_4$, $BC=x_2x_3$, $BD=x_2x_4$, $CD=x_3x_4$.

În figura 3.3.2.2.1., a fost stabilită și semnificația statistică a coeficienților polinomului de regresie. Semnificația coeficienților de regresie se stabilește cu ajutorul relației: [19][20]

$$|b_j| > t_{\alpha, Q(c-1)} S_{b_j} \quad (12)$$

în care:

$t_{\alpha, Q(c-1)}$ - valoarea criteriului “Student”, aleasă tabelar, funcție de pragul de semnificație α impus de experimentator și de numărul $Q(c-1)$ de replici;

Q - numărul de puncte replicate;

c - numărul de replici executate în punctul central;

S_{b_j} - abaterea medie pătratică $\pm\sqrt{S_{b_j}^2}$, cu care se calculează coeficientul b_j .

Dispersia de estimare a coeficienților de regresie, valabilă și pentru coeficienții interacțiunilor, este:

$$S_{b_j}^2 = \frac{S_0^2}{\sum_{i=1}^N x_{ij}^2} = \frac{S_0^2}{N}; \quad j = \overline{1,4}, N=16,$$

în care:

$$S_0^2 = \frac{\sum_{v=1}^c (y_{0v} - \bar{y}_0)^2}{c-1}$$

unde:

y_{0v} - valorile măsurate $y_{01} \dots y_{0c}$ ale funcției obiectiv în centrul domeniului experimental;

\bar{y}_0 - media valorilor y_{0v} măsurate ale funcției obiectiv în centrul domeniului experimental.

În cazul în care relația (12) nu este adevărată, se poate considera că valoarea calculată a coeficientului respectiv nu este statistic diferită de zero, deci termenul polinomului de regresie care cuprinde factorul de influență (sau interacțiunea) înmulțit cu acest coeficient poate fi neglijat din punct de vedere al efectului pe care îl provoacă asupra funcției obiectiv.

Pe baza acestui criteriu, în figura 3.3.2.2.1. au fost trasate - cu ajutorul programului STATGRAPHICS - și histogramele efectelor provocate asupra funcțiilor obiectiv, ținându-se cont doar de coeficienții semnificativi.

Pentru stabilirea concordanței dintre valorile estimate cu ajutorul modelului și cele măsurate - figura 3.3.2.2.2. (grafice trasate cu ajutorul programului STATGRAPHICS) - se are în vedere că estimarea cantitativă a concordanței se realizează prin compararea a două dispersii: una datorată erorilor aleatoare de măsurare (dispersia reproductibilității, s_0^2) și alta datorată diferențelor existente între valorile măsurate ale funcției obiectiv, utilizate la calculul coeficienților de regresie, și valorile estimate (în aceleași puncte) cu ajutorul modelului, ale funcției obiectiv (dispersia de concordanță S_{conc}^2) [19][20][47][48][78][79]

Dispersia de concordanță se calculează cu relația:

$$S_{conc}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\tilde{y}_i - y_i)^2}{N - k'} \quad (13)$$

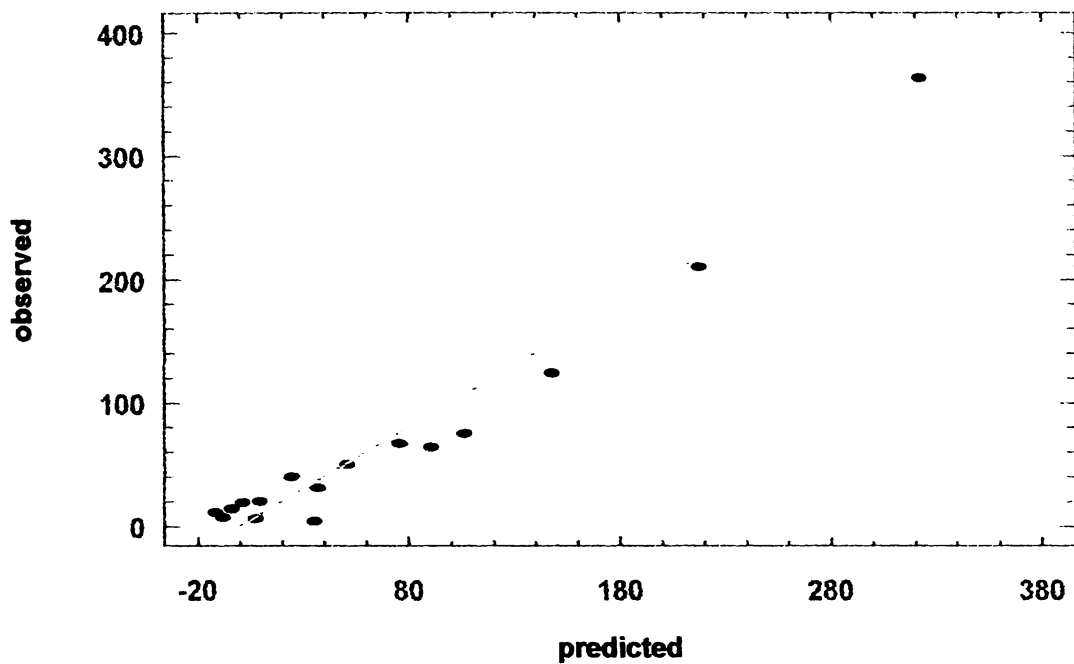
unde:

\tilde{y}_i - valorile funcției obiectiv estimate cu ajutorul modelului;

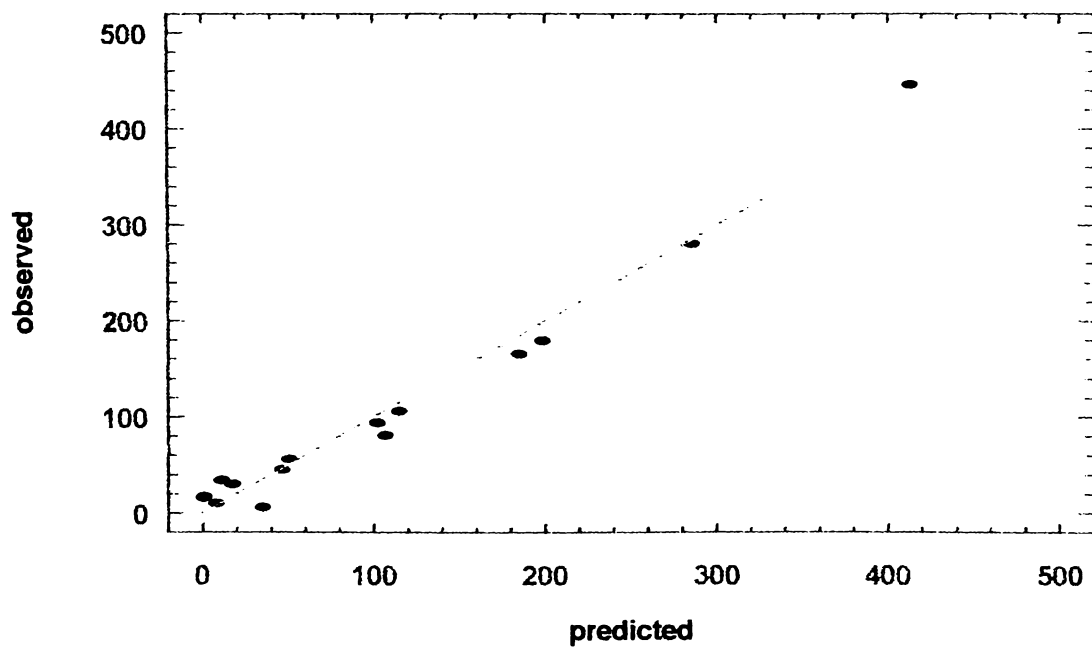
y_i - valorile măsurate ale funcției obiectiv;

($N - k'$) - numărul de grade de libertate, reprezentând diferența între volumul experimentului, $N(N=16)$ și coeficienții (semnificativi) ecuației de regresie (inclusiv b_0).

Diagnostic Plot for F_x



Diagnostic Plot for F_y



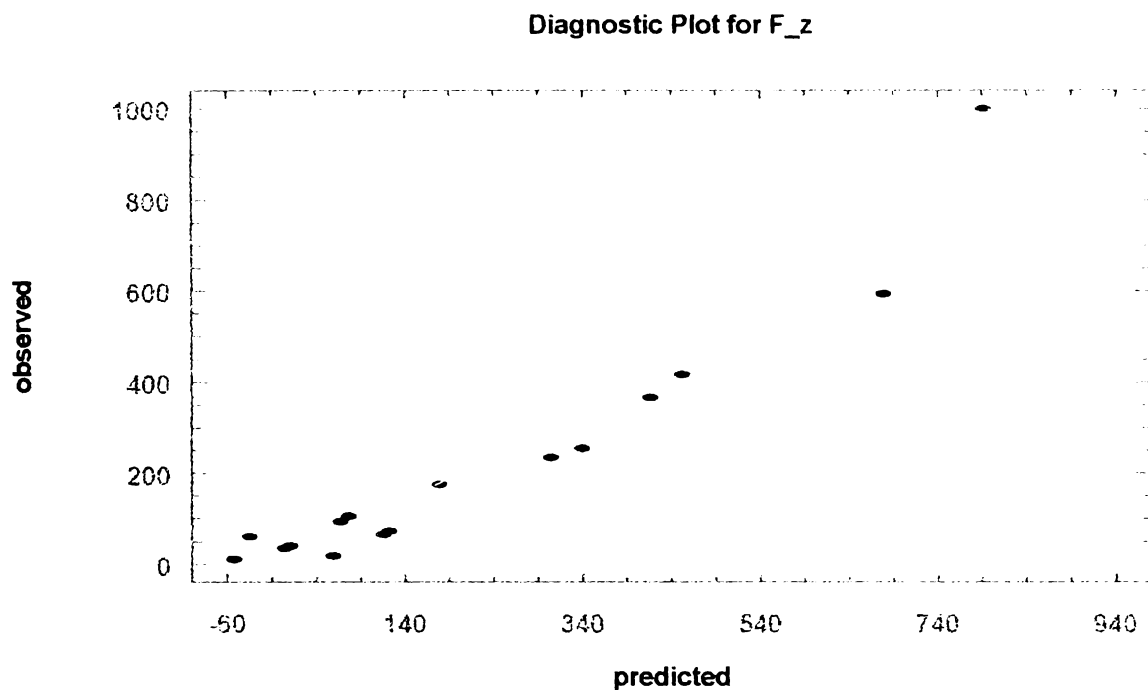


Fig.3.3.2.2.2. - Grafice pentru stabilirea concordanței dintre valorile estimate cu ajutorul modelului (“predicted”) și cele măsurate (“observed”)

Testul statistic aplicat pentru compararea celor două dispersii menționate (testul “F”) [19][20]: valoarea raportului dintre dispersia provocată asupra valorilor funcției obiectiv de către un anumit factor de influență sau o anumită interacțiune de ordinul 2 (considerăm că interacțiunile de ordin superior lui 2 generează efectele asupra funcției obiectiv) și dispersia provocată asupra valorilor funcției obiectiv de erorile experimentale reprezintă valoarea calculată (estimată) a criteriului “F”:

$$F_{\text{calc}} = \frac{s_{\text{conc}}^2}{s_0^2} \quad (14)$$

Dacă $F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$ (în care $F_{\text{tab}} = F_{\alpha, v_1, v_2}$), atunci

concordanța între valorile estimate și cele măsurate poate fi considerată mulțumitoare și, ca atare, modelul găsit se consideră că descrie adecvat procesul.

În expresia lui F_{tab} , v_1 și v_2 au semnificațiile:

v_1 -numărul de grade de libertate cu care se calculează s_{conc}^2 ; $v_1=N-k$

v_2 -numărul de grade de libertate cu care se calculează s_0^2 ; $v_2=c-1$.

Ținând cont de aceste considerente, cu ajutorul programului STATGRAPHICS, s-a determinat precizia de exprimare a modelului de ordinul întâi, găsit ca fiind de:

0,904669 în cazul funcției obiectiv F_x ;

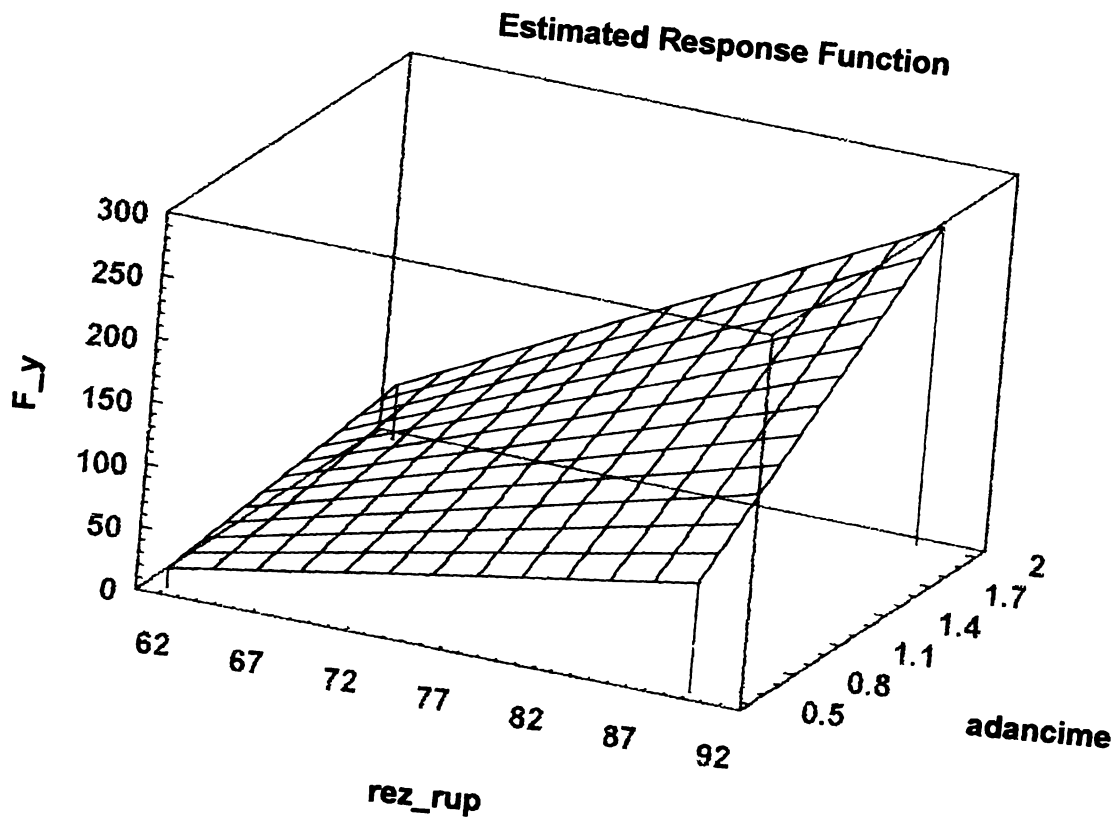
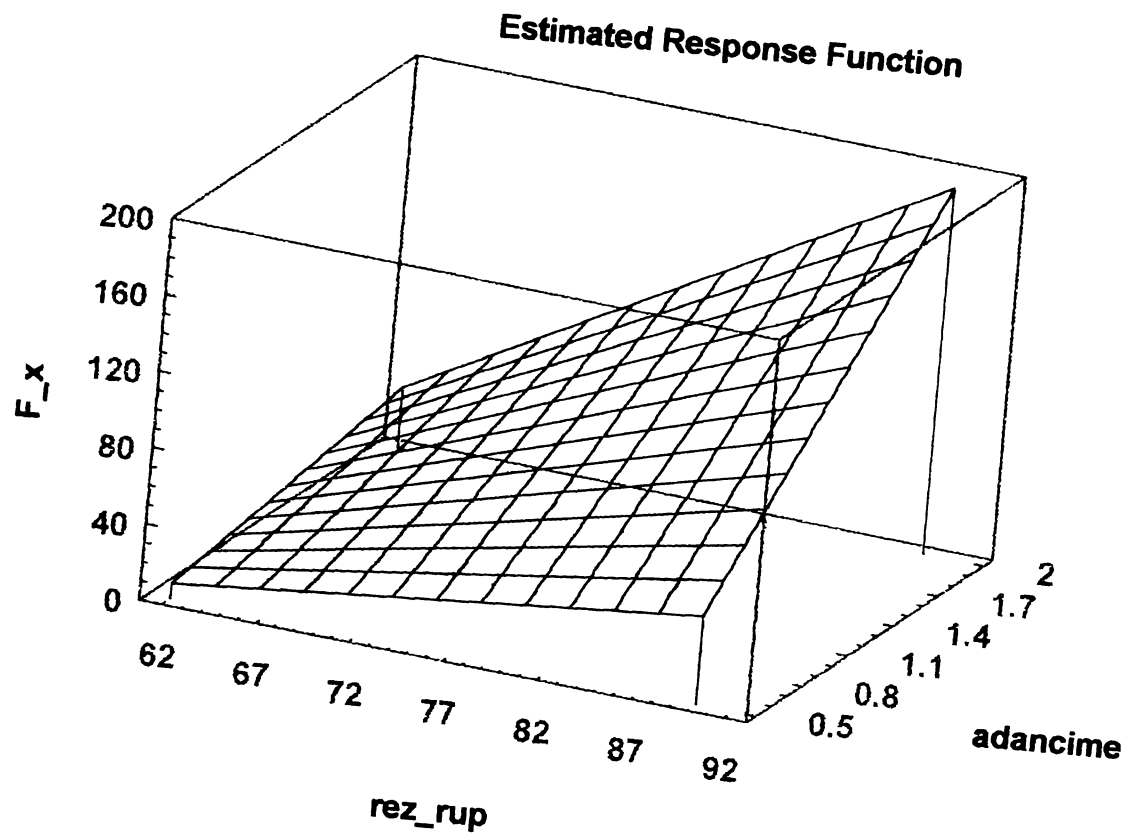
0,938673 în cazul funcției obiectiv F_y ;

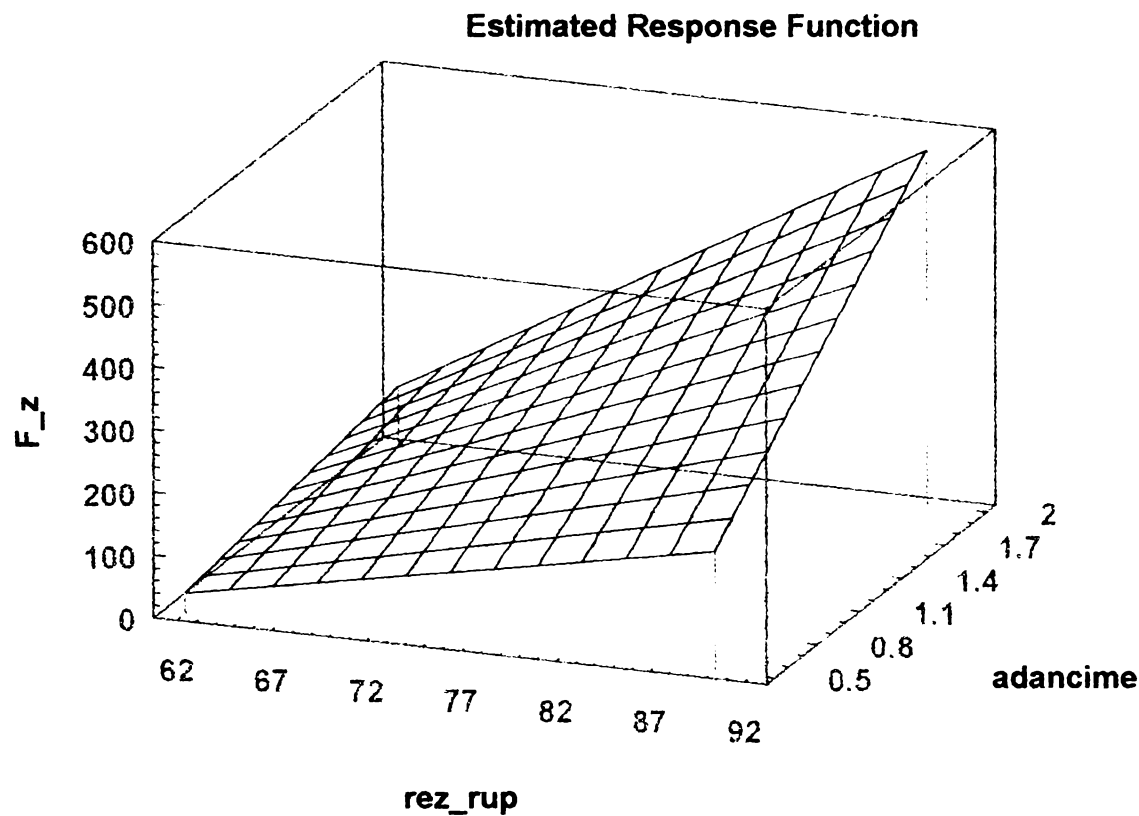
0,914804 în cazul funcției obiectiv F_z .

În figura 3.3.2.2.3., au fost trasate porțiuni din suprafața de răspuns corespunzătoare fiecărei funcții obiectiv, grupând, pe rând, doi câte doi, factorii de influență.

Precizăm că, în cadrul modelului matematic, interesează cu precădere domeniul de temperaturi de peste $300-400^{\circ}\text{C}$ (dar sub limita de început a transformărilor structurale), fapt pentru care s-a neglijat aspectul că, în general, în prima parte a domeniului de temperaturi (de până la aprox. 300°C), se înregistrează o ușoară creștere a rezistenței la rupere a oțelurilor încălzite [22][24][32][33][49][64][69] (aspect constatat experimental).

Fig.3.3.2.2.3. Suprafețele de răspuns corespunzătoare funcțiilor obiectiv $y_1=F_x$, $y_2=F_y$ și $y_3=F_z$



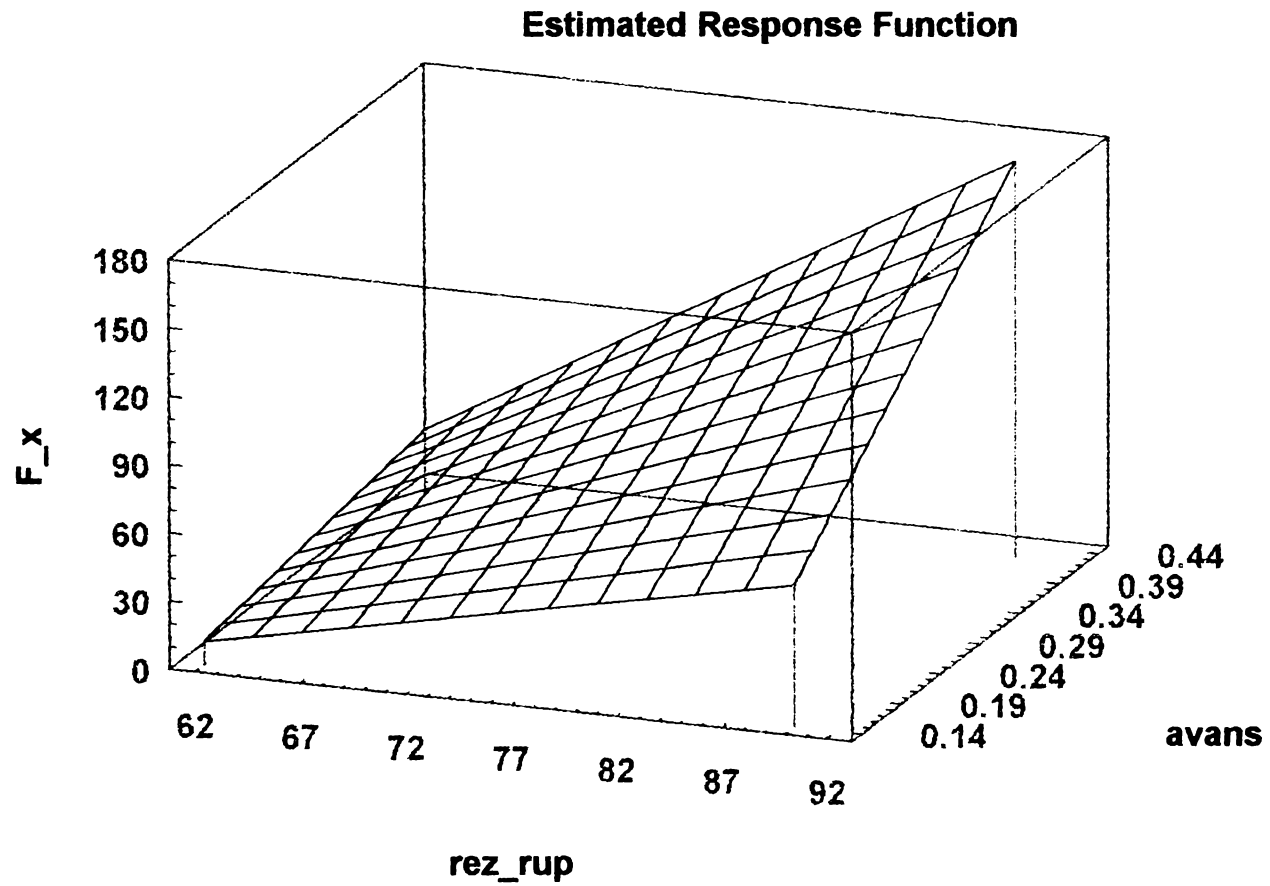


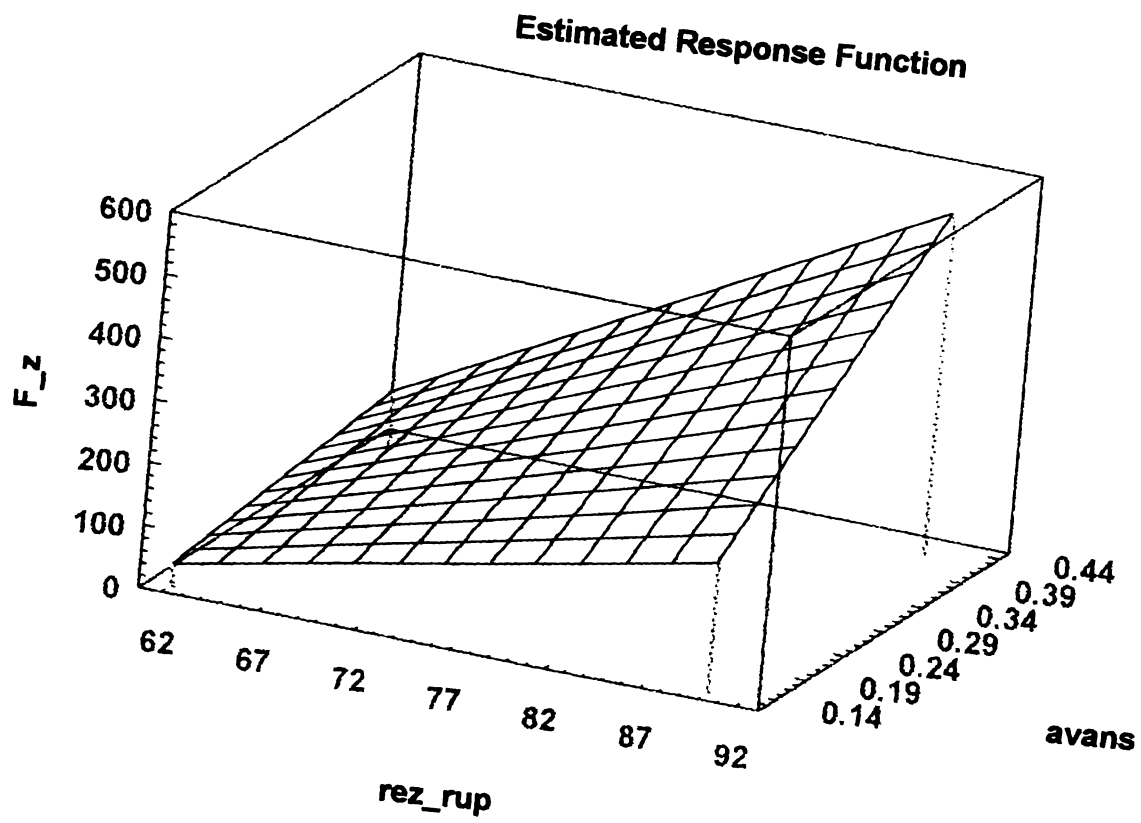
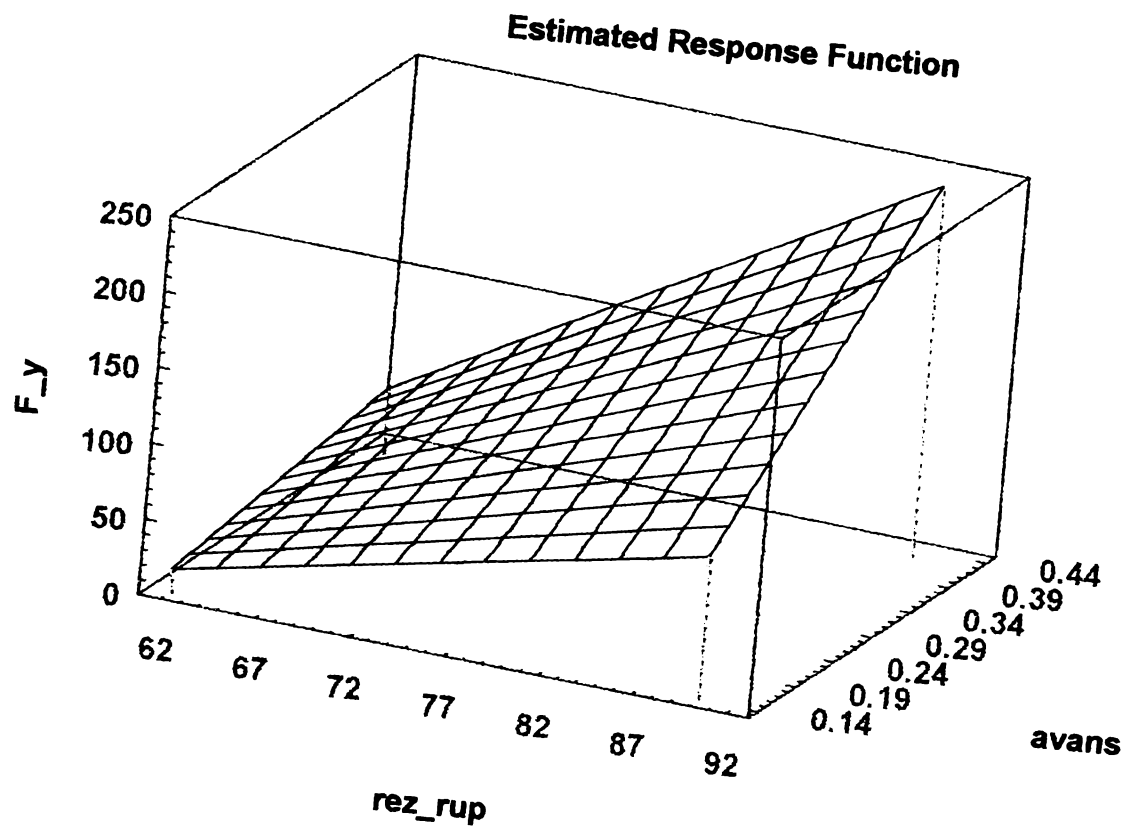
Din analiza histogramelor efectelor provocate asupra funcțiilor obiectiv F_x , F_y și F_z (fig.3.3.2.2.1.), se observă că ordinea factorilor de influență semnificativi - din punct de vedere al efectelor provocate - este următoarea: rezistența la rupere a materialului prelucrat, adâncimea de așchiere, avansul longitudinal, produsul dintre rezistența la rupere și adâncimea de așchiere, produsul dintre rezistența la rupere și avansul longitudinal, produsul dintre avansul longitudinal și adâncimea de așchiere, respectiv temperatura.

Din analiza suprafețelor de răspuns corespunzătoare funcțiilor obiectiv F_x , F_y și F_z (fig.3.3.2.2.3.), funcție de factorii de influență, rezistența la rupere a materialului prelucrat și adâncimea de așchiere, rezultă că la rezistență la rupere mică, scăderea valorii componentelor forței de așchiere odată cu scăderea valorii adâncimii de așchiere este mai mică decât la rezistența la rupere mare, la bază fiind conținutul de

carbon (carbon echivalent) mai mare al oțelului cu rezistență la rupere (duritate) mare [82]

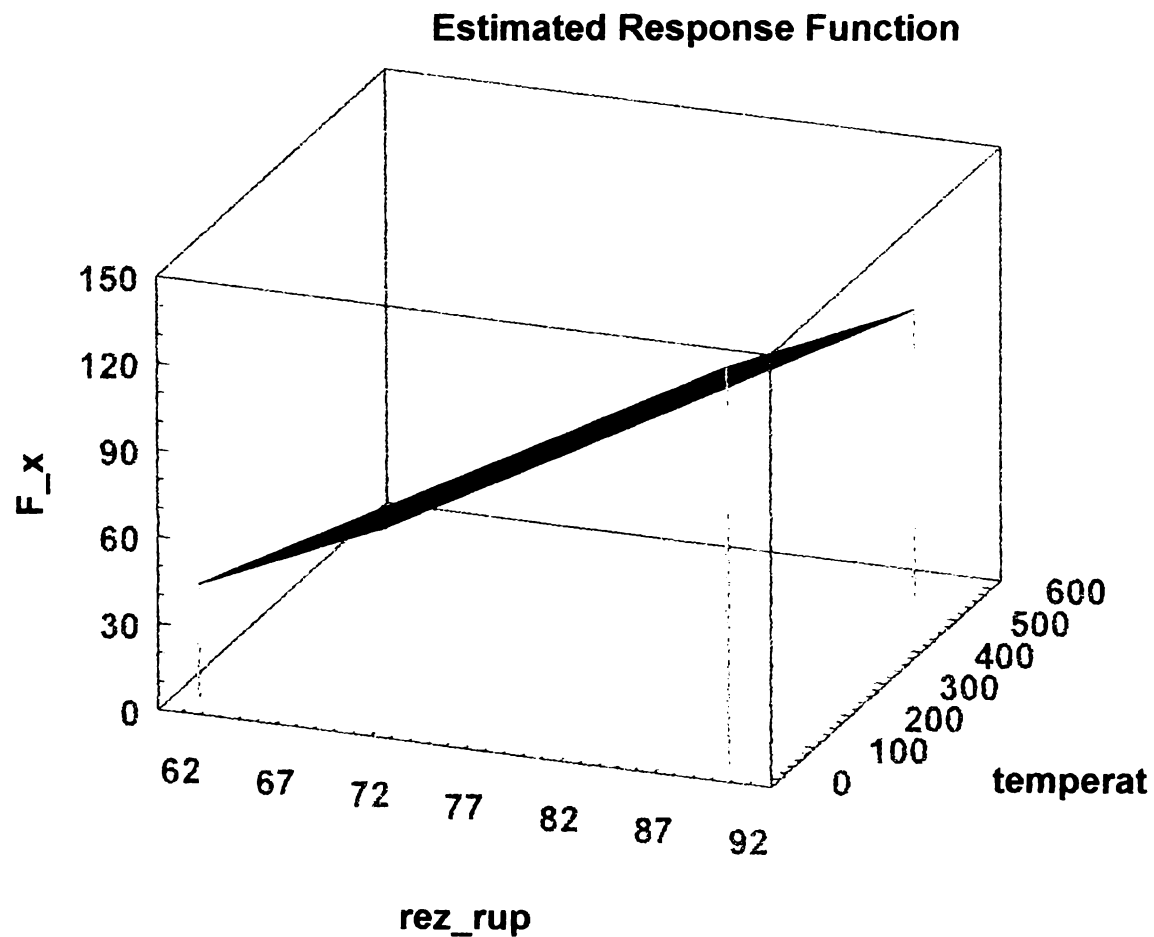
Se observă că cea mai pronunțată scădere a valorii componentelor forței de așchiere, funcție de cei doi factori de influență analizați, are loc pe traseul diagonal al suprafeței de răspuns, traseu care impune o corelare între rezistența la rupere și adâncimea de așchiere, în vederea stabilirii regimului optim de lucru.

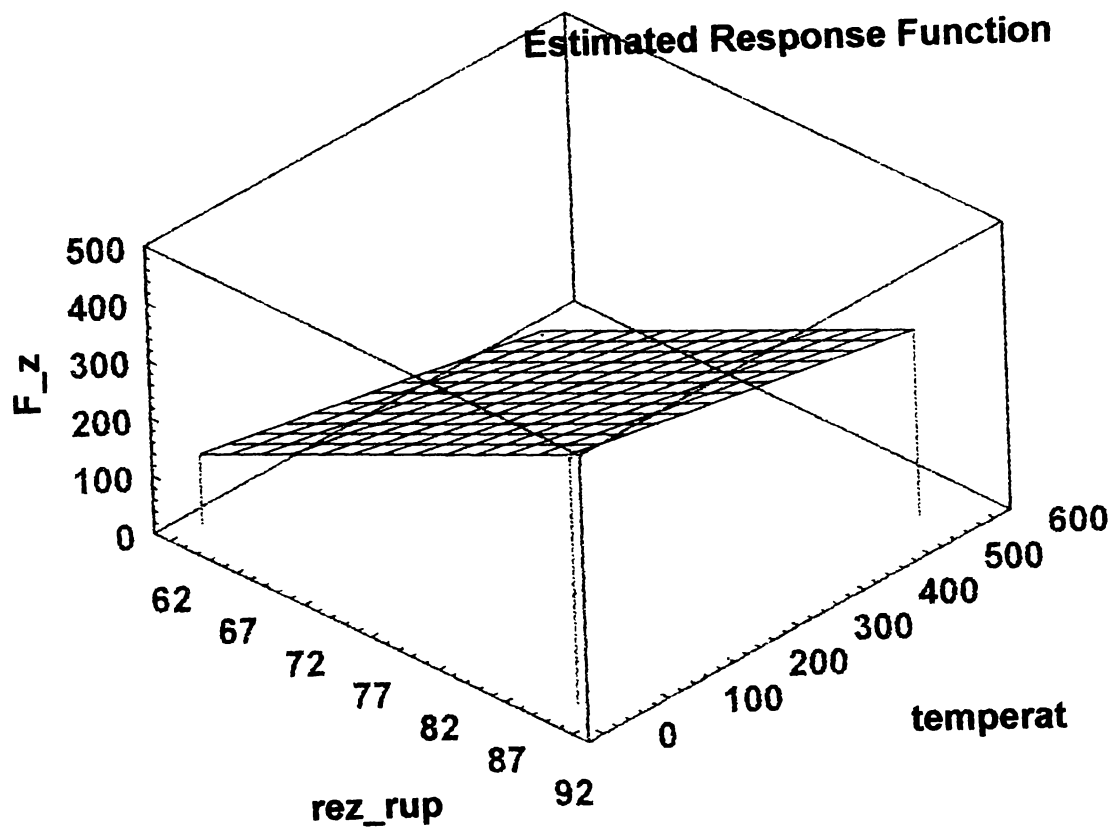
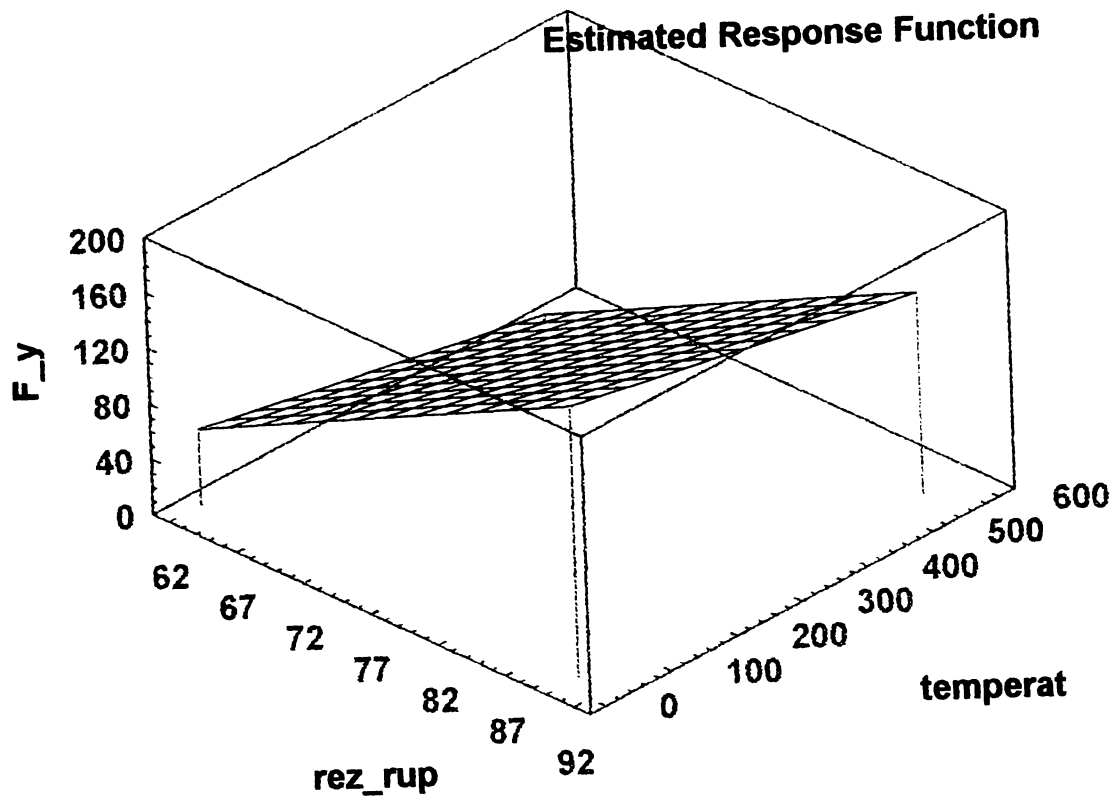




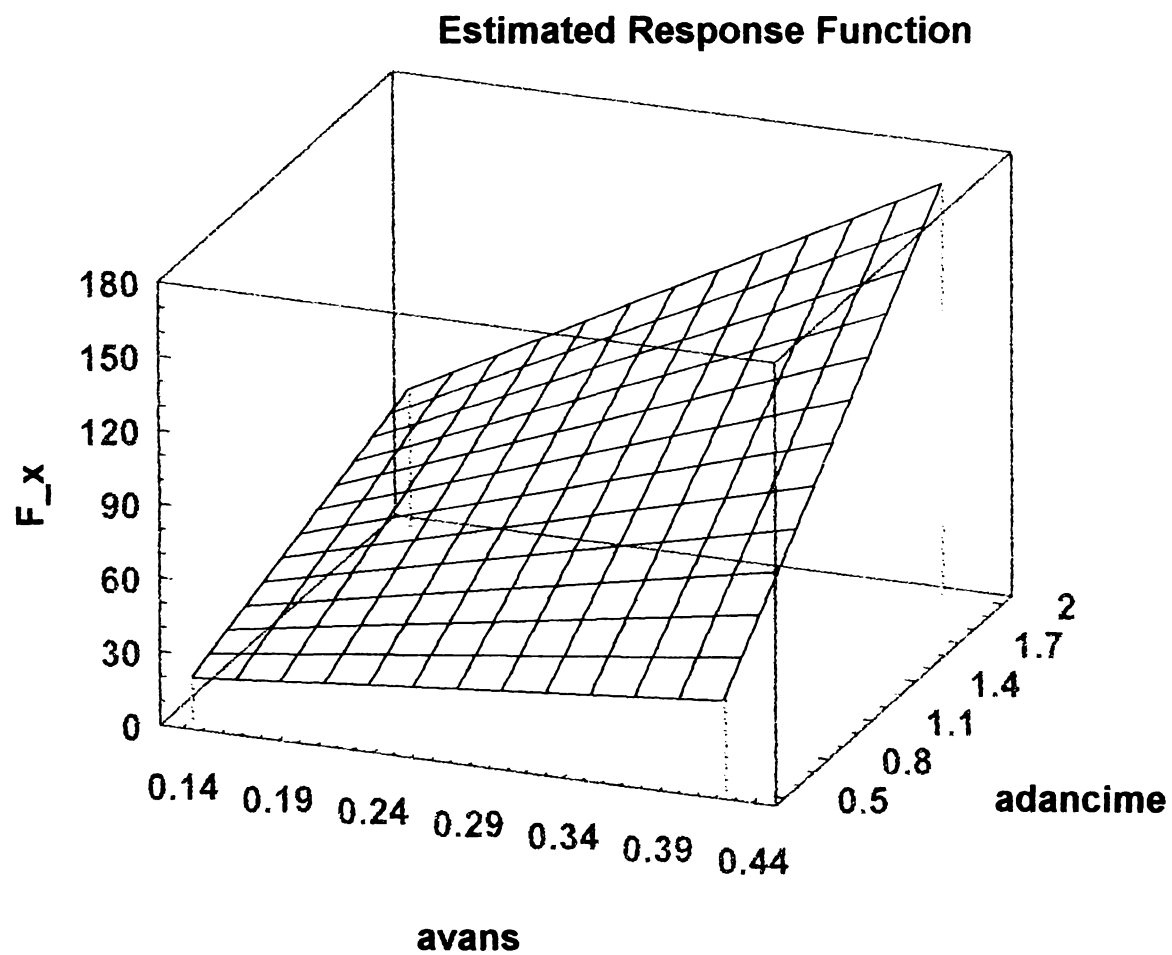
Analiza suprafețelor de răspuns corespunzătoare funcțiilor obiectiv F_x , F_y și F_z (fig.3.3.2.2.3), funcție de factorii de influență rezistența la rupere a materialului prelucrat și avansul longitudinal, evidențiază faptul că, la rezistența de rupere mică, scăderea valorii componentelor forței de așchiere odată cu scăderea valorii avansului longitudinal este mai mică decât la rezistența la rupere mare, la bază fiind, de asemenea, conținutul de carbon (carbon echivalent) mai mare al oțelului cu rezistență la rupere (duritate) mare [82]

Se observă că cea mai pronunțată scădere a valorii componentelor forței de așchiere, funcție de cei doi factori de influență analizați, are loc tot pe traseul diagonal al suprafeței de răspuns, traseu care impune, de asemenea, o corelare între rezistența la rupere și avansul longitudinal, în vederea stabilirii regimului optim de lucru.

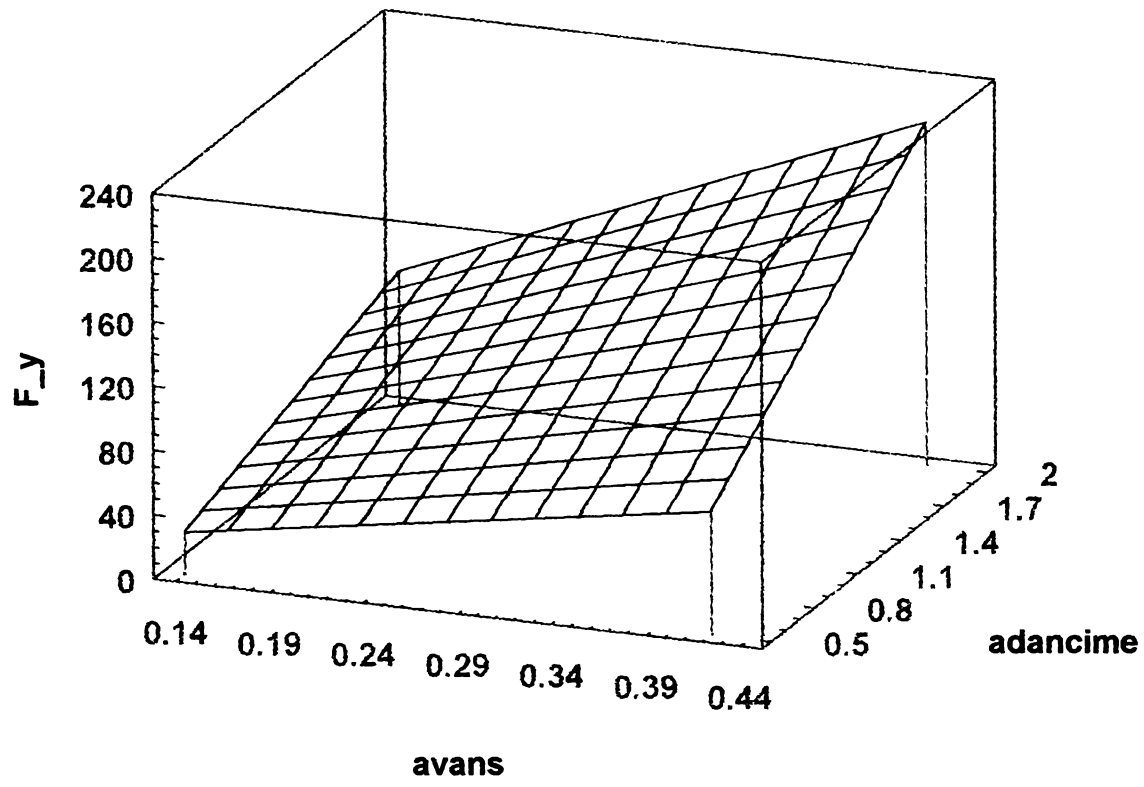




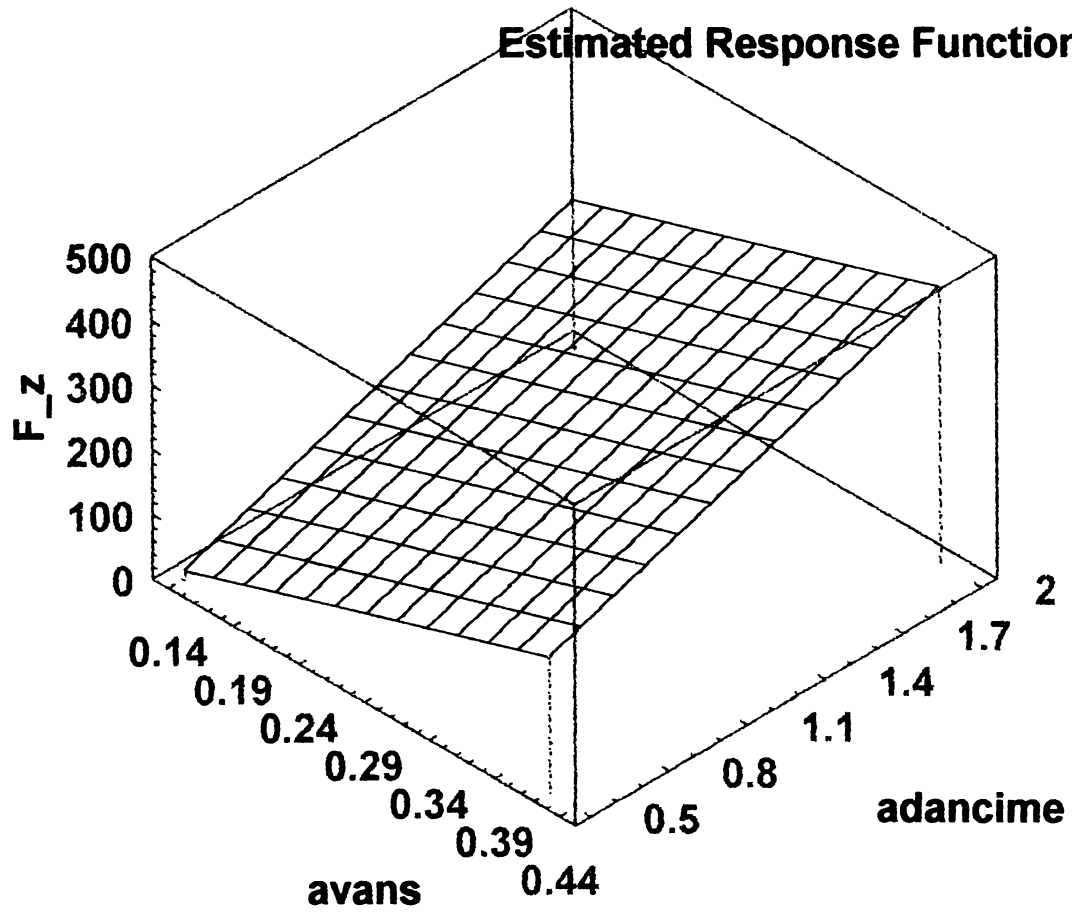
Din analiza suprafețelor de răspuns corespunzătoare funcțiilor obiectiv F_x , F_y și F_z (figura 3.3.2.2.3), funcție de rezistența la rupere a materialului prelucrat și temperatura de așchiere, rezultă, de asemenea, o corelare între cei doi factori de influență, întrucât scăderea cea mai mare a valorii componentelor forței de așchiere se observă ca fiind tot pe traseul diagonal al suprafeței de răspuns, traseu evidențiat ca optim.



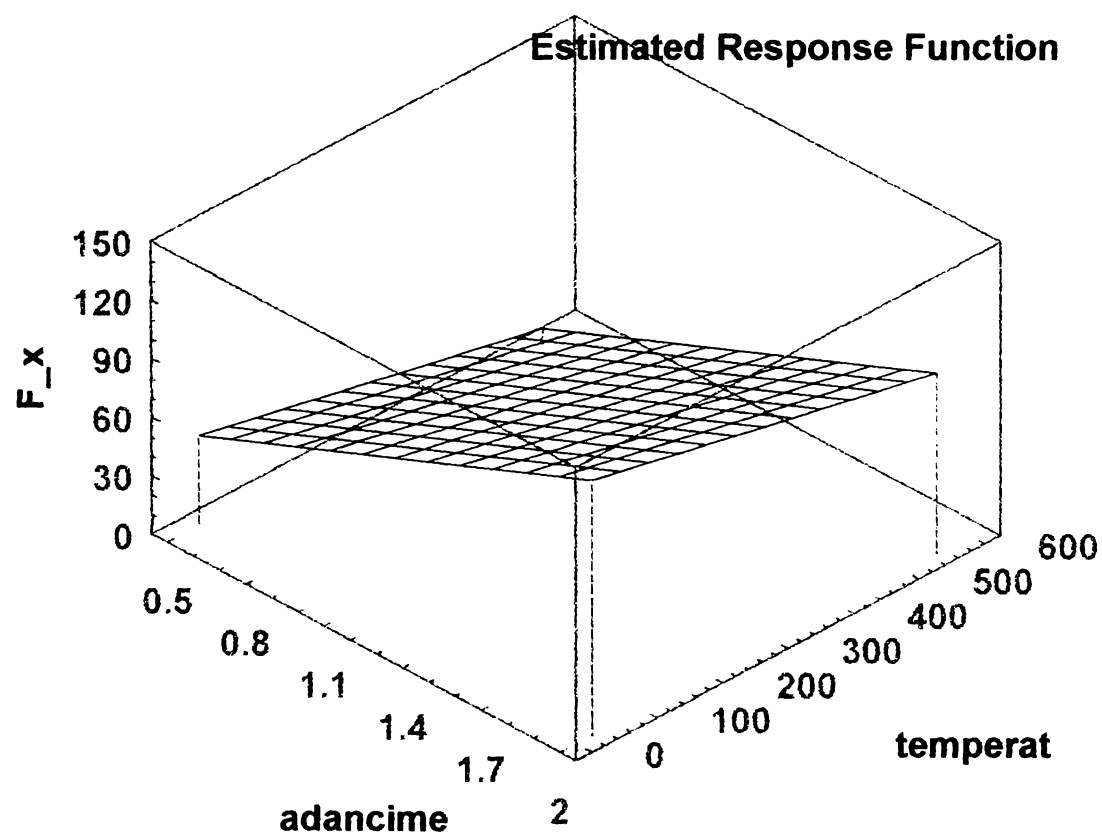
Estimated Response Function

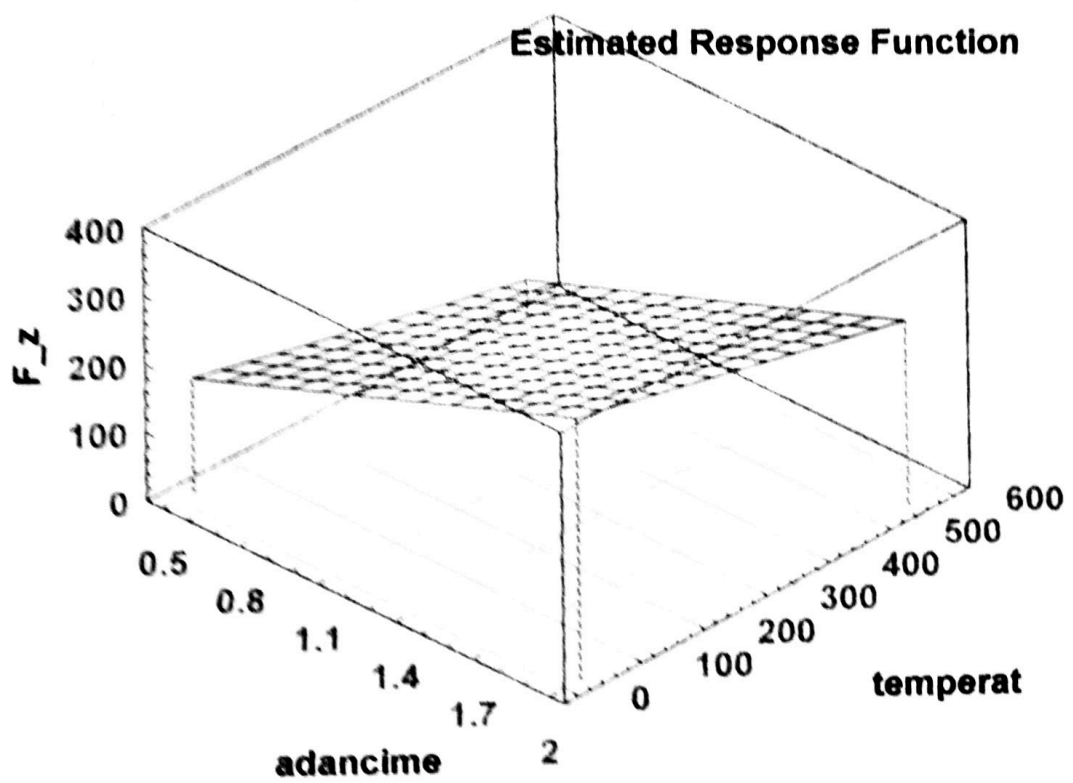
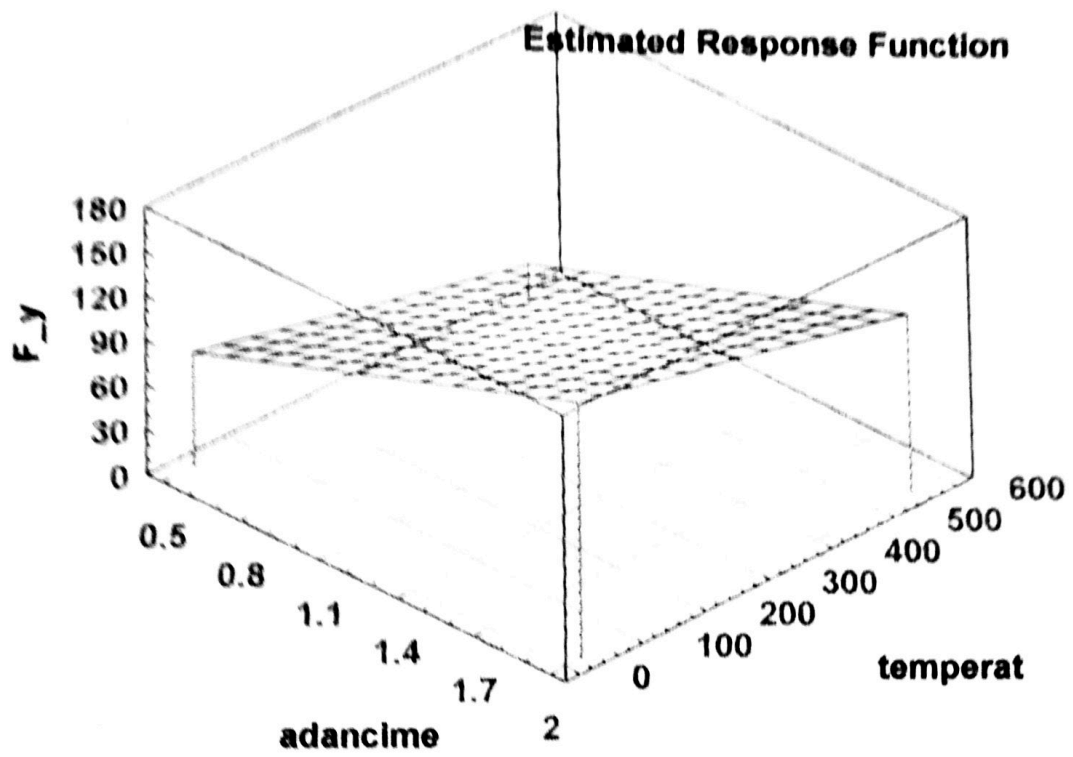


Estimated Response Function

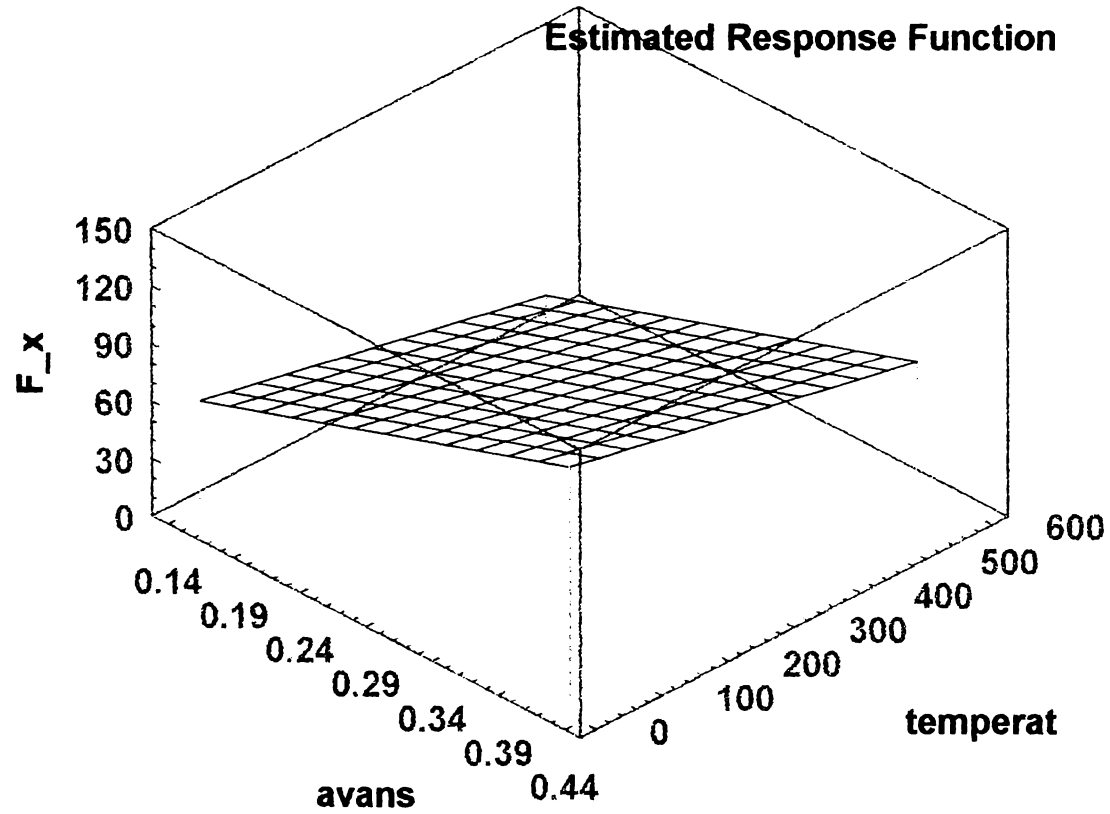


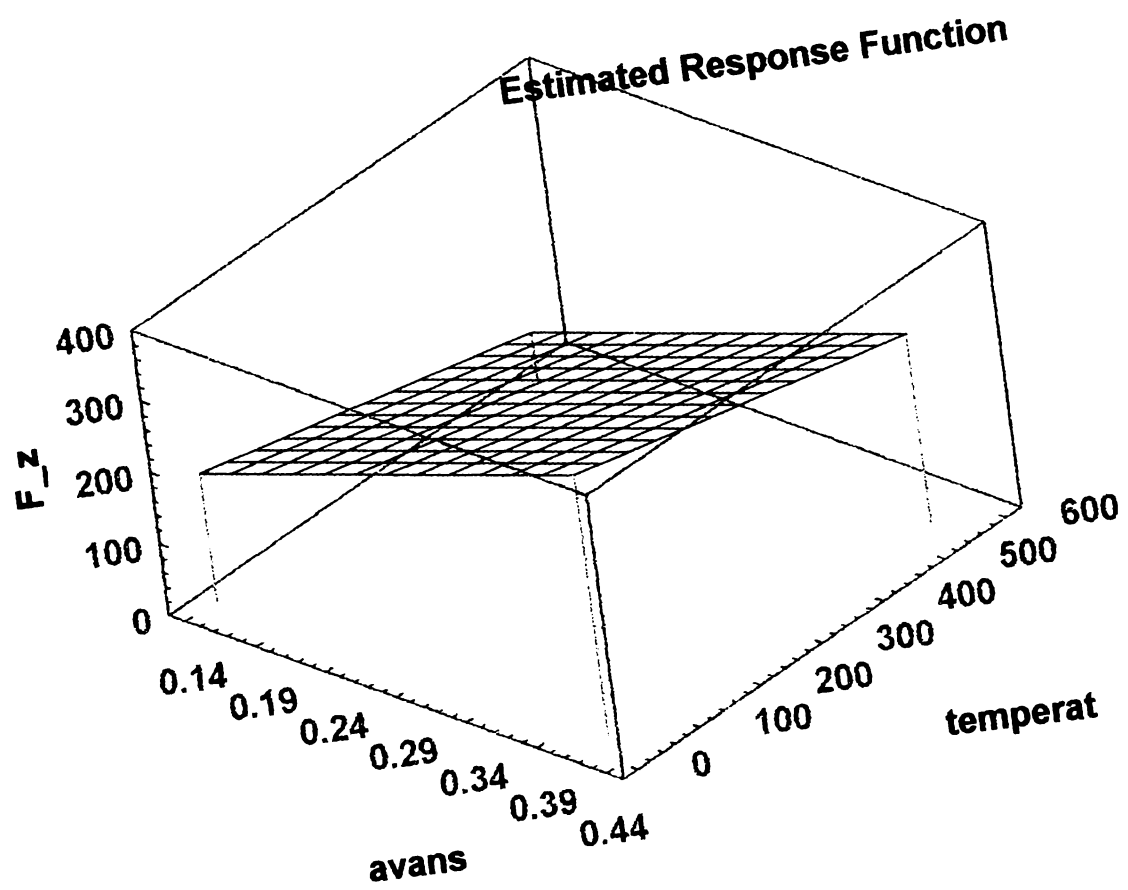
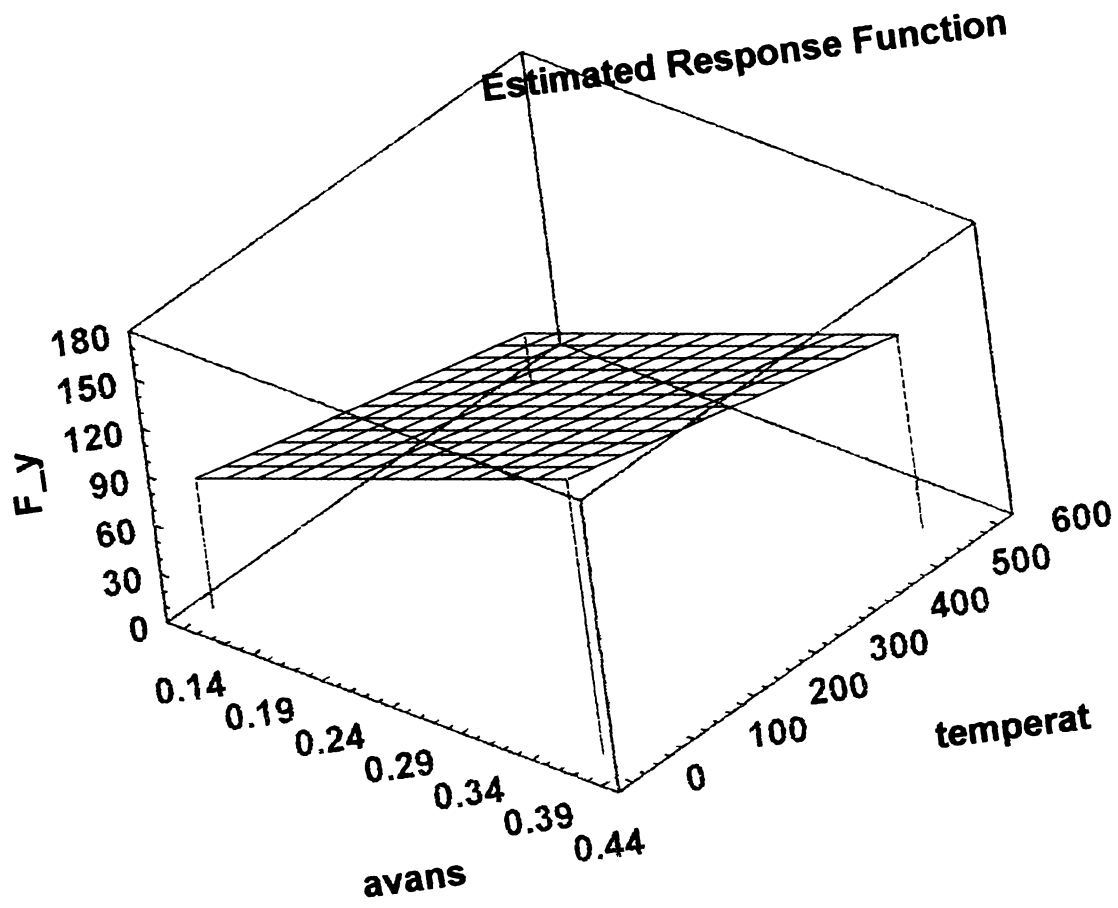
Analiza suprafețelor de răspuns corespunzătoare funcțiilor obiectiv F_x , F_y și F_z (fig.3.3.2.2.3), funcție de avansul longitudinal și adâncimea de așchiere evidențiază, de asemenea, că scăderea cea mai pronunțată a valorii componentelor forței de așchiere este tot pe traseul diagonal al suprafeței de răspuns, traseu considerat optim în vederea corelării celor doi factori de influență.





Din analiza suprafețelor de răspuns corespunzător funcțiilor obiectiv F_x , F_y și F_z (figura 3.3.2.2.3), funcție de adâncimea de așchiere și temperatură, rezultă că scăderea cea mai pronunțată a valorii componentelor forței de așchiere are loc tot pe traseul diagonal al suprafeței de răspuns, traseu optim în vederea corelării celor doi factori de influență.





Analiza suprafețelor de răspuns, corespunzătoare funcțiilor obiectiv F_x , F_y și F_z (figura 3.3.2.2.3), funcție de avansul longitudinal și temperatură, evidențiază ca optim tot traseul diagonal al suprafeței de răspuns, traseu pe care scăderea valorii componentelor forței de așchiere este cea mai pronunțată.

La baza stabilirii unui regim optim de lucru, în vederea scăderii maxime a valorii componentelor forței de așchiere, stau corelările și concluziile stabilite prin interpretarea suprafețelor de răspuns, precum și ordinea importanței factorilor de influență, potrivit histogramelor efectelor provocate asupra funcțiilor obiectiv F_x , F_y și F_z (fig.3.3.2.2.1)

3.3.2.3. Modelarea matematică a acțiunii principalilor factori de influență asupra rugozității suprafeței prelucrate

În mod similar modelării matematice a acțiunii principalilor factori de influență asupra componentelor forței de așchiere, respectiv pe baza celor menționate la paragraful 3.3.2.1. și utilizând rezultatele experimentale din sursa bibliografică [2], se constituie tabelul care stă la baza construirii matricei programării, în vederea stabilirii obiectivului evidențiat prin relația (1):

Nr. Crt	x_1 daN/mm ²		x_2 mm/rot		x_3 mm		x_4 °C		y_4 mm
1	-1	62	-1	0,14	-1	0,5	-1	25	0,0045
2	+1	90	-1	0,14	-1	0,5	-1	25	0,0055
3	-1	62	+1	0,42	-1	0,5	-1	25	0,0060
4	+1	90	+1	0,42	-1	0,5	-1	25	0,0090
5	-1	62	-1	0,14	+1	2,0	-1	25	0,0090
6	+1	90	-1	0,14	+1	2,0	-1	25	0,0080
7	-1	62	+1	0,42	+1	2,0	-1	25	0,0110
8	+1	90	+1	0,42	+1	2,0	-1	25	0,0100
9	-1	62	-1	0,14	-1	0,5	+1	550	0,0045
10	+1	90	-1	0,14	-1	0,5	+1	550	0,0043
11	-1	62	+1	0,42	-1	0,5	+1	550	0,0050
12	+1	90	+1	0,42	-1	0,5	+1	550	0,0077
13	-1	62	-1	0,14	+1	2,0	+1	550	0,0050
14	+1	90	-1	0,14	+1	2,0	+1	550	0,0067
15	-1	62	+1	0,42	+1	2,0	+1	550	0,0060
16	+1	90	+1	0,42	+1	2,0	+1	550	0,0079

Tabel 3.3.2.3. Tabelul care stă la baza construirii matricei programării

x_1 - rezistența la rupere a materialului prelucrat;

x_2 - avansul longitudinal;

x_3 - adâncimea de așchiere;

x_4 – temperatura; y_4 - rugozitatea suprafeței prelucrate

Precizăm că rugozitatea suprafeței prelucrate prin aşchiere la strung, cu și fără preîncălzirea stratului de suprafață, a fost determinată cu un aparat tip “Surtronic”, produs de Rank Precision Industries - Metrology Division. Aparatul permite determinarea rugozității suprafețelor, respectiv a parametrului R_a , prin citire directă, fără înregistrare grafică [2][41][55][56][57]

Valorile coeficienților de regresie ai polinomului (10), determinați prin relațiile (7) și (8), cu ajutorul programului STATGRAPHICS, după raționamentul și metodologia prezentate la paragraful 3.3.2.2., sunt următoarele (doar pentru cei semnificativi):

$$b_0=5,37302 \times 10^{-4}; b_1=3,61607 \times 10^{-5}; b_2=6,74107 \times 10^{-3}; \\ b_3=2,2373 \times 10^{-3}; b_4= -2,53968 \times 10^{-7}; b_{34}= - 2,8254 \times 10^{-6}.$$

Prin urmare, ecuația modelului matematic devine:

$$y_4= R_a = 5,37302 \times 10^{-4} + 3,61607 \times 10^{-5} x_1 + 6,74107 \times 10^{-3} x_2 + \\ + 2,2373 \times 10^{-3} x_3 - 2,53968 \times 10^{-7} x_4 - 2,8254 \times 10^{-6} x_3x_4 \quad (15)$$

Histograma efectelor provocate asupra funcției obiectiv R_a , determinată cu ajutorul programului STATGRAPHICS, în mod similar ca pentru funcțiile obiectiv F_x , F_y , F_z (paragraful 3.3.2.2.), are următoarea formă:

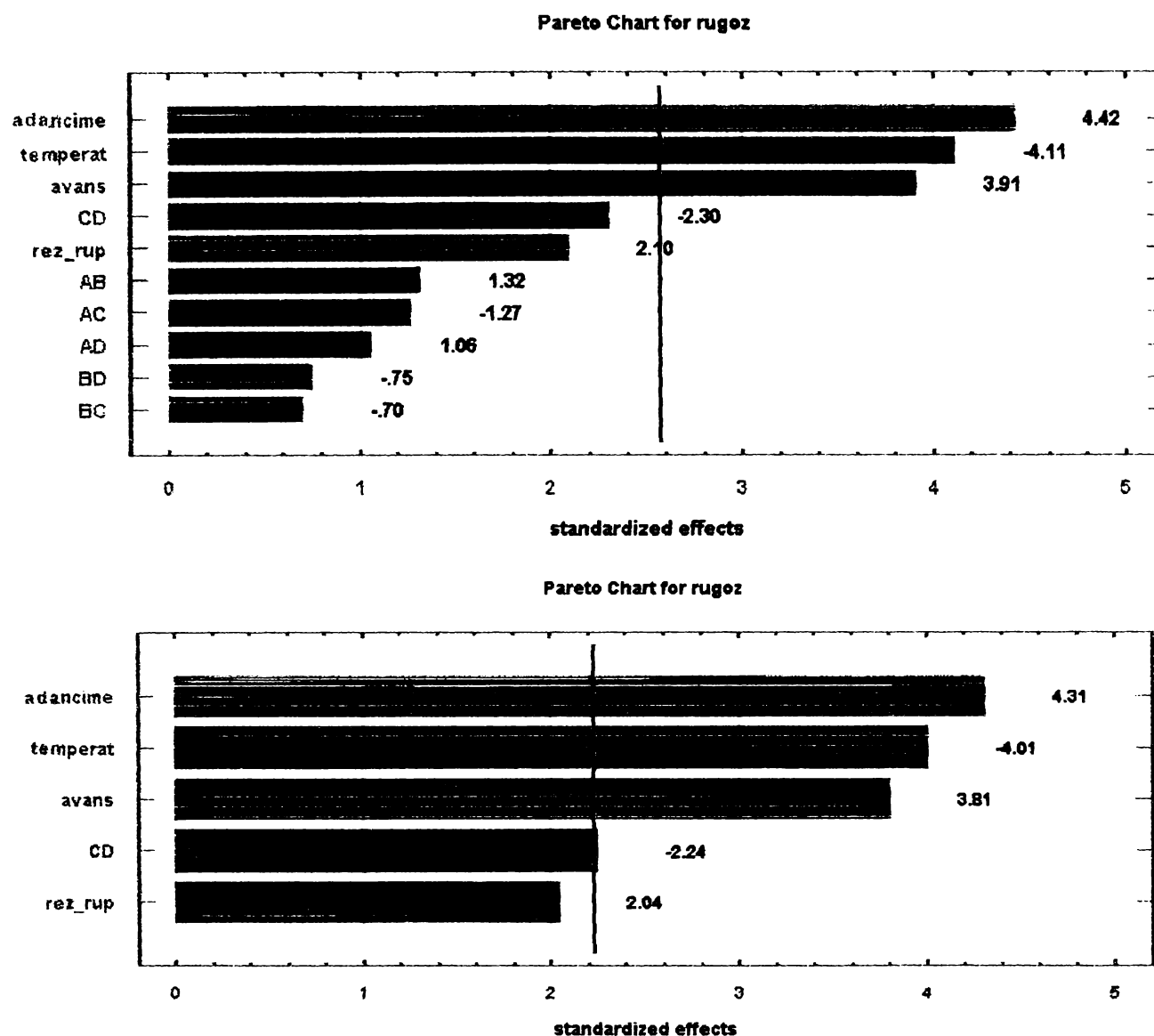


Fig.3.3.2.3.1. Histograma efectelor provocate asupra funcției obiectiv R_a

Observație: Notățiile la histogramă (atât la cea trasată luând în calcul toți coeficienții de regresie, cât și la cea referitoare doar la coeficienții semnificativi): $A=x_1$, $B=x_2$, $C=x_3$, $D=x_4$, $AB=x_1x_2$, $AC=x_1x_3$, $AD=x_1x_4$, $BC=x_2x_3$, $BD=x_2x_4$, $CD=x_3x_4$.

Graficul pentru stabilirea concordanței dintre valorile estimate cu ajutorul modelului (“predicted”) și cele măsurate (“observed”), trasat tot cu ajutorul programului STATGRAPHICS, după raționamentul menționat la paragraful 3.3.2.2., are următoarea formă (figura 3.3.2.3.2.):

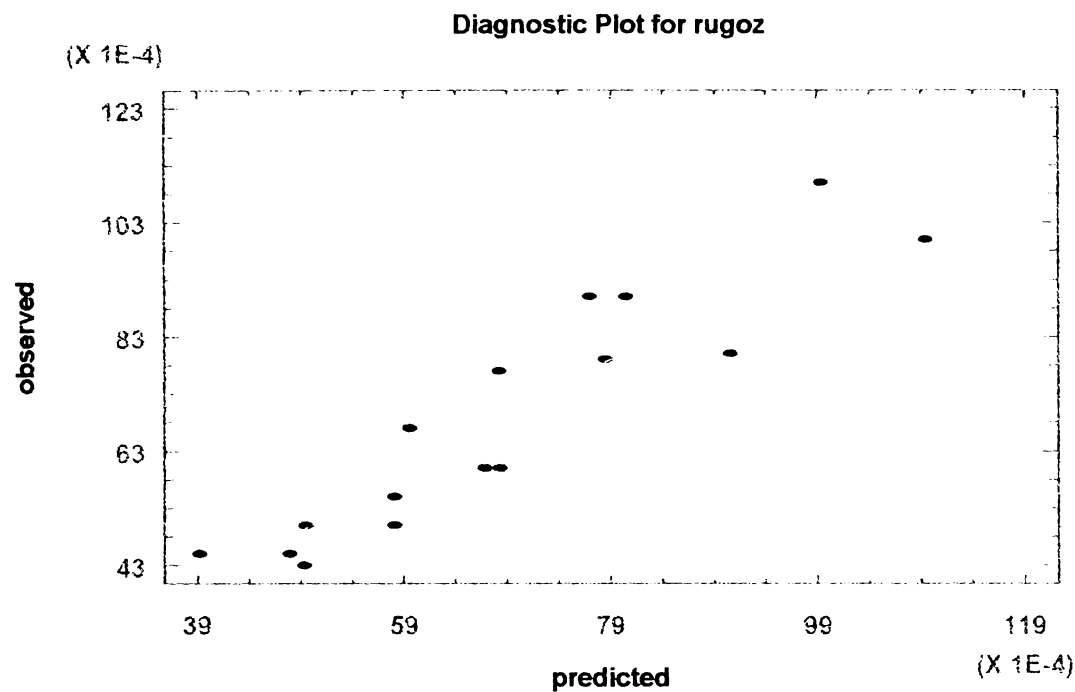
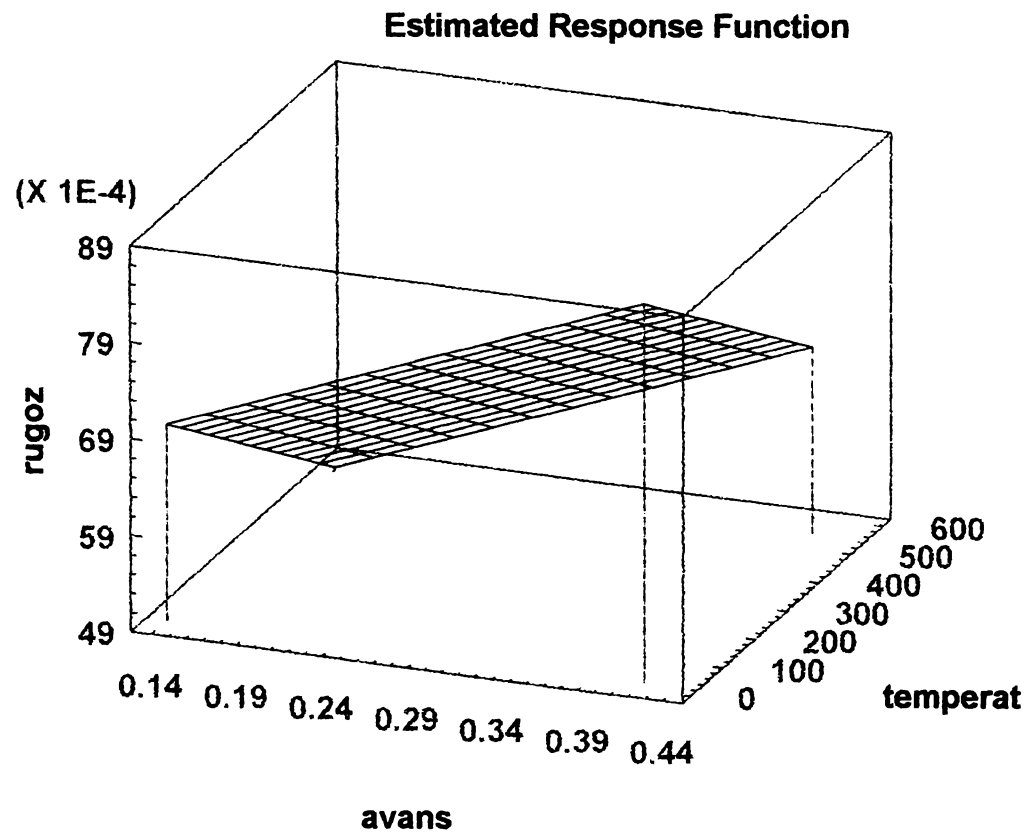
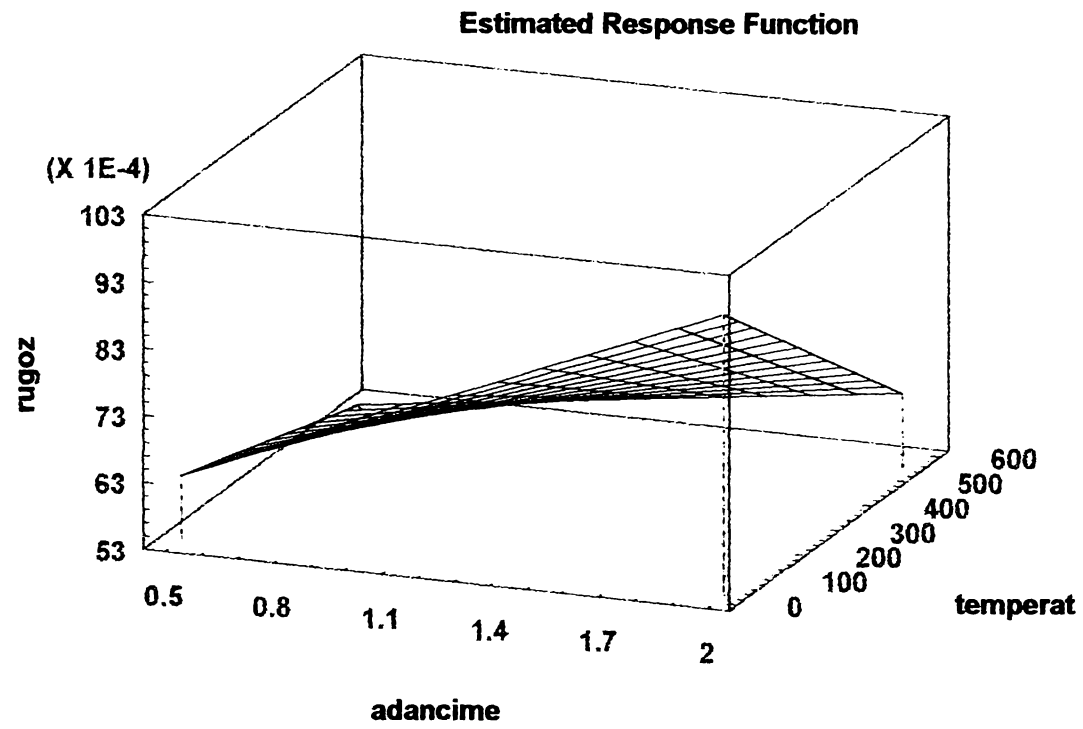


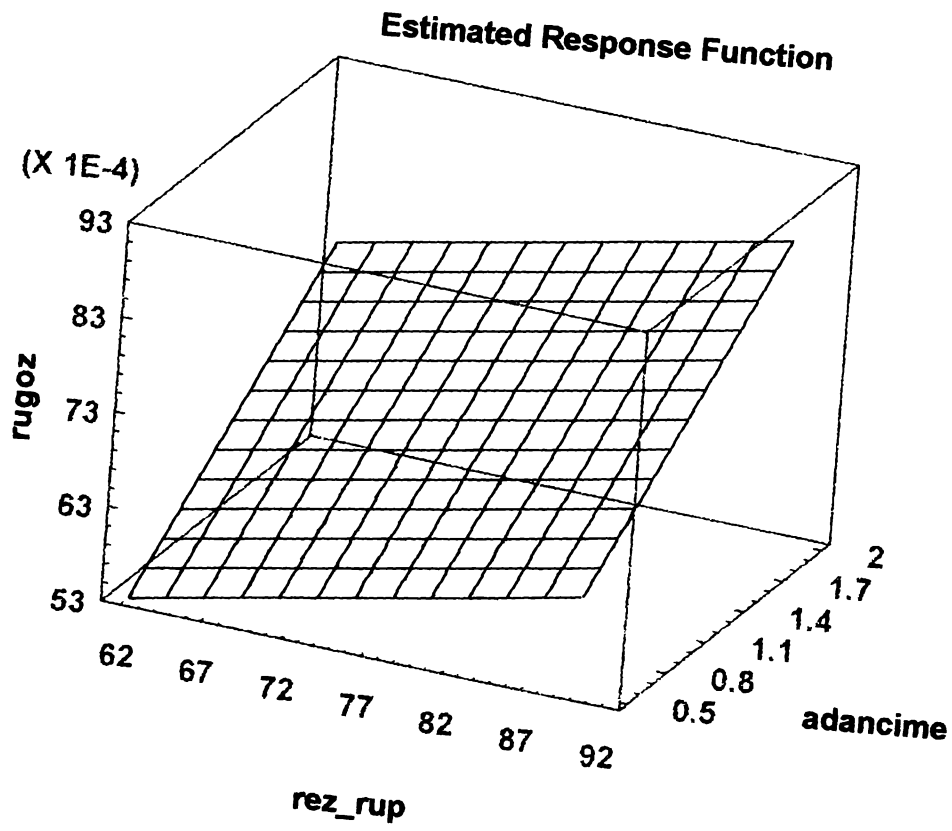
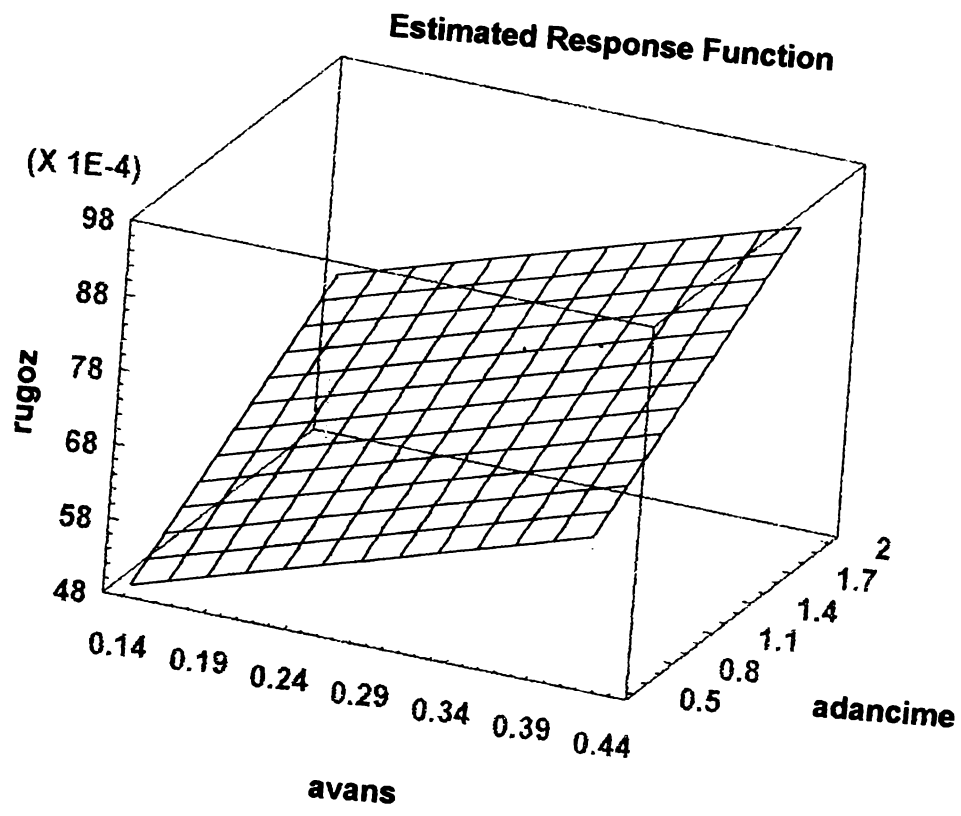
Fig.3.3.2.3.2. Graficul pentru stabilirea concordanței dintre valorile estimate cu ajutorul modelului (“predicted”) și cele măsurate (“observed”) pentru rugozitatea suprafeței prelucrate

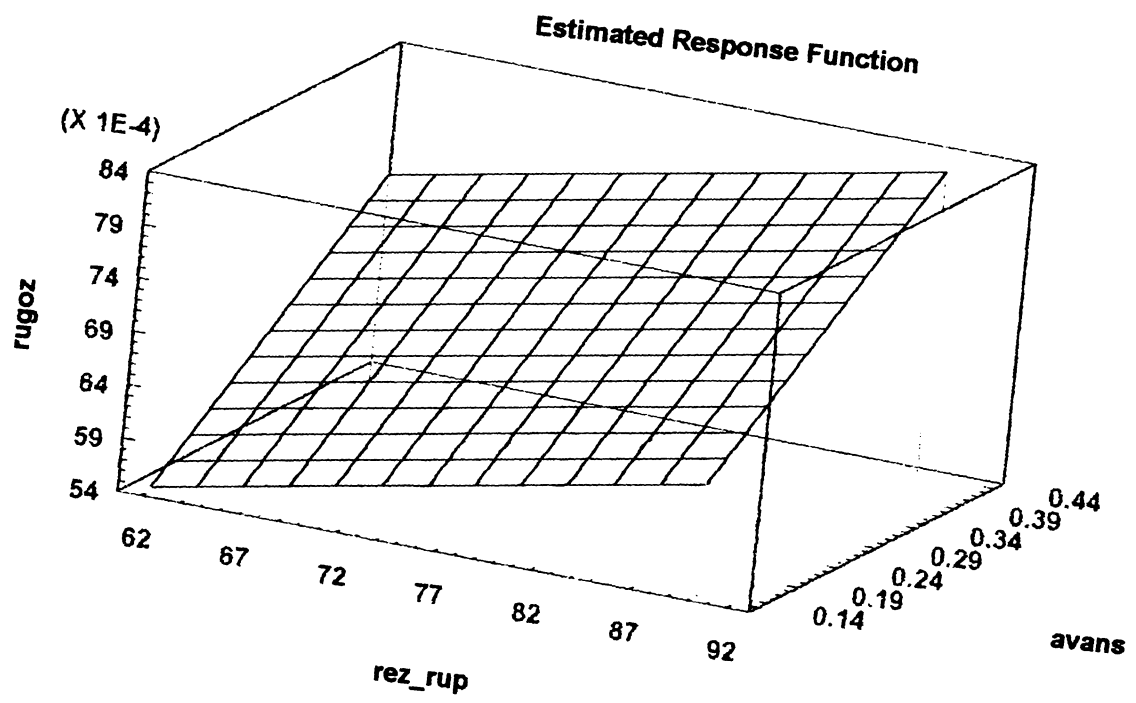
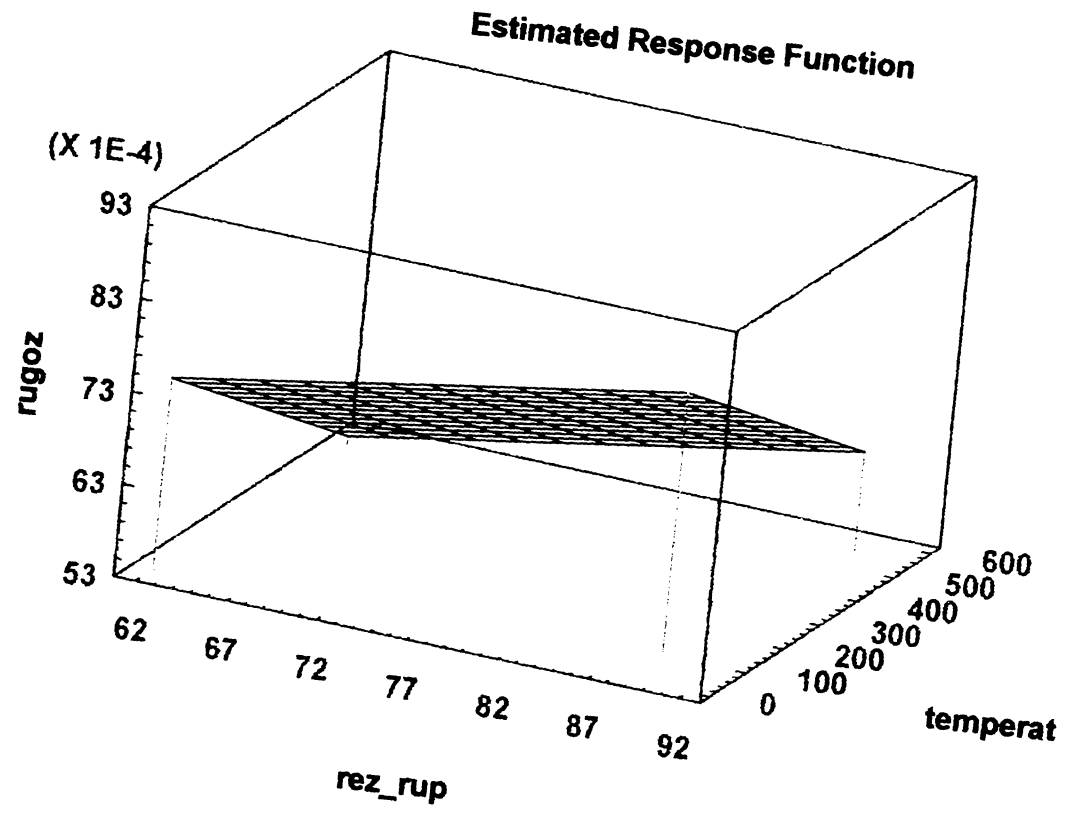
Precizia de exprimare a modelului de ordinul întâi găsit, determinată cu ajutorul programului STATGRAPHICS, potrivit raționamentului menționat la paragraful 3.3.2.2., este: 0,853786.

Suprafețele de răspuns corespunzătoare funcției obiectiv $y_4 = R_a$, trasate cu ajutorul programului STATGRAPHICS (grupând, pe rând, doi câte doi, factorii de influență), sunt prezentate în figura 3.3.2.3.3.

Fig.3.3.2.3.3.







Din analiza histogramelor efectelor provocate asupra funcției obiectiv R_a (rugozitatea suprafeței prelucrate) (figura 3.3.2.3.1.), se observă că ordinea factorilor de influență semnificativ din punct de vedere al efectelor provocate, este următoarea: adâncimea de așchiere, temperatura, avansul longitudinal, produsul dintre adâncimea de așchiere și temperatură, respectiv rezistența la rupere a materialului prelucrat.

Din analiza suprafețelor de răspuns corespunzătoare funcției obiectiv R_a (figura 3.3.2.3.3.), funcție de câte doi factori de influență, rezultă următoarele concluzii:

pentru suprafața de răspuns a), funcție de adâncimea de așchiere și temperatură:

Se observă că scăderea cea mai pronunțată a valorii rugozității suprafeței prelucrate R_a are loc pe traseul diagonal al suprafeței de răspuns, traseu ce determină o corelare între cei doi factori de influență analizați, în vederea stabilirii regimului optim de lucru. Se confirmă faptul că la orice adâncime de așchiere adoptată, preîncălzirea inductivă a stratului de suprafață al oțelului strunjit conduce și la scăderea rugozității suprafeței prelucrate, scăderea fiind semnificativă la adâncimi de așchiere mai mari.

pentru suprafețele de răspuns b) - f), funcție de avans-temperatură, avans-adâncime, rezistență la rupere - adâncime de așchiere, rezistență la rupere-temperatură, respectiv rezistență la rupere-avans, se observă că scăderea cea mai importantă a rugozității suprafeței prelucrate se înregistrează tot pe trasee diagonale ale suprafețelor de răspuns respective, rezultând, astfel, corelări între factorii de influență analizați, în vederea stabilirii unui regim optim de lucru.

În scopul stabilirii unui regim optim de lucru, în vederea scăderii maxime a valorii rugozității prelucrate, stau, deci, corelările și concluziile stabilite prin interpretarea suprafețelor de răspuns, precum și ordinea importanței factorilor de influență, potrivit histogramelor efectelor provocate asupra funcției obiectiv R_a (figura 3.3.2.3.1.)

CAPITOLUL 4

VERIFICAREA EXPERIMENTALĂ A PRECIZIEI DE EXPRIMARE A MODELELOR MATEMATICE CE VIZEAZĂ ACȚIUNEA FACTORILOR DE INFLUENȚĂ “REZISTENȚA LA RUPERE A OȚELULUI PRELUCRAT”, “AVANSUL LONGITUDINAL”, “ADÂNCIMEA DE AȘCHIERE” SI “TEMPERATURA DE AȘCHIERE” ASUPRA COMPONENTELOR FORȚEI DE AȘCHIERE SI RUGOZITĂȚII SUPRAFETELOR PRELUCRATE PRIN STRUNJIRE CU PREÎNCĂLZIRE INDUCTIVĂ A STRATULUI DE SUPRAFAȚĂ

4.1. Verificarea experimentală a modelării matematice a forței de așchiere

Modelul matematic creat la Capitolul 3 permite stabilirea - fie în cadrul programului STATGRAPHICS, fie direct, prin analizarea suprafețelor de răspuns corespunzătoare funcțiilor obiectiv F_x , F_y și F_z (figura 3.3.2.2.3.) - a regimului optim de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață (temperatură de așchiere, avans longitudinal, adâncime de așchiere, la viteză de așchiere constantă) a oricărui oțel, identificabil, prin parametrul “rezistență la rupere”, în domeniul de exprimare a modelului.

După raționamentul prezentat la Capitolul 3, se poate extinde modelul matematic creat și la domenii mai largi de variație a factorilor de influență.

Verificările experimentale au fost efectuate pentru cilindri de laminare din oțel 90VMoC15 și RUL1 (destinați laminării la rece a benzilor), respectiv pentru cilindri de laminare din oțel 50CrNi12 (destinați laminării la cald), la diferite valori ale parametrilor regimului de lucru sus-menționați, păstrându-se constante valorile celorlalți factori de influență ai sistemului tehnologic analizat (cuțit de strung cu

plăcuță P30, $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 15^\circ$, $K=45^\circ$, $K_1=15^\circ$, $\lambda=4^\circ$, $r=2\text{mm}$, viteză de aşchiere $v \approx 75\text{m/min}$, conform sursei bibliografice [2]).

Pentru probele din oţel 90VMoC15, a fost realizată o analiză a durităţii, respectiv o analiză structurală a suprafeţelor active, atât pentru cazul strunjirii fără, cât şi cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafaţă.

4.1.1. Analiza structurală şi a durităţii suprafeţelor active la cilindrii de laminor din oţel 90VMoC15, supuşi strunjirii cu şi fără preîncălzire inductivă a stratului de suprafaţă

a) Cazul strunjirii fără preîncălzire inductivă a stratului de suprafaţă

Întrucât materialul folosit la confecţionarea cilindrilor de laminor este un oţel aliat cu o limită de curgere şi o rezistenţă mecanică ridicate, şlefuirea zonelor aşchiate, în vederea studierii modificărilor de structură pe grosimea stratului prelucrat, s-a efectuat cu ajutorul hârtiilor abrazive, neexistând pericolul introducerii în piesă a unor dislocaţii suplimentare.

În scopul evitării oricăror tensiuni de şlefuire în stratul superficial, lustruirea a fost realizată pe cale electrolică, folosind un aparat portativ.

Suprafaţa astfel pregătită a fost curăţată cu alcool etilic şi atacată cu nital 2%. Pentru obţinerea unor rezultate bune în cercetarea microscopică, electronică, în urma atacului metalografic, mai întâi s-a făcut o curăţire a suprafeţei de cercetat prin spălare într-o soluţie de acetonă şi alcool etilic, iar ulterior s-a depus o replică de colodiu desprinsă cu o bandă de lipit.

În acest fel, s-a asigurat o îndepărtare completă a tuturor reziduurilor de atac, respectiv a eventualelor particule străine.

Obţinerea replicii duble colodiu-carbon s-a executat astfel:

Pe suprafețele de cercetare prelucrate în trepte (figura 4.1.1.1.), s-au depus picături de soluție de colodiu (concentrație de 1% în acetat de amil) și, după uscare, cu ajutorul unei pensete, s-a desprins pelicula de colodiu.

Pe suprafața acestuia, s-a depus prin evaporare și condensare sub vid înalt (10^{-4} mmHg) un metal greu (Cr), pentru mărirea contrastului imaginii, iar ulterior, un filtru de cărbune electrolitic. S-a tăiat pelicula astfel obținută în bucățele de dimensiuni mai mici decât ale grilei, iar acestea s-au introdus în acetat de amil pentru dizolvarea colodiului.

Pelicula de carbon umbrită cu crom s-a spălat în acetonă și apă, iar în final, s-a așezat pe grilă.

Grosimea replicilor astfel obținute variază între $50...150\text{Å}$, astfel că pot fi pătrunse ușor de către fasciculul de electroni ai microscopului electronic prin transmisie.

Cu ajutorul microscopului electronic BS-613-Tesla, s-au făcut investigații privind modificările structurale care au intervenit în cele 22 de straturi superficiale prelucrate prin așchiera cu $n=185$ rot/min, $t=0,5$ mm și $s=0,15$ mm/rot.

Rezultatele experimentale obținute sunt prezentate în planșele fotografice I-VI (figura 4.1.1.2.) ilustrând, pe de o parte, ecruisarea mecanică a matricei perlitice (distorsiuni și fragmentări pronunțate ale lamelelor de cementită perlitică), iar pe de altă parte, o ușoară tendință de durificare prin precipitarea unor compuși ai componentelor aliajului, de dimensiuni mici și cu un grad de dispersie ridicat.

Astfel, dacă în planșa I, poziția 1...4, se observă clar aspectul perlitei lamelare grosiere, caracteristica unui tratament termic de recoacere, în celelalte microfotografii se sesizează modificări esențiale în forma, mărimea și dispunerea lamelelor de cementită perlitică, cauzate de întărirea prin deformare plastică a materialului.

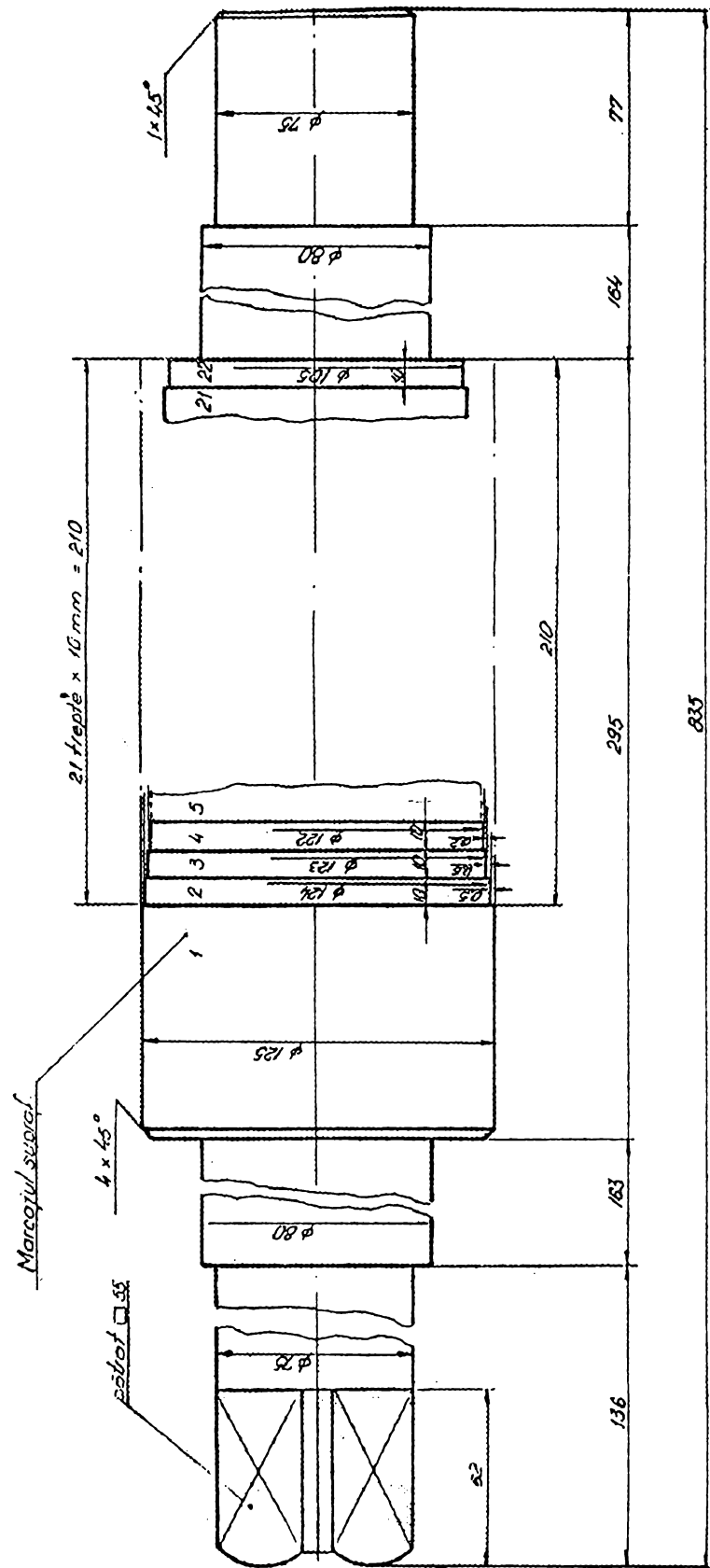


Fig.4.1.1.1. - Schema de aşchiere a cilindrului de laminor pentru studiul variației structurii și a durtății

Fragmentarea cristalelor de perlită și creșterea gradului de dispersie a fazelor constitutive sunt fenomene care se amplifică pe măsura creșterii adâncimii de așchiere la strunjire.

Pornind de la analiza cantitativă și calitativă a componentelor aliajului, este de presupus apariția unor faze secundare de tipul cementitelor aliate sau compușilor intermetalici, care vor conduce la o creștere substanțială a durtății superficiale, rezistenței mecanice și forțelor de așchiere. De asemenea, structura fină a matricei perlitice, tensionată puternic ca urmare a deformării plastice, va produce un efect suplimentar de durificare, materializat prin creșterea capacității materialului de a se opune forțelor exterioare, deci vor apărea forțe de așchiere de valori mult mai mari.

Un alt element specific este creșterea densității de dislocații în comparație cu starea inițială, respectiv interacțiunea acestora cu particulele de fază secundară precipitate.

În concluzie, se apreciază că prelucrarea prin strunjire obișnuită (la “rece”) a cilindrului confecționat din oțel 90VMoC15 recopt conduce la o durificare superficială, determinată de procesele fizico-mecanice care au loc în timpul așchierii și care determină o stare structurală specifică, caracterizată prin:

- distorsiunea și fragmentarea puternică a lamelor de cementită perlitică;
- creșterea gradului de dispersie a fazelor constitutive ale perlitei;
- precipitarea unor compuși secundari de dimensiuni mici uniform dispersați în matricea de bază;
- creșterea tensiunilor interne de ordinul I, II și a densității de dislocație;
- interacțiunea dislocațiilor cu particulele secundare precipitate.

Ca urmare a acestor modificări de structură, este normală creșterea durtății superficiale a materialului și a forțelor care iau naștere în timpul procesului de așchiere.

PLANSA I

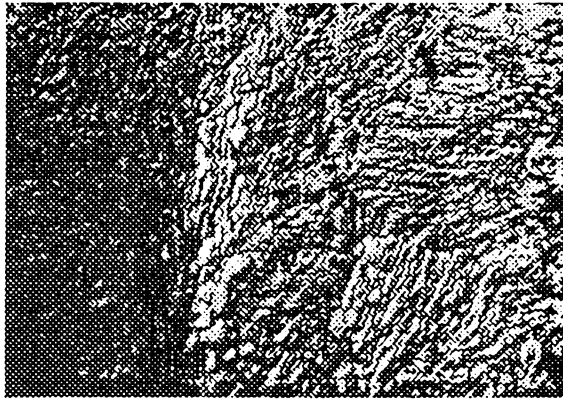


Fig 1-a; Strat I; x2700

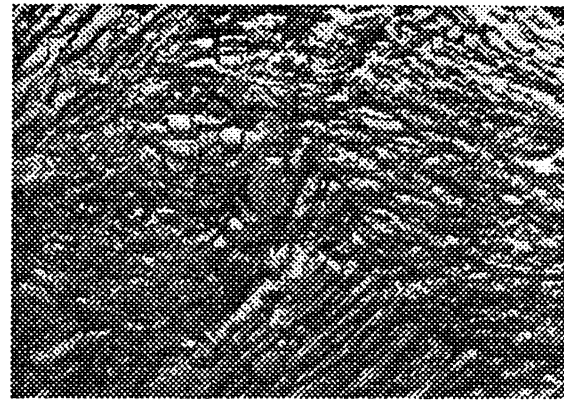


Fig 1-b; Strat I; x5700

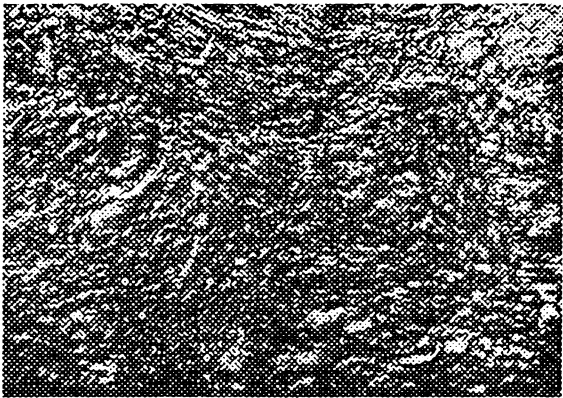


Fig 2-a; Strat II; x2700

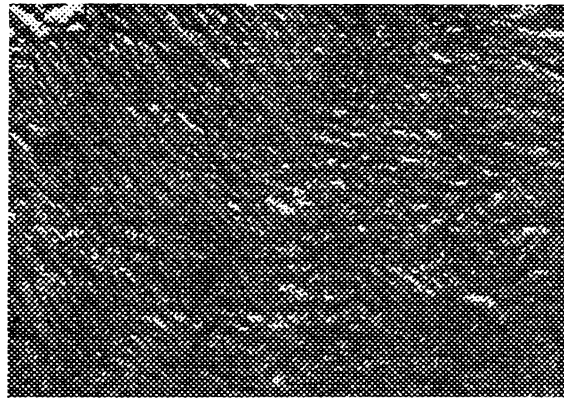


Fig 2-b; Strat II; x5700



Fig 3-a; Strat III; x2700

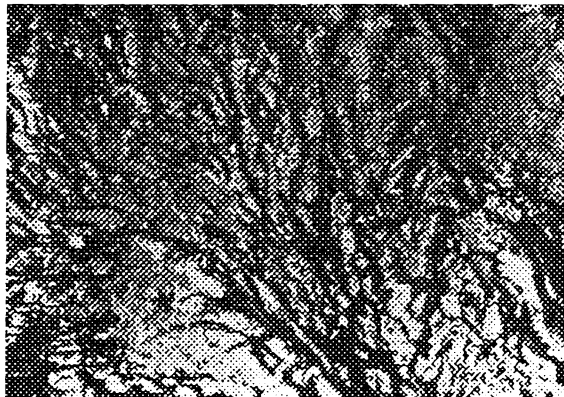


Fig 3-b; Strat III; x5700

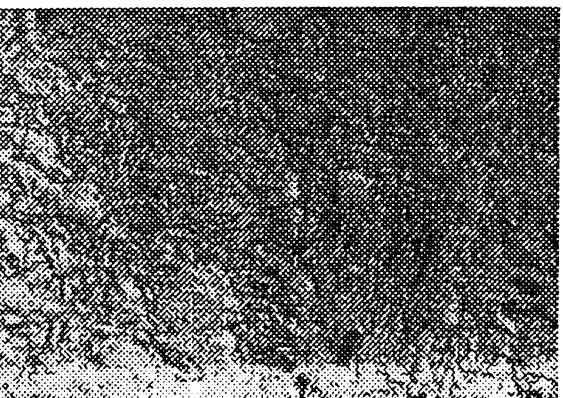


Fig 4-a; Strat IV; x2700

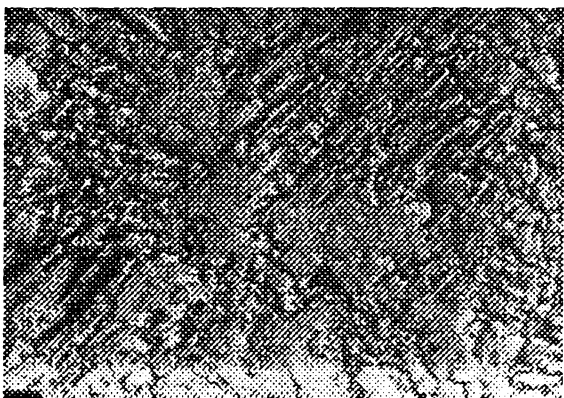


Fig 4-b; Strat IV; x5700

PLANSA II

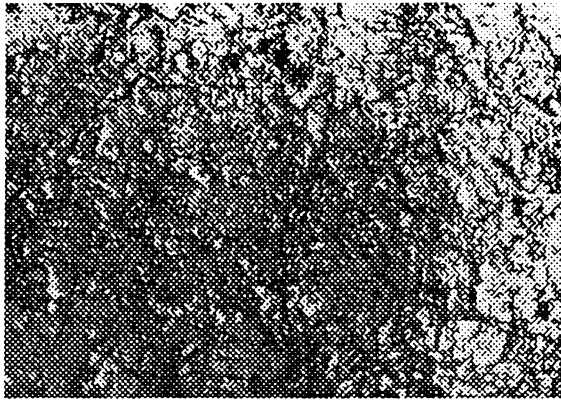


Fig 5-a; Strat V; x2700

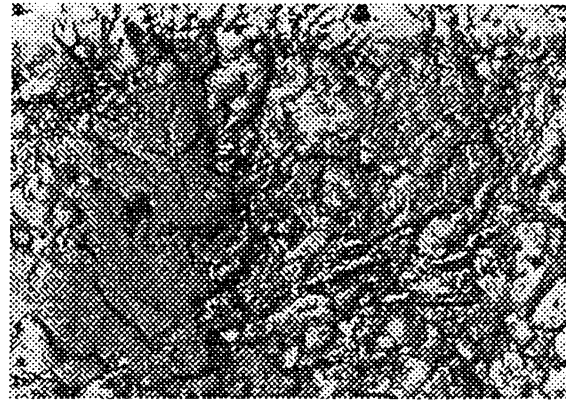


Fig 5-b; Strat V; x5700

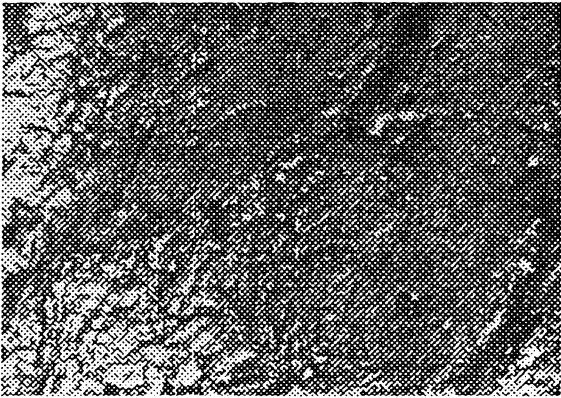


Fig 6-a; Strat VI; x2700

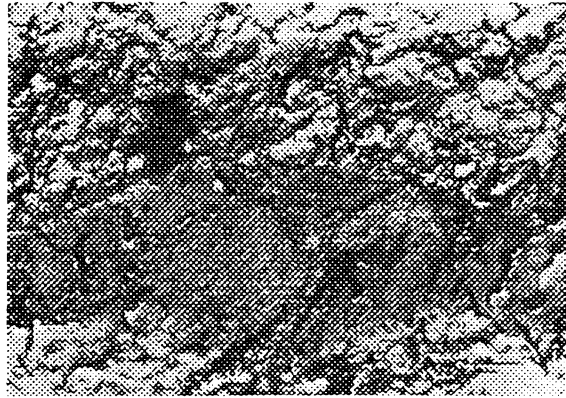


Fig 6-b; Strat VI; x5700

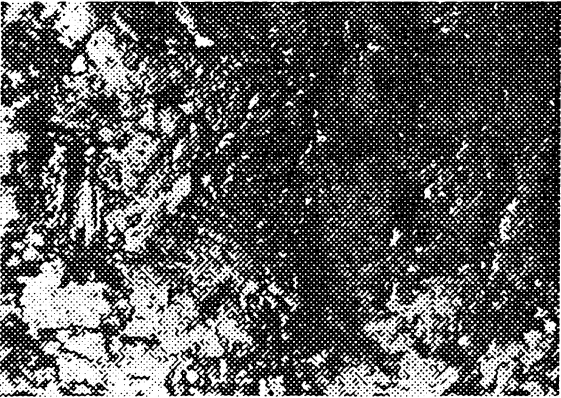


Fig 7-a; Strat VII; x2700

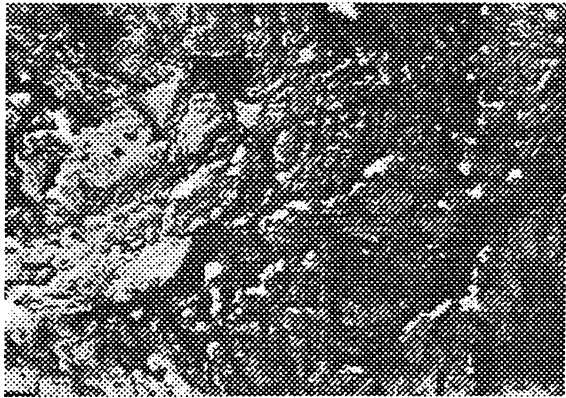


Fig 7-b; Strat VII; x5700

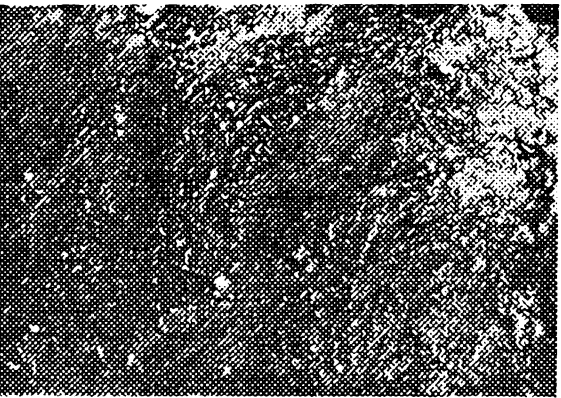


Fig 8-a; Strat VIII; x2700

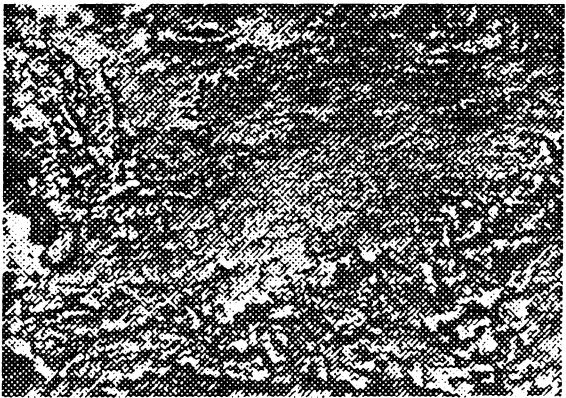


Fig 8-b; Strat VIII; x5700

PLANSA III

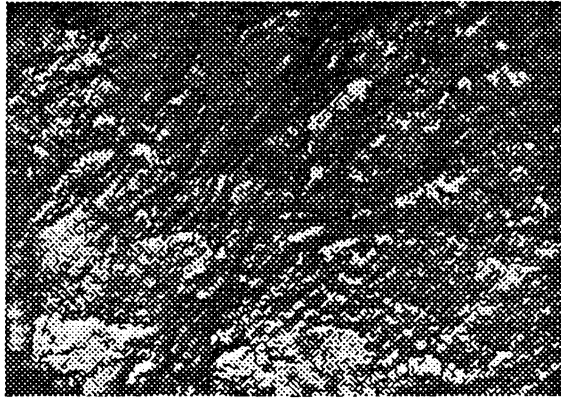


Fig 9-a; Strat IX; x2700

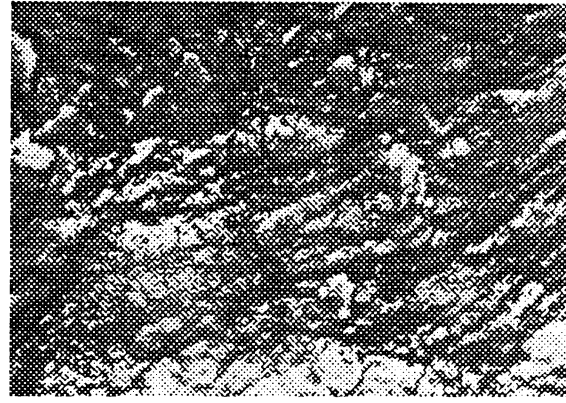


Fig 9-b; Strat IX; x5700

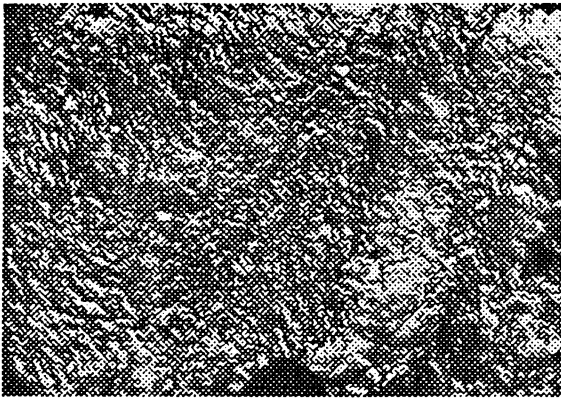


Fig 10-a; Strat X; x2700

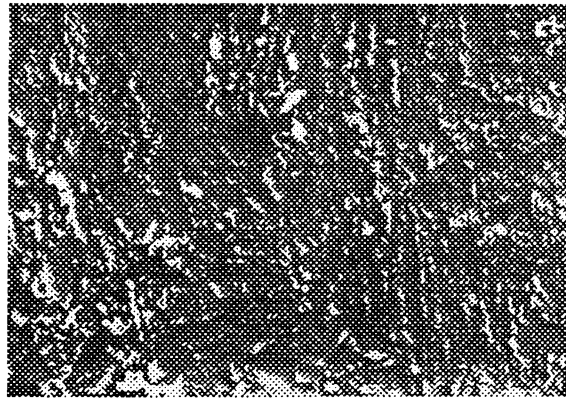


Fig 10-b; Strat X; x5700

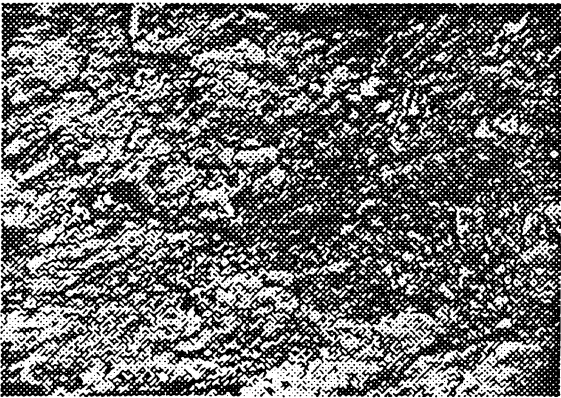


Fig 11-a; Strat XI; x2700

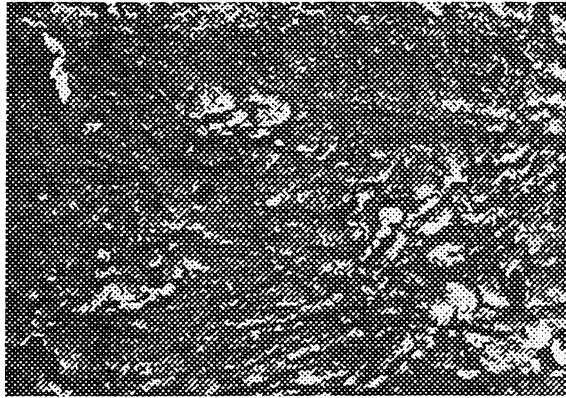


Fig 11-b; Strat XI; x5700

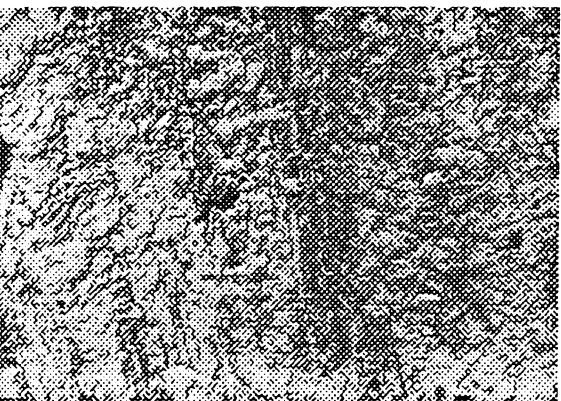


Fig 12-a; Strat XII; x2700

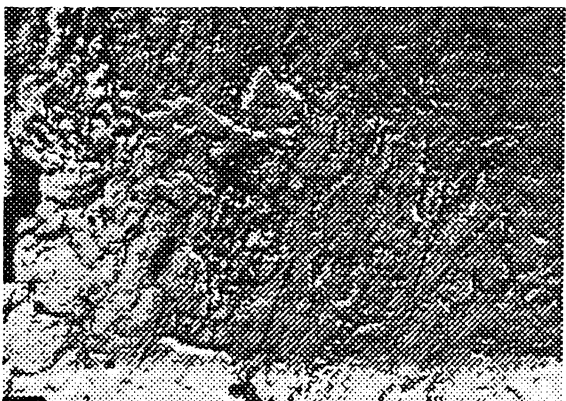


Fig 12-b; Strat XII; x5700

PLANSA IV

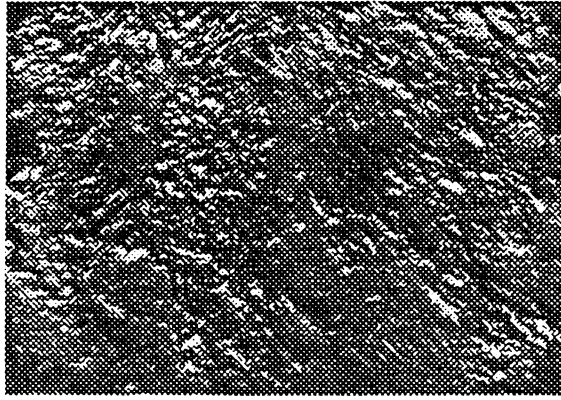


Fig 13-a; Strat XIII; x2700

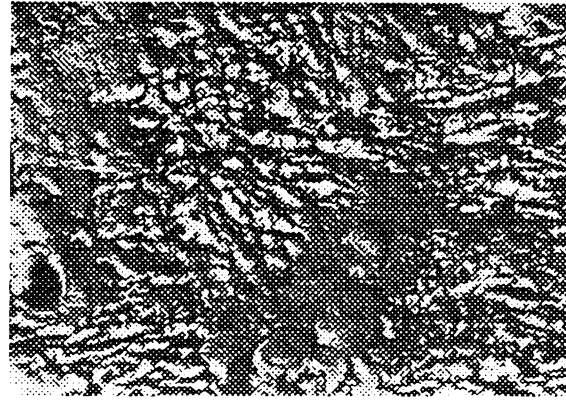


Fig 13-b; Strat XIII; x5700

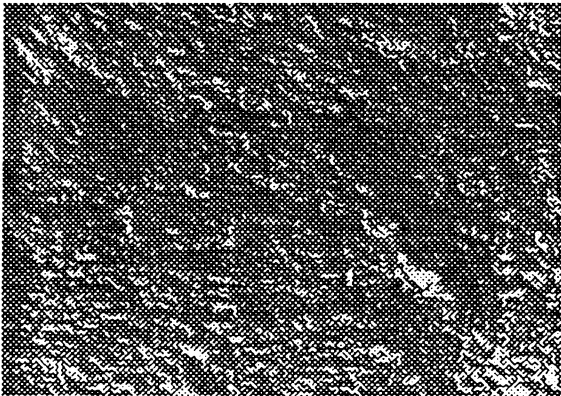


Fig 14-a; Strat XIV; x2700

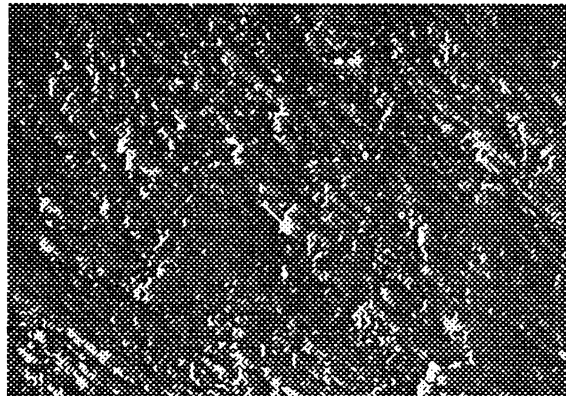


Fig 14-b; Strat XIV; x5700

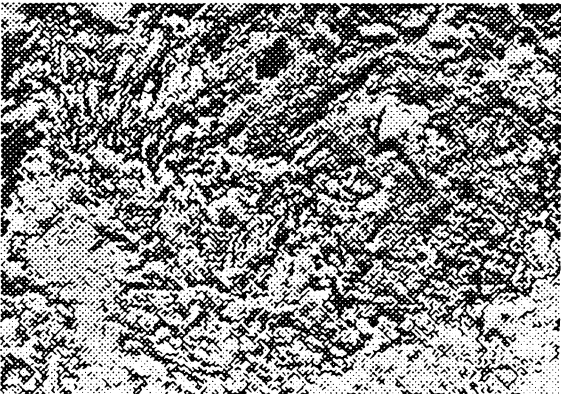


Fig 15-a; Strat XV; x2700

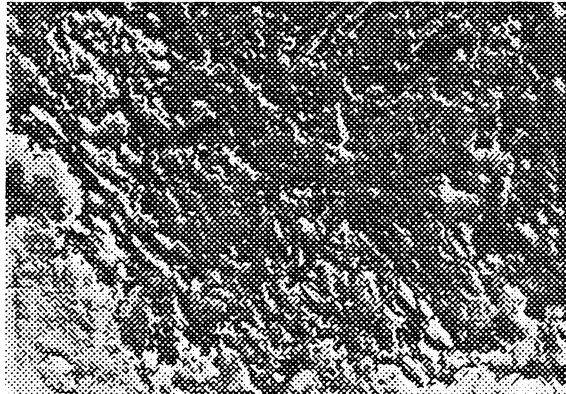


Fig 15-b; Strat XV; x5700

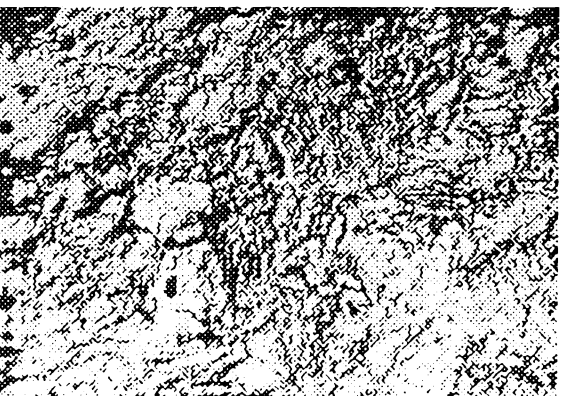


Fig 16-a; Strat XVI; x2700

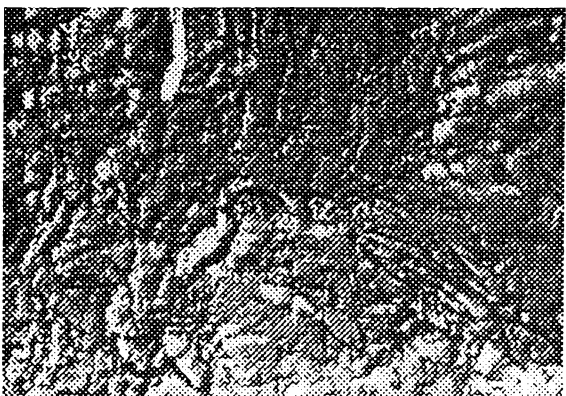


Fig 16-b; Strat XVI; x5700

PLANSA V



Fig 17-a; Strat XVII; x2700

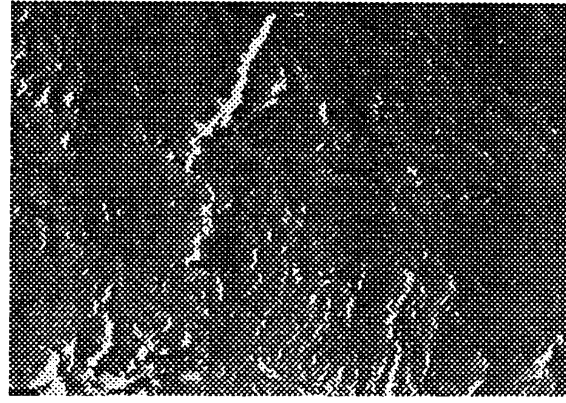


Fig 17-b; Strat XVII; x5700



Fig 18-a; Strat XVIII; x2700

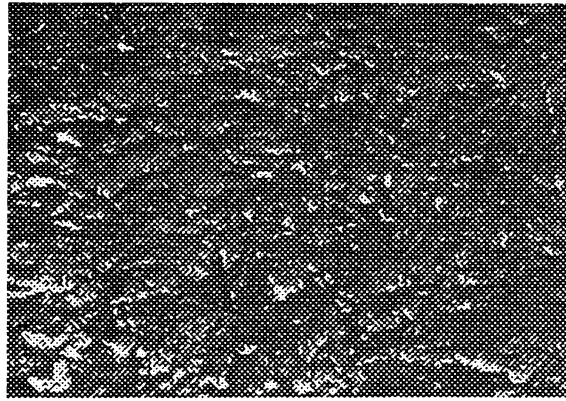


Fig 18-b; Strat XVIII; x5700

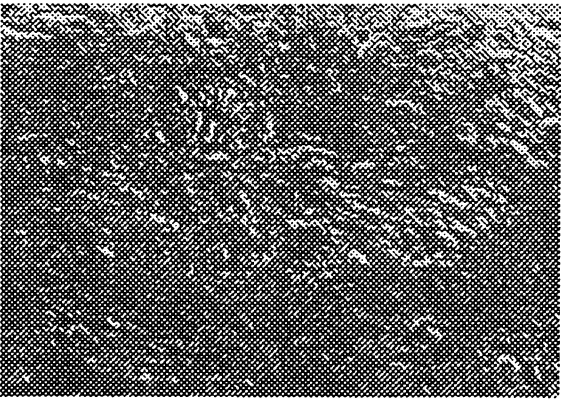


Fig 19-a; Strat XIX; x2700

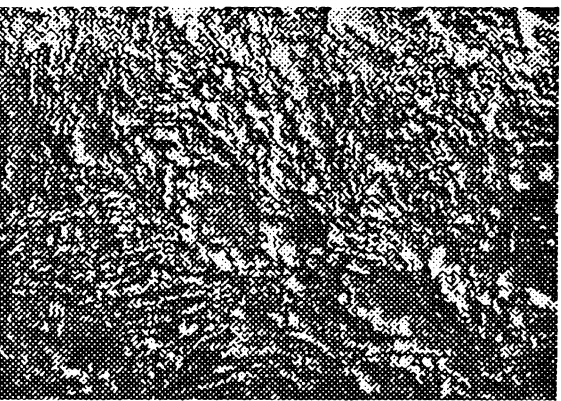


Fig 20-a; Strat XX; x2700

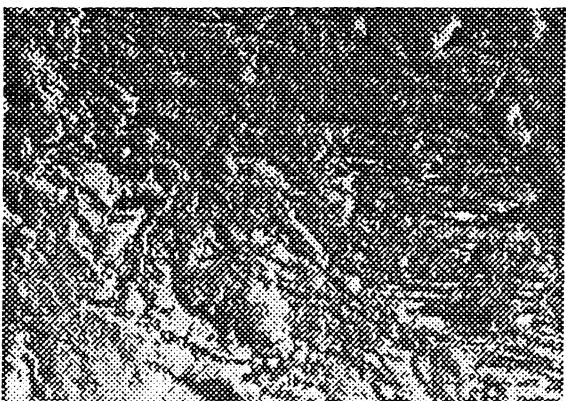


Fig 20-b; Strat XX; x5700

PLANSA VI

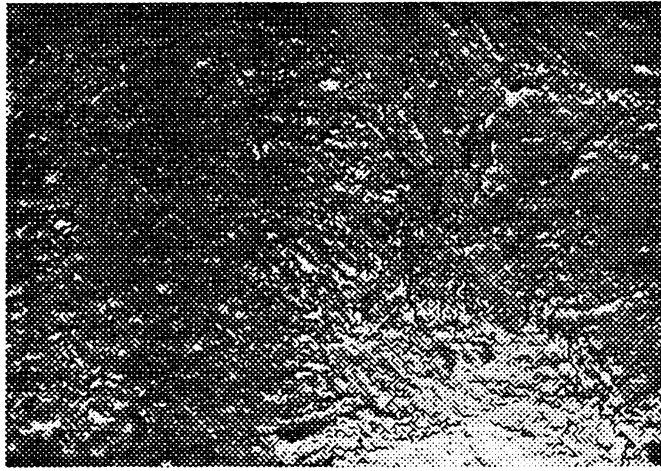


Fig 21-a; Strat XXI; x2700

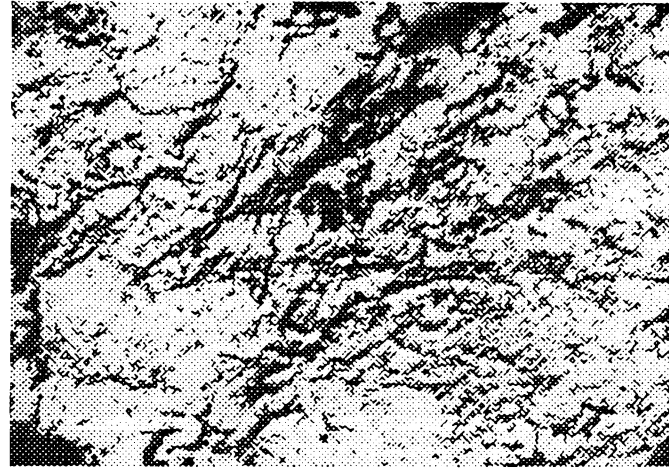


Fig 21-b; Strat XXI; x5700



Fig 22-a; Strat XXII; x2700

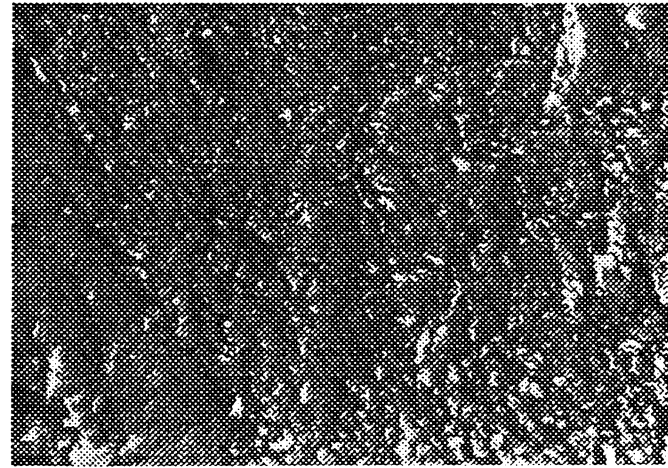


Fig 22-b; Strat XXII; x5700

Fig.4.1.1.2. Planșe fotografice (I-VI) care evidențiază modificările structurale ce au intervenit în straturile superficiale, prelucrate prin strunjire, ale oțelului 90VMoC15

Influența prelucrării prin aşchiere la strung asupra durității suprafețelor aşchiate a fost stabilită cu ajutorul unui aparat Rockwell (penetrator-bilă), prin efectuarea măsurătorilor de duritate de-a lungul celor trei generatoare dispuse la 120° , asupra celor 22 de straturi prelucrate (fig.4.1.1.1)

Rezultatele medii obținute și transformate în unități Brinell sunt redată în tabelul 4.1.1. Aceste valori evidențiază elemente care concordă cu aspectele microstructurale prezentate. Se observă că, la starea inițială a materialului (perlită lamelară grosieră + carburi), apar valori de duritate cuprinse între 260...270 HB (straturile I...VII), iar pe măsura creșterii adâncimii de aşchiere, duritatea crește puternic, atingând valori de până la 400...415 HB.

Evoluția valorilor de duritate superficială pe adâncimea stratului strunjit este o consecință a modificărilor structurale survenite în matricea perlitică.

De asemenea, această creștere a durității este o urmare a creșterii cantității de compuși secundari, precum și a stării de tensiuni interne și de alte imperfecțiuni structurale.

Se apreciază în mod deosebit că apare o deplină concordanță între rezultatele cercetărilor metalografice întreprinse cu ajutorul microscopului electronic și rezultatele valorilor obținute la determinarea durității straturilor prelucrate prin aşchiere (așa cum se observă în figura 4.1.1.1.)

Marcaj	Duritate echivalentă HB	Marcaj	Duritate echivalentă HB
I	262	XII	285
II	277	XIII	269
III	277	XIV	330
IV	269	XV	302
V	262	XVI	330
VI	269	XVII	363
VII	277	XVIII	352
VIII	285	XIX	330
IX	262	XX	363

Marcaj	Duritate echivalentă HB	Marcaj	Duritate echivalentă HB
X	277	XXI	401
XI	330	XXII	415

Fig. 4.1.1. - Determinarea durității suprafețelor prelucrate prin așchiera la strung a cilindrilor de laminor din oțel 90VMoC15

b) cazul strunjirii cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață

Pentru oțelul 90VMoC15 analizat - ca și în cazul oțelurilor OLC45, OLC60, Rp3 și T105M120 [2], nu s-au constatat modificări structurale esențiale față de cazul strunjirii fără preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, micrografiile fiind practic identice cu cele prezentate la paragraful a) (fig.4.1.1.2.)

Totuși, fiind cunoscut faptul că în cursul procesului de așchiere local, în zona de așchiere mai apare căldură datorită frecărilor dintre așchie și cuțit și, îndeosebi, dintre fața de așezare a cuțitului și piesa supusă prelucrării, temperatura suprafeței prelucrate a piesei poate depăși anumite limite, care să producă transformări structurale nedorite, preponderent în stratul de suprafață încălzit, strat așchiat în timpul prelucrării.

În cazul oțelului 90VMoC15, prelucrarea prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață nu duce la creșterea accentuată a durității, întrucât nu se produce ecruisarea pronunțată de la așchiera fără preîncălzire a oțelului în cauză, aspect sesizabil, cu precădere, la adâncimi de așchiere mari (peste 2 mm).

4.1.2. Stabilirea concordanței dintre valorile determinate experimental pentru componentele forței de așchiere și cele rezultate prin modelare matematică, în cazul oțelurilor 90VMoC15, RUL1 și 50CrNi12

Determinările experimentale au fost efectuate cu ajutorul instalației de strunjire cu preîncălzire inductivă descrisă la Capitolul 2 (paragraful 2.3.2., respectiv figura 2.3.2.3.), prevăzută inclusiv cu portcuțit dinamometric și stabilizator de presiune cu traductori pentru determinarea componentelor forței de așchiere.

Compoziția chimică a oțelurilor 90VMoC15 și 50CrNi12 a fost menționată la Capitolul 2 (completare la fig.2.2.3.4., respectiv Tabel 2.2.4.1.), iar pentru oțelul RUL1, aceasta este (STAS1456/1-89):

$C=0,95-1,1$; $Mn=0,2-0,45$; $Si=0,17-0,37$; $Cr=1,3-1,65$; $S_{max}=0,020$; $P_{max}=0,027$; $Ni_{max}=0,30$; $Cu_{max}=0,25$. Se admite, în compoziția chimică max.0,08% Mo și max.0,40% Cu + Ni (Abaterile limită la compoziția chimică: $C=\pm 0,02$; $Mn=+0,05/0$; $Si=+0,03/-0,02$; $Cr=+0,05/0$; $S=+0,02/0$; $P=+0,02/0$).

Duritatea maximă pentru oțelul RUL1: 61HRC.

Structura oțelului RUL1, atât după strunjire fără, cât și cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, este formată din perlită cu carburi fine, uniform distribuite, structură caracteristică tratamentului termic de recoacere de globulizare care i se aplică.

Determinările experimentale s-au făcut pentru următoarele cinci valori ale rezistenței la rupere R_m a oțelurilor analizate, parametru prin care acestea se identifică în cadrul modelului matematic:

- a) oțelul 90VMoC15 (după tratamentul termic primar, respectiv în stare recoaptă: $R_m=70 \text{ kgf/mm}^2$ (tabelul 4.1.2.1.);
- b) oțelul 90VMoC15 (după tratamentul termic secundar, respectiv călit în masă și revenit înalt sau, pentru varianta recondiționării, cu stratul călit de suprafață prin inducție electromagnetică așchiat): $R_m=87 \text{ kgf/mm}^2$ (tabelul 4.1.2.2.);

- c) oțelul 90VMoC15 (după tratamentul termic final, respectiv călit de suprafață prin inducție electromagnetică): $R_m=98 \text{ kgf/mm}^2$ (precizăm că cilindrul-probă prezintă un grad de uzură care impune recondiționarea sa)(tabelul 4.1.2.3.);
- d) oțelul RUL1 (în stare recoaptă): $R_m=105 \text{ kgf/mm}^2$ (tabelul 4.1.2.4.);
- e) oțelul 50CrNi12. (după tratamentul termic secundar, respectiv călit în masă și revenit înalt): $R_m=77 \text{ kgf/mm}^2$ (Tabelul 4.1.2.5.)

Menționăm că valorile parametrilor variabili ai regimului de lucru, pentru determinările experimentale, sunt evidențiate în tabelele 4.1.2.1....4.1.2.5., ceilalți parametri păstrându-se la valorile (constante) precizate la subcapitolul 4.1.

În tabelele 4.1.2.1...4.1.2.5., sunt evidențiate, comparativ, valorile componentelor forței de așchiere determinate experimental, respectiv rezultate în urma modelării matematice, fiind evidențiată (procentual) și eroarea (diferența între aceste valori) pentru fiecare determinare. Acest mod de verificare (experimentală) are scopul de a confirma concluzia că precizia de exprimare a modelului matematic este corespunzătoare (peste 90%), concluzie formulată în urma aplicării programului STATGRAPHICS.

Tabel 4.1.2.1...4.1.2.5. Valorile comparative ale componentelor forței de așchiere, determinate experimental și rezultate din ecuațiile modelului matematic, pentru cazurile a)... e). (Observație: În cazurile c) și d), factorul de influență R_m depășește puțin domeniul de exprimare a modelului matematic creat).

Oțel 90VMoC15 în stare recoaptă ($R_m=70 \text{ kgf/mm}^2$)												
Nr. Crt	Avans long s_1 mm/rot	Adân Cime așch. t mm	Temperatura T °C	F_{xexp} DaN	F_{xmod} daN	Eroare E_{Fx} %	F_{yexp} daN	F_{ymod} daN	Eroare E_{Fy} %	F_{zexp} daN	F_{zmod} daN	Eroare E_{Fz} %
1	0,21	1	25	44	49,82	14,2	60	71,02	19,3	122	149,8	23,1
2	0,21	1	550	15	11,44	23,7	26	21,01	18,8	52	37,8	27,3
3	0,21	2	25	66	73,37	10,8	92	102,4	11,7	213	251,1	17,6
4	0,21	2	550	37	35,00	5,9	58	52,47	8,9	157	139,1	11,5
5	0,3	1	25	55	59,47	8,7	79	87,01	10,3	175	194,0	10,7
6	0,3	1	550	24	21,09	10,9	40	37,01	7,5	88	82,05	6,9
7	0,3	2	25	112	102,7	8,3	127	135,6	6,8	272	295,3	8,7
8	0,3	2	550	71	64,41	9,8	82	85,61	5,5	174	183,3	5,3
9	0,42	1	25	65	72,33	11,7	128	108,3	15,2	266	252,9	4,9
10	0,42	1	550	35	33,96	4,7	66	58,35	11,7	151	140,8	7,0
11	0,42	2	25	161	142,0	12,1	173	179,8	3,7	322	354,2	10,1
12	0,42	2	550	93	103,6	11,5	122	129,8	6,3	233	242,2	3,8
				Eroare medie F_x, E_{Fx} %			Eroare medie F_y, E_{Fy} %			Eroare medie F_z, E_{Fz} %		
				11,02			10,50			11,41		

Tabel 4.1.2.1.

Oțel 90VMoC15 călit în masă și revenit înalt ($R_m=87 \text{ kgf/mm}^2$)												
Nr. Crt	Avans long s_1 mm/rot	Adâncime așch. t mm	Temperatură $T^\circ\text{C}$	$F_{x\text{exp}}$ DaN	$F_{x\text{mod}}$ daN	Eroare E_{Fx} %	$F_{y\text{exp}}$ daN	$F_{y\text{mod}}$ daN	Eroare E_{Fy} %	$F_{z\text{exp}}$ daN	$F_{z\text{mod}}$ DaN	Eroare E_{Fz} %
1	0,21	1	25	74	83,43	13,2	107	123,6	16,0	234	266,5	14,1
2	0,21	1	550	49	45,05	8,6	66	73,61	11,2	171	154,5	9,7
3	0,21	2	25	142	156,0	10,1	192	210,9	10,1	415	494,0	19,0
4	0,21	2	550	104	117,6	12,8	147	160,9	8,9	393	382,0	22,0
5	0,3	1	25	101	111,2	9,7	153	164,1	7,1	314	365,8	16,6
6	0,3	1	550	66	72,90	11,2	120	114,1	5,2	272	253,8	6,8
7	0,3	2	25	209	203,6	3,9	299	268,5	10,3	545	593,3	8,9
8	0,3	2	550	178	165,3	7,2	241	218,5	9,5	436	481,3	10,3
9	0,42	1	25	138	148,4	7,5	210	218,0	3,9	517	498,2	3,7
10	0,42	1	550	97	110,0	14,0	182	168,0	7,8	411	386,2	6,1
11	0,42	2	25	259	267,1	3,2	311	345,4	11,1	661	725,8	9,8
12	0,42	2	550	209	228,7	9,1	259	295,4	14,0	552	613,8	11,2
				Eroare medie $F_x, E_{Fx}\%$ 9,21			Eroare medie $F_y, E_{Fy}\%$ 9,59			Eroare medie $F_z, E_{Fz}\%$ 11,52		

Tabel 4.1.2.2

Oțel 90VMoC15 călit de suprafață ($R_m=98 \text{ kgf/mm}^2$)												
Nr. Crt	Avans long s_1 mm/rot	Adâncime așch. t mm	Temperatură $T^{\circ}\text{C}$	$F_{x\text{exp}}$ daN	$F_{x\text{mod}}$ daN	Eroare E_{F_x} %	$F_{y\text{exp}}$ daN	$F_{y\text{mod}}$ daN	Eroare E_{F_y} %	$F_{z\text{exp}}$ daN	$F_{z\text{mod}}$ daN	Eroare E_{F_z} %
1	0,21	1	25	93	105,1	12,8	172	157,6	8,6	310	341,9	10,4
2	0,21	1	550	59	66,80	14,0	98	107,6	10,3	202	229,9	14,0
3	0,21	2	25	190	209,5	10,2	251	281,0	12,1	595	651,2	9,5
4	0,21	2	550	159	171,1	7,5	199	231,0	16,3	482	539,2	11,7
5	0,3	1	25	152	144,7	5,2	197	213,9	8,5	505	476,9	5,7
6	0,3	1	550	116	106,4	8,1	170	163,9	3,9	397	364,9	8,2
7	0,3	2	25	242	268,9	11,1	319	354,5	11,2	701	786,2	12,1
8	0,3	2	550	200	230,5	15,3	265	304,5	15,0	614	674,2	9,8
9	0,42	1	25	213	197,6	7,5	269	289,1	7,3	711	656,9	7,7
10	0,42	1	550	154	159,2	3,7	214	239,1	11,9	607	544,9	10,2
11	0,42	2	25	311	348,1	11,8	427	452,5	5,9	845	966,2	14,3
12	0,42	2	550	274	309,7	13,0	307	402,5	13,1	772	854,2	10,6
				Eroare medie F_x, E_{F_x} % 10,02			Eroare medie F_y, E_{F_y} % 10,34			Eroare medie F_z, E_{F_z} % 10,44		

Tabel 4.1.2.3.

Oțel RUL1 (în stare recoaptă; $R_m=105 \text{ kgf/mm}^2$)												
Nr. Crt	Avans long s_1 mm/rot	Adâncime așch. t mm	Temperatură $T^{\circ}\text{C}$	$F_{x\text{exp}}$ daN	$F_{x\text{mod}}$ daN	Eroare E_{Fx} %	$F_{y\text{exp}}$ daN	$F_{y\text{mod}}$ daN	Eroare E_{Fy} %	$F_{z\text{exp}}$ daN	$F_{z\text{mod}}$ daN	Eroare E_{Fz} %
1	0,21	1	25	122	119,0	3,2	189	179,3	5,3	415	390,0	6,2
2	0,21	1	550	85	80,64	5,7	133	129,3	2,9	292	278,0	4,7
3	0,21	2	25	233	243,6	4,7	302	325,7	7,8	714	751,2	5,2
4	0,21	2	550	188	205,2	9,3	250	275,7	10,2	583	639,2	9,6
5	0,3	1	25	147	166,1	13,2	261	245,7	5,9	588	547,7	6,9
6	0,3	1	550	115	127,7	11,0	208	195,7	6,0	427	435,7	2,1
7	0,3	2	25	281	310,4	10,6	378	409,3	8,1	816	908,9	11,4
8	0,3	2	550	248	272,1	9,8	322	359,3	11,4	728	796,9	9,5
9	0,42	1	25	213	228,9	7,5	311	334,2	7,5	826	757,9	8,3
10	0,42	1	550	167	190,5	14,1	262	284,2	8,4	693	645,9	6,8
11	0,42	2	25	411	399,6	2,8	490	520,7	6,3	981	1119	14,1
12	0,42	2	550	381	361,2	5,2	431	470,7	9,1	914	1007	10,3
				Eroare medie F_x, E_{Fx} % 8,09			Eroare medie F_y, E_{Fy} % 7,41			Eroare medie F_z, E_{Fz} % 7,93		

Tabel 4.1.2.4

Oțel 50CrNi12 călit în masă și revenit înalt ($R_m=77 \text{ kgf/mm}^2$)												
Nr. Crt	Avans long s_1 mm/rot	Adâncime aşch. t mm	Temperatură $T^\circ\text{C}$	$F_{x\text{exp}}$ daN	$F_{x\text{mod}}$ daN	Eroare E_{F_x} %	$F_{y\text{exp}}$ daN	$F_{y\text{mod}}$ daN	Eroare E_{F_y} %	$F_{z\text{exp}}$ daN	$F_{z\text{mod}}$ daN	Eroare E_{F_z} %
1	0,21	1	25	57	63,66	14,3	79	92,67	18,1	171	197,9	15,5
2	0,21	1	550	31	25,28	19,8	47	42,67	9,6	97	85,90	12,8
3	0,21	2	25	100	107,4	7,1	133	147,1	10,2	323	351,1	8,6
4	0,21	2	550	73	69,04	5,3	105	97,12	7,8	224	239,1	6,5
5	0,3	1	25	84	80,80	3,8	123	118,7	4,0	275	264,7	3,9
6	0,3	1	550	48	42,42	11,4	75	68,75	8,3	161	152,7	5,7
7	0,3	2	25	131	144,3	9,8	171	190,3	11,1	373	418,0	12,0
8	0,3	2	550	103	105,9	2,7	135	140,3	4,2	285	306,0	7,3
9	0,42	1	25	111	103,6	7,2	167	153,5	8,0	364	353,9	2,7
10	0,42	1	550	72	65,28	9,4	111	103,5	6,7	253	241,9	4,3
11	0,42	2	25	173	193,5	12,0	222	247,9	11,4	461	507,2	9,9
12	0,42	2	550	137	155,1	13,3	177	197,9	12,6	358	395,2	10,5
				Eroare medie F_x, E_{F_x} % 9,67			Eroare medie F_y, E_{F_y} % 9,34			Eroare medie F_z, E_{F_z} % 8,31		

Tabel 4.1.2.5.

4.2. Verificarea experimentală a modelării matematice a rugozității suprafețelor prelucrate

Condițiile de efectuare a determinărilor experimentale sunt identice cu cele descrise la subcapitolul 4.1., în cazul modelării matematice a forței de așchiere.

Pentru determinarea rugozității, a fost utilizat un aparat tip “Surtronic”, produs de Rank Precision Industries-Metrology Division.

Aparatul permite determinarea rugozității suprafețelor, respectiv a parametrului R_a , prin citire directă, fără înregistrare grafică [2][57]

Stabilirea concordanței dintre valorile determinate experimental pentru rugozitatea suprafeței prelucrate și cele rezultate prin modelare matematică, în cazul aceluiași oțeluri, respectiv pentru aceleași valori ale rezistenței la rupere, precizate la subcapitolul 4.1., este realizată și evidențiată în tabelele 4.2.1...4.2.5.

Tabel 4.2.1...4.2.5. Valorile comparative ale rugozității suprafețelor prelucrate, pentru cazurile a)... e) (paragraful 4.1.2.)

Oțel 90VMoC15 în stare recoaptă ($R_m=70 \text{ kgf/mm}^2$)						
Nr. Crt	Avans s_l long mm/rot	Adâncime așchiere t mm	Temperatură $T^\circ\text{C}$	$R_{a\text{exp}}$ mm	$R_{a\text{model}}$ Mm	Eroare E_{Ra} %
1	0,14	0,5	25	0,0055	0,005089284	7,5
2	0,14	0,5	550	0,0035	0,004214283	20,4
3	0,14	1	25	0,0065	0,006172617	5,1
4	0,14	1	550	0,0050	0,004555948	8,9
5	0,14	2	25	0,0070	0,008339282	19,2
6	0,14	2	550	0,0060	0,005239278	12,7
7	0,21	0,5	25	0,0060	0,005561159	7,4
8	0,21	0,5	550	0,0050	0,004686158	6,3
9	0,21	1	25	0,0055	0,006644492	20,8
10	0,21	1	550	0,0055	0,005027823	8,6
11	0,21	2	25	0,0075	0,008811157	17,5
12	0,21	2	550	0,0065	0,005711153	12,2
13	0,3	0,5	25	0,0070	0,006167855	11,9
14	0,3	0,5	550	0,0050	0,005292855	5,9
15	0,3	1	25	0,0065	0,007251188	11,6
16	0,3	1	550	0,0060	0,005634520	6,1
17	0,3	2	25	0,0085	0,009417853	10,8
18	0,3	2	550	0,0075	0,006317850	17,1
19	0,42	0,5	25	0,0080	0,006976784	12,8
20	0,42	0,5	550	0,0070	0,006101783	12,9
21	0,42	1	25	0,0085	0,008060116	5,2
22	0,42	1	550	0,0075	0,006443448	14,8
23	0,42	2	25	0,0090	0,010226781	13,6
24	0,42	2	550	0,00850	0,007126778	17,3
				Eroare medie R_a, E_{Ra} (%)		12,25

Tabel 4.2.1.

Oțel 90VMoC15 călit în masă și revenit înalt ($R_m=87 \text{ kgf/mm}^2$)							
Nr. Crt	Avans s_l mm/rot	long	Adâncime așchiere t mm	Temperatură $T^\circ\text{C}$	$R_{a\text{exp}}$ mm	$R_{a\text{model}}$ Mm	Eroare E_{Ra} %
1	0,14		0,5	25	0,0060	0,005704016	4,9
2	0,14		0,5	550	0,0040	0,004829015	20,7
3	0,14		1	25	0,0075	0,006787349	10,9
4	0,14		1	550	0,0045	0,005170680	14,9
5	0,14		2	25	0,0080	0,008954014	11,9
6	0,14		2	550	0,0065	0,005854010	9,9
7	0,21		0,5	25	0,0070	0,006175891	11,8
8	0,21		0,5	550	0,0060	0,005300890	11,6
9	0,21		1	25	0,0080	0,007259223	9,3
10	0,21		1	550	0,0070	0,005642555	19,4
11	0,21		2	25	0,0085	0,009425888	11,3
12	0,21		2	550	0,0070	0,006325885	9,6
13	0,3		0,5	25	0,0075	0,006782587	9,6
14	0,3		0,5	550	0,0065	0,005907587	9,1
15	0,3		1	25	0,0085	0,007865920	7,5
16	0,3		1	550	0,0070	0,006249252	10,7
17	0,3		2	25	0,0090	0,010035585	17,5
18	0,3		2	550	0,0080	0,006932582	13,4
19	0,42		0,5	25	0,0085	0,007591516	10,7
20	0,42		0,5	550	0,0060	0,006716515	11,9
21	0,42		1	25	0,0090	0,008674848	3,6
22	0,42		1	550	0,0060	0,007058180	17,6
23	0,42		2	25	0,0095	0,010841513	14,1
24	0,42		2	550	0,0085	0,007741510	8,9
					Eroare medie R_a, E_{Ra} (%)		11,45

Tabel 4.2.2.

Oțel 90VMoC15 călit de suprafață ($R_m=98 \text{ kgf/mm}^2$)							
Nr. Crt	Avans s_1 mm/rot	long	Adâncime așchiere t mm	Temperatură $T^\circ\text{C}$	$R_{a\text{exp}}$ mm	$R_{a\text{model}}$ mm	Eroare E_{Ra} %
1	0,14		0,5	25	0,0060	0,006101784	5,2
2	0,14		0,5	550	0,0045	0,005226783	13,6
3	0,14		1	25	0,0065	0,007185116	14,0
4	0,14		1	550	0,0060	0,005568448	7,2
5	0,14		2	25	0,0080	0,009351781	16,9
6	0,14		2	550	0,0070	0,006251778	10,7
7	0,21		0,5	25	0,0070	0,006573659	6,1
8	0,21		0,5	550	0,0050	0,005698658	13,9
9	0,21		1	25	0,0070	0,007656991	9,4
10	0,21		1	550	0,0065	0,006040323	7,1
11	0,21		2	25	0,0085	0,009823656	15,6
12	0,21		2	550	0,0075	0,006723653	10,4
13	0,3		0,5	25	0,0060	0,007180355	19,4
14	0,3		0,5	550	0,0050	0,006305354	26,1
15	0,3		1	25	0,0075	0,008263687	10,2
16	0,3		1	550	0,0070	0,006647019	5,1
17	0,3		2	25	0,0095	0,010430352	9,8
18	0,3		2	550	0,0085	0,007330349	13,7
19	0,42		0,5	25	0,0090	0,007989283	11,2
20	0,42		0,5	550	0,0085	0,007114283	16,3
21	0,42		1	25	0,0095	0,009072616	4,5
22	0,42		1	550	0,0085	0,007455948	12,3
23	0,42		2	25	0,0100	0,011239281	12,4
24	0,42		2	550	0,0095	0,008139278	15,4
					Eroare medie R_a, E_{Ra} (%)		11,95

Tabel 4.2.3.

Oțel RUL1 (în stare recoaptă: $R_m=105 \text{ kgf/mm}^2$)							
Nr. Crt	Avans s_1 mm/rot	long	Adâncime aşchiere t mm	Temperatură $T^\circ\text{C}$	$R_{a\text{exp}}$ mm	$R_{a\text{model}}$ mm	Eroare E_{Ra} %
1	0,14		0,5	25	0,0070	0,006354909	9,2
2	0,14		0,5	550	0,0065	0,005479908	15,7
3	0,14		1	25	0,0075	0,007438241	1,1
4	0,14		1	550	0,0070	0,005821573	16,9
5	0,14		2	25	0,0080	0,009604906	20,1
6	0,14		2	550	0,0075	0,006504903	13,3
7	0,21		0,5	25	0,0080	0,006826784	14,7
8	0,21		0,5	550	0,0070	0,005951783	14,9
9	0,21		1	25	0,0085	0,007910116	7,0
10	0,21		1	550	0,0080	0,006293448	21,3
11	0,21		2	25	0,0090	0,010076781	11,9
12	0,21		2	550	0,0085	0,006976778	17,9
13	0,3		0,5	25	0,0080	0,007433480	7,1
14	0,3		0,5	550	0,0075	0,006558479	12,6
15	0,3		1	25	0,0090	0,008516812	5,4
16	0,3		1	550	0,0080	0,006900144	13,8
17	0,3		2	25	0,0095	0,010683477	12,5
18	0,3		2	550	0,0090	0,007583474	15,7
19	0,42		0,5	25	0,0080	0,008242408	3,1
20	0,42		0,5	550	0,0065	0,007367408	13,4
21	0,42		1	25	0,0090	0,009325741	3,7
22	0,42		1	550	0,0070	0,007709073	10,1
23	0,42		2	25	0,0105	0,011492406	9,5
24	0,42		2	550	0,0095	0,008392403	11,7
					Eroare medie R_a, E_{Ra} (%)		11,80

Tabel 4.2.4.

Oțel 50CrNi12 călit în masă și revenit înalt ($R_m=77 \text{ kgf/mm}^2$)							
Nr. Crt	Avans s_1 mm/rot	long	Adâncime așchiere t mm	Temperatură $T^\circ\text{C}$	R_{aexp} mm	R_{amodel} Mm	Eroare E_{Ra} %
1	0,14		0,5	25	0,0055	0,005342409	2,9
2	0,14		0,5	550	0,0040	0,004467408	11,7
3	0,14		1	25	0,0060	0,006425742	7,1
4	0,14		1	550	0,0055	0,004809073	12,6
5	0,14		2	25	0,0070	0,008592407	22,8
6	0,14		2	550	0,0065	0,005492403	18,5
7	0,21		0,5	25	0,0065	0,005814284	10,6
8	0,21		0,5	550	0,0055	0,004939283	10,8
9	0,21		1	25	0,0075	0,006897616	8,1
10	0,21		1	550	0,0065	0,005280948	20,3
11	0,21		2	25	0,0080	0,009064281	13,3
12	0,21		2	550	0,0070	0,005964278	14,8
13	0,3		0,5	25	0,0070	0,006420980	8,3
14	0,3		0,5	550	0,0060	0,005545980	7,6
15	0,3		1	25	0,0070	0,007504313	7,2
16	0,3		1	550	0,0065	0,005887645	9,5
17	0,3		2	25	0,0085	0,009670978	13,8
18	0,3		2	550	0,0075	0,006570975	12,4
19	0,42		0,5	25	0,0065	0,007229909	11,3
20	0,42		0,5	550	0,0060	0,006354908	6,0
21	0,42		1	25	0,0070	0,008313241	18,8
22	0,42		1	550	0,0065	0,006696573	3,0
23	0,42		2	25	0,0090	0,010479906	16,4
24	0,42		2	550	0,0085	0,007379903	13,2
					Eroare medie R_a, E_{Ra} (%)		11,56

Tabel 4.2.5.

4.3. Aplicabilitatea modelelor matematice create și verificate în domeniul recondiționării cilindrilor de laminor din oțel

Conform celor menționate la Capitolul 2 (subcapitolul 2.3., paragraf 2.3.1.), toți cilindrii de laminare uzați sunt refolosiți în urma aplicării - funcție de gradul de uzură - a unor variante tehnologice [3][4][6][52][54]. Una din aceste variante tehnologice constă în restrunjirea cilindrilor, redurificarea tăbliei cilindrilor, respectiv rectificarea acestora. În cadrul acestei variante tehnologice, s-au demonstrat experimental avantajele strunjirii (restrunjirii) cilindrilor cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, în special la oțelurile greu prelucrabile din cauza caracteristicilor fizico-mecanice superioare (Capitolul 2, paragraf 2.3.2.)

Modelele matematice create și verificate în cadrul prezentei teze de doctorat permit stabilirea regimurilor optime de lucru (temperatură, respectiv parametri electrici ai instalației de inducție electromagnetică; avans longitudinal; adâncime de așchiere; ceilalți parametri fiind constanți), în vederea strunjirii cu preîncălzire inductivă a oricărui oțel greu prelucrabil din gama celor utilizați la confecționarea cilindrilor de laminor (o aplicație importantă fiind pentru cilindrii de laminare la rece), și nu numai.

Efectiv, stabilirea acestor regimuri optime se poate realiza fie în cadrul programului STATGRAPHICS, fie direct, prin analizarea suprafețelor de răspuns corespunzătoare funcțiilor obiectiv F_x , F_y , F_z și R_a (fig.3.3.2.2.3. și fig.3.3.2.3.3.), ținând cont de faptul că, tehnologic, interesează scăderea valorilor forței de așchiere (componentelor acesteia, cu precădere a lui F_z) și rugozității suprafețelor prelucrate (aceasta din urmă în vederea reducerii numărului de treceri la etapa de rectificare cilindrică exterioară).

4.4. Norme de protecție a muncii la utilizarea instalației de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață

Sucesiunea operațiilor pentru pornirea instalației va fi următoarea:

1. pornire apă convertizor
2. pornire și verificare apă baterie la fiecare circuit
3. cuplare tensiune
4. verificare tensiune la panou (cheia alimentare comandă poz.1)
5. facultativ, verificare tensiune între faze prin comutator tensiune
6. verificarea ușilor și panourilor (să fie închise)
7. pornire motor (cca 40 sec)
8. verificare poziție potențiometre (la minim, atât automat, cât și manual)
9. comutatorul pe poziția INDIVIDUAL (permanent, pentru funcționare generator)
10. cuplare MF (circuit de medie frecvență), când motorul a trecut pe poziția “lampă motor pornit aprinsă”
11. reglare tensiune MF la valoarea dorită. Valori maximale admise:
 - tensiune: 750 V
 - curenți: 180 A
 - curent excitație: 7A
12. acordul circuitului de M.F. se face cu cheia. Reglare excitație pe poziția “MANUAL”

Prin conectarea numărului de spire la primarul transformatorului de adaptare de la 10/1;2...22/1;2 spire și cuplarea în circuitul oscilant a capacităților cuprinse între 1,2...44 μF , pentru obținerea unui $\cos\varphi = 0,7...0,9$ capacitiv (la tensiune nominală de 750V). Capacele se introduc în trepte fine de $1/8 = 1,2 \mu\text{F}$, $1/4 = 2,4 \mu\text{F}$, $1/2 = 5,5 \mu\text{F}$, $1 = 11 \mu\text{F}$, prin strângerea piulițelor de contact.

13. după realizarea acordului, cheia comutatorului “REGLARE EXCITAȚIE” se trece pe poziția “AUTOMAt”
14. în cazul nefuncționării pe poziția “AUTOMAT”, se va lucra pe poziția “MANUAL”
15. se vor respecta NTS pentru instalații de încălzire prin inducție
16. nu se fac manevrări sub tensiune de medie frecvență (obligatoriu excitația “OPRIT”)

La oprire:

1. decuplare MF
2. decuplare motor
3. decuplare tensiunea de la rețea
4. apă continuă răcire: - 15 minute la instalație și 30 minute la generator.

Precizăm că temperatura de încălzire, care influențează plasticitatea oțelurilor și forța de așchiere, se realizează - la sistemul de încălzire - cu curenți de înaltă frecvență, în funcție de următorii parametri:

- frecvența curentului, care este constantă ($f=8000\text{Hz}$), în cazul instalației de față. Există instalații care permit reglarea frecvenței, acestea utilizându-se, în general, pentru variația adâncimii de încălzire;
- tensiunea și curentul de alimentare al inductorului;
- distanța dintre inductor și suprafața cilindrului supus prelucrării;
- timpul de încălzire.

Prelucrarea prin așchiere cu preîncălzire inductivă a cilindrilor de laminor din oțel, deși nu prezintă - în condițiile instalației proiectate - pericole deosebite, trebuie efectuată, totuși, cu respectarea următoarelor măsuri de protecție a muncii:

1. muncitorul va trebui să fie echipat cu mănuși din azbest, utilizat și la sudarea cu arc electric, pentru manevrarea cilindrilor supuși prelucrării, precum și în timpul îndepărtării așchiilor detașate;

2. muncitorul trebuie protejat de instalația de încălzire, fiind interzisă introducerea mâinii sau a diverselor scule în zona inductorului;
3. se vor folosi ecrane de protecție, mai ales că așchiile nu pot fi sfărâmate (în general, ele sunt continuii);
4. este strict interzisă prelucrarea cilindrilor care prezintă fisuri sau crăpături;
5. este necesar a se asigura o ventilație bună în cazul în care se folosesc lubrifianți care dau vapori toxici sau dacă piesa este stropită cu ulei;
6. dacă vreo parte a instalației se încălzește în mod excesiv, se controlează temperatura apei și, dacă este necesar, să mărește circulația acesteia.

CONCLUZII GENERALE SI CONTRIBUȚII ORIGINALE

5.1. Concluzii generale

Analiza de ansamblu a tezei de doctorat elaborată arată că principalele obiective ale acesteia și anume:

- evidențierea stadiului actual și a tendințelor de evoluție ale procedeelelor și proceselor de prelucrare și recondiționare a cilindrilor de laminor din oțel,
- elaborarea unor modele matematice - pentru funcțiile obiectiv ale procesului: componentele forței de așchiere F_x , F_y , F_z și rugozitatea suprafețelor prelucrate R_a - pe baza cărora să se poată stabili regimurile optime de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață (temperatură, avans longitudinal, adâncime de așchiere, păstrând constanți ceilalți factori de influență ai sistemului tehnologic), pentru orice oțel greu prelucrabil datorită caracteristicilor fizico-mecanice superioare (identificabil prin rezistența la rupere standardizată), precum și stabilirea altor direcții de optimizare,
- verificarea experimentală a preciziei de exprimare a modelelor matematice elaborate, respectiv stabilirea concordanței dintre valorile determinate experimental pentru funcțiile obiectiv sus-menționate și cele reieșite din ecuațiile rezultate prin modelare matematică, pentru trei oțeluri (respectiv cinci valori distincte ale parametrului rezistență la rupere), folosite la confecționarea cilindrilor de laminor, au fost îndeplinite.

Principalele preocupări și tendințe actuale în domeniul conținutului tezei de doctorat sunt următoarele:

abordarea sistemică a interacțiunilor ce au loc în spațiul de lucru, în scopul definirii cât mai complete a fenomenelor din interiorul acestor procese;

extinderea modelelor matematice și dezvoltarea de noi modele care să înlocuiască determinările experimentale laborioase existente în momentul de față;

creșterea interesului pentru aceste tehnologii, prin evidențierea performanțelor pe care le conferă și găsirea unor potențiali beneficiari care să le implementeze pe scară industrială.

Domeniul de aplicare optimă a prelucrării prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață este cel al recondiționării cilindrilor de laminor, în primul rând al cilindrilor de laminare la rece, confecționați din oțeluri greu prelucrabile prin așchiere datorită caracteristicilor fizico-mecanice superioare.

5.2. Contribuții originale

- identificarea aplicațiilor industriale din domeniul prelucrării și recondiționării cilindrilor de laminor (din oțel), în care se utilizează instalații de încălzire prin inducție electromagnetică;
- detalierea variantelor semnificative care utilizează prelucrări prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, în primul rând în domeniul recondiționării cilindrilor de laminor din oțel;
- perfecționarea instalațiilor de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață a cilindrilor de laminor, utilizată pentru determinările experimentale evidențiate în cadrul tezei de doctorat, prin utilizarea inductorilor semicirculari prevăzuți cu tole de tablă silicioasă

pentru concentrarea fluxului magnetic și prin proiectarea (utilizarea) pinolei adaptabile la strungul SNA500, prevăzută cu arcuri disc multiple, capabilă să compenseze dilatățile termice axiale ale cilindrilor;

- elaborarea unui model generalizat al sistemelor tehnologice de prelucrare prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, pe baza variantelor și detaliilor individuale relevate de stadiul actual al acestor prelucrări;
- identificarea factorilor de influență, inclusiv gruparea lor în mai multe submulțimi atribuite obiectului de prelucrat, sculei așchietoare, instalației de încălzire prin inducție electromagnetică, respectiv cinematicii și poziției relative spațiale a elementelor primelor trei submulțimi;
- elaborarea unor modele matematice - pentru funcțiile obiectiv “componentele forței de așchiere F_x , F_y , F_z ”, respectiv “rugozitatea suprafețelor prelucrate R_a ” - pe baza cărora să se poată stabili regimurile optime de strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață (temperatură, avans longitudinal, adâncime de așchiere, păstrând constanți ceilalți factori de influență ai sistemului tehnologic), pentru orice oțel greu prelucrabil datorită caracteristicilor fizico-mecanice superioare (identificabil prin rezistența la rupere standardizată);
- verificarea experimentală a preciziei de exprimare a modelelor matematice elaborate pentru trei oțeluri (cinci valori distincte ale parametrului rezistență la rupere), folosite la confecționarea cilindrilor de laminor;
- identificarea altor direcții de optimizare în domeniul recondiționării cilindrilor de laminor din oțel.

Teza de doctorat nu și-a propus și nu a epuizat aprofundarea problematicii prelucrărilor prin strunjire cu preîncălzire inductivă a stratului de suprafață, respectiv a variantei tehnologice de re folosire a cilindrilor de laminor ce include această etapă de recondiționare, ea reprezentând doar un mod nou, de abordare sistemică, a acestor tehnologii. Prezenta lucrare deschide posibilitatea continuării cercetărilor fundamentale și experimentale, în vederea aplicării rezultatelor într-un circuit productiv.

BIBLIOGRAFIE

1. Nanu A. - *Tehnologia materialelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
2. Breștin A. - *Teza de doctorat ("Studiul influenței preîncălzirii inductive a stratului de suprafață la oțelurile supuse prelucrării prin așchiere la strung")*, Biblioteca I.P.T., 1972.
3. *** - Standardul de ramură STR-01-1988, S.C."IMGB" SA București: "*Cilindri din oțel forjat pentru laminare la rece*".
4. *** - Standardul de ramură STR-02-1989, Ministerul Industriei Metalurgice (S.C."IMGB"SA București): "*Cilindri din oțel forjat pentru laminare la cald*".
5. Rădulescu C., ș.a. - *Utilaje de laminoare*, Editura Tehnică, 1988.
6. *** - *La fabrication des cylindres de laminoir*. În "*La Metallurgie*", ed.1989.
7. Gâdea S.ș.a. - *Manualul inginerului metalurg*, vol.II, Editura Tehnică, București, 1982.
8. Loqvist K.ș.a. - *New roll design incorporating cemented carbide for hot rolling of wire rod*, Comunicare științifică, 1992.
9. Hartmann G. - *Erfahrungen mit dem Einsatz von Hartmetall als Walzenwerkstoff*. In: *Stahl u.Eisen*, ed.1993.
10. Neumann H. - *Kalibrieren von Walzn*, Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, ed.1991
11. Sandvik - *Referat cercetare "Hard Materials"*, Austria, A-1211 Wien, 1998
12. Neumann H. - *Stahlrohrherstellung*, Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, ed.1992
13. Sluhoțkii A.E.ș.a. - *Inductoare pentru încălzirea electrică*, Editura "Energhia", 1982

14. Enache Ș. - *Calitatea suprafețelor prelucrate*, Editura Tehnică, ed.1987
15. Pregla, Reinhold - *Elektrotechnik, vol.2 - Induktion, Wechselstrome, Elektromechanische Energieumformung*, Heidelberg, Huthig Buch., 1990
16. *** - *Simularea încălzirii prin inducție electromagnetică a pieselor cilindrice masive feromagnetice cu punct Curie*. Raport de cercetare, Timișoara, Universitatea "Politehnica", Facultatea de Electrotehnică, contract 1999
17. Leuca Teodor, Nagy Ștefan - *Încălzire inductivă: tehnici de proiectare asistată de calculator*, Oradea, Editura "Treira", 2000.
18. *** - *Indicatorul standardelor de stat 1990-1991*, Ediție oficială, Editura Tehnică, 1991
19. Cicală E. - *Metodă de prelucrare statistică a datelor experimentale*, Editura "Politehnica" Timișoara, 1999
20. Taloi Dragoș - *Optimizarea proceselor tehnologice. Aplicații în metalurgie*, Editura Academiei Române, București, 1987
21. Dreucean A.ș.a. - *Bazele așchierii și generării suprafețelor, mașini-unelte și control dimensional*, Litografia I.P.T.V.T., 1977
22. Cozmâncă M.ș.a. - *Bazele așchierii*, Editura "Gheorghe Asachi", Iași, 1995
23. Panait S. - *Bazele așchierii și generării suprafețelor*, Lit.IPIași, 1992
24. Cartiș I. - *Tratamente termice*, Editura "Facla", Timișoara, 1982
25. Heyligenstaedt - *Drehmaschinen mittlerer Baugroße und Schwerdrehmaschinen, Fertigungsprogramm*, 1999
26. Colecția STAHL und EISEN - *Metallurgie*, Dusseldorf, 1998
27. *** - *Referat: "Rectificarea cilindrilor noi"*, S.C."IMGB"SA, București (cod 4100010040), 1989
28. I.M.U. Suceava - *Referat cercetare: "Strunguri pentru cilindri de laminor"*, 1990
29. Sandvik - *Sisteme de reglaj pentru scule standard folosite pe strunguri cu comandă numerică*", Austria Ges in bH, A-1215, Wien, 1998

30. Dohmen Otto & Co - *Drehen und Frasen mit Heyligenstaedt, Automatische Kopierdrehmaschinen und NC - Drehautomaten (Programmieranlagen)*, Giessen, 1998
31. Hofmann F.- *Exploatarea și întreținerea mașinilor așchietoare*, Berlin, ed.1990
32. Acerkan N.ș.a. - *Metalorejuscie stanki*, vol.I și II, *idatelistvo masinostroenie*, Moskva, 1988
33. Rodenacker ș.a. - *Methodisches Konstruieren*, Berlin, Springer Verlag, 1991
34. Clausen R. - *Untersuchungen zur Bearbeitung Metallischer Werkstoffe durch Warmzerspanen und Plasma-Abtragen*, Dissertation T.U., Berlin, 1969
35. Borisov B.I., Kulbaka I.S. - *Frezerovanie naplavlenih detalei Vnagretom sostoianii. Vestnik masinostroienii nr.2*, 1964
36. Liubimov V.G.- *Rezanie austenitnoi margantovistoi stalii vnagretom sostoianii. Izd.Lvovskovo liesotehnicoskovo Instituta*, 1978
37. Goupy I. - *La methode des plans d'experiences*, Dunod, Paris, 1988
38. Cozmâncă M., Constantinescu C. - *Bazele generării suprafețelor pe mașinile unelte*”(partea I), Lit.IPIași, 1992
39. Montgomery D.C. - *Design and analysis of experiments John Wiley and sons*, Singapore, 1991
40. Nichici A., Cicală E., Mee R. - *Prelucrarea datelor experimentale - curs și aplicații*.Litografia Universității “Politehnica” Timișoara, 1996
41. Breștin A., Ghiță M., Vasilescu M., Stoicoiu F. ș.a. - *Optimizarea tehnologiei de prelucrare prin strunjire a oțelurilor cu duritate ridicată HRC>60, prin încălzire inductivă a stratului supus așchierii* - referat în curs de publicare la A treia Conferință Internațională pentru materiale și tehnologii de prelucrare, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 2002
42. Breștin A., Ghiță M., Vasilescu M., Stoicoiu F. ș.a. - *Contribuții privind generalizarea tehnologiei de prelucrare prin strunjire cu preîncălzire inductivă*

- a oțelurilor cu duritate HRC>60, cu ajutorul modelării matematice* - referat în curs de publicare la A treia Conferință Internațională pentru materiale și tehnologii de prelucrare, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 2002
43. Rumșiski L.Z. - *Prelucrarea matematică a datelor experimentale (traducere din limba rusă)*, Editura Tehnică, București, 1984
44. Taloi D. - *Optimizarea proceselor tehnologice*, Editura Academiei Române, București, 1987
45. Staicu C.I. - *Analiza dimensională generală*, București, Editura Tehnică, 1976
46. Sima V., Varga A. - *Practica optimizării asistate de calculator*, Editura Tehnică, București, 1986
47. *** - *Statistica matematică în tehnică (colecție STAS)*
48. *** - STATGRAPHICS - *Reference manual, manugistic, Inc*, Cambridge, 1992
49. Gafițanu M. ș.a. - *Organe de mașini*, vol.I, Editura Tehnică, București, 1981
50. Drăghici I. ș.a. - *Îndrumar de proiectare în construcția de mașini*, Editura Tehnică, București, 1981
51. Groza I.V. - *Teza de doctorat ("Cercetări teoretice și experimentale privind optimizarea prelucrării cu medii abrazive magneto-reologice")*, Biblioteca Universității "Politehnica" Timișoara, 2000
52. Stoicoiu F. - *Stadiul actual al prelucrării cilindrilor de laminor din oțel. Referat nr.1 nepublicat*, 1999
53. Stoicoiu F. - *Utilaje specializate pentru prelucrarea complexă a cilindrilor de laminor din oțel. Referat nr.2 nepublicat*, 2000
54. Stoicoiu F. - *Tehnologii specializate pentru prelucrarea complexă a cilindrilor de laminor din oțel. Referat nr.3 nepublicat*, 2000
55. *** - STAS 5730/1 - 85 - *Starea suprafețelor. Rugozitatea suprafeței. Terminologie.*

56. *** - STAS 5730/3 - 85 - *Starea suprafețelor. Parametrii de rugozitate și specificarea rugozității suprafeței*
57. *** - - STAS 5730/4 - 85 - *Reguli pentru măsurarea rugozității suprafeței cu aparate cu palpare*
58. Dreucean A. - *Mașini-unelte și prelucrări prin așchere*, Editura Didactică și Pedagogică, București 1968
59. Dreucean A.ș.a. - *Mașini-unelte și controlul dimensional*, partea I, vol.1 și 2, Lit.IPT Timișoara, 1984
60. Fătăceanu I. ș.a. - *Proiectarea sculelor, dispozitivelor și verificatoarelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1985
61. Kenny C. - *Excel pentru Windows în imagini*, Editura "Teora" București, 1996
62. Holmes R. ș.a. - *Word 6 pentru Windows în imagini*, Editura "Teora", București, 1995
63. Marinescu N.I.ș.a. - *Tehnologii de prelucrare a sculelor din materiale dure și extradure*, Editura Tehnică, București, 1985
64. Mărcușanu A., Lăncrăngean Z., Olariu M., Groza I. - *Tehnologii de suprafațare*, Editura Mirton, Timișoara, 1996
65. Mnerie D. - *Teza de doctorat ("Contribuții la optimizarea utilizării materialelor piezoceramice în construcția traductoarelor de forță")*, Universitatea "Politehnica" Timișoara, 1997
66. Popescu I.- *Optimizarea procesului de așchiere*, Editura "Scrisul Românesc", Craiova, 1987
67. Tache V.ș.a. - *Dispozitive pentru mașini-unelte. Proiectarea schemelor de orientare și fixare a semifabricatelor*, Editura Tehnică, București, 1989
68. Trmal G.J., Zsu C.B. - *An expert system for grinding process optimisation*, *Journal of Materials Processing Technology*, 33, 1992
69. Tudor A. - *Contactul real al suprafețelor de frecare*, Editura Academiei Române, București, 1990

70. Tonshoff H.K. ș.a.- *Optimisation of Internal Grinding by Microcomputer - Based Force Control, Annals of the CIRP*, vol.35, 1986
71. Yates F. - *Experimental Design: Selected Papers*, Griffin, London, 1980
72. *** - *Issledovanie operatii - Metodologhiceskie osnovi i matematiceskie metodî, per.s.angl.izd."MIR"*, Moskva, 1981
73. *** - *Issledovanie operatii - Modeli i primeneniia, per.s.angl.izd."MIR"*, Moskva, 1981
74. Dancea I.- *Metode de optimizare. Algoritmi-programe*, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1976
75. Kilyeni Ș. - *Metode numerice*, Editura "Orizonturi Universitare", Timișoara, 1997
76. Millea A. - *Cartea metrologului - metrologie generală*, Editura Tehnică, București, 1985
77. Ealey A.L. - *Les methodes Taguchi dans l'industrie occidentale, Les Editions d'Organisation*, Paris, 1990
78. Cicală E., Nichici A., Vannes A.B. ș.a. - *Metoda experimentelor factoriale aplicată la optimizarea gravării cu laser*, Editura Tehnică, București, vol.26, 1997
79. Cicală E., Botiș M., Botea T. - *Aplicarea analizei dispersionale monofactoriale la prelucrarea prin eroziune electrochimică - A VI-a Conferință Națională de Tehnologii Neconvenționale, "CNTN-VI"*, Timișoara, 1993
80. *** - *Referativny Jurnal. Tehnologii masinostroenja*
81. Oprea F. ș.a. - *Teoria proceselor metalurgice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1978
82. Trușculescu N. - *Studiul metalelor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977.

ERATĂ

Pentru echivalarea terminologiei, din domeniul prelucrărilor prin aşchiere, folosită în cadrul tezei de doctorat (STAS 6599/3-89 – Cinematica aşchierii și STAS 6599/4-89 – Forțe, energii, puteri), cu cea adoptată, în prezent, pe plan internațional, evidențiem următoarea listă de echivalări:

- forța de aşchiere “F” = forța de aşchiere totală “F”;
(total force exerted by the tool)
- componenta axială a forței de aşchiere “F_x” = forța de avans “F_f”;
(feed force)
- componenta radială a forței de aşchiere “F_y” = forța pasivă “F_p”;
(passive force)
- componenta tangențială a forței de aşchiere “F_z” = forța de aşchiere “F_c”;
(cutting force)
- avansul “s” = avansul “f”;
- adâncimea de aşchiere “t” = adâncimea de aşchiere “a”.