



Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Str. Constantin Daicoviciu nr 15, 400.020 Cluj-Napoca Romania
tel. +40.264.401.200, 401.248, tel./fax +40.264.592.055

Facultatea Știința și Ingineria Materialelor

TEZA DE DOCTORAT

CERCETĂRI PRIVIND DEFORMAREA PLASTICĂ ȘI TRATAMENTUL TERMIC AL UNOR ALIAJE DE ALUMINIU SPECIALE DESTINATE INDUSTRIEI AERONAUTICE

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC,
Prof. dr. ing. Ioan DRĂGAN

DOCTORAND,
Ing. Marcel - Valeriu SUCIU

Partea a III-a:

MODELAREA MATEMATICĂ ȘI OPTIMIZAREA PARAMETRILOR DE TTM PE BAZĂ DE EXPERIMENT PROGRAMAT, INTERPRETAREA REZULTATELOR ȘI CONCLUZII DE ANSAMBLU ASUPRA LUCRĂRII

Capitolul 5. MODELAREA MATEMATICĂ ȘI OPTIMIZAREA PARAMETRILOR DE TRATAMENT TERMOMECHANIC APLICAT ALIAJELOR DE ALUMINIU DE ÎNALTĂ REZISTENȚĂ DE TIP Al-Zn-Mg-Cu	68
5.1 Modelarea matematică a parametrilor de tratament termomecanic intermediar	68
5.1.1 Modul de abordare a cercetărilor experimentale	68
5.1.2 Stabilirea nivelelor de variație	69
5.1.3 Elaborarea și verificarea statistică a modelelor de ordinul I	72
5.1.4 Elaborarea și verificarea statistică a modelelor de ordinul II	80
5.2 Optimizarea parametrilor de tratament termomecanic intermediar	87
5.2.1 Obiectivele optimizării și metoda de abordare	87
5.2.2 Rezistența la rupere	88
5.2.3 Limita de curgere	92
5.2.4 Alungirea specifică la rupere	98
5.3 Modelarea matematică a parametrilor de tratament termomecanic final	103
5.4 Optimizarea parametrilor de tratament termomecanic final	107
5.5 Analiza și interpretarea rezultatelor	110
Capitolul 6. CONCLUZII GENERALE	113
BIBLIOGRAFIE	119 - 124



M. V. Suciu - Teza de doctorat

CERCETĂRI PRIVIND DEFORMAREA PLASTICĂ ȘI TRATAMENTUL TERMIC AL UNOR ALIAJE DE ALUMINIU SPECIALE DESTINATE INDUSTRIEI AERONAUTICE

Capitolul 5

MODELAREA MATEMATICĂ ȘI OPTIMIZAREA PARAMETRILOR DE TRATAMENT TERMOMECHANIC APLICAT ALIAJELOR DE ALUMINIU DE ÎNALTĂ REZISTENȚĂ DE TIP Al-Zn-Mg-Cu

5.1 Modelarea matematică a parametrilor de tratament termomecanic intermediar

5.1.1 Modul de abordare a cercetărilor experimentale

Cercetările experimentale efectuate și prezentate în acest capitol urmăresc, în primul rând, determinarea gradului de influență manifestat de fiecare parametru tehnologic de tratament termomecanic asupra nivelului caracteristicilor finale rezultate și, în al doilea rând, determinarea unei corelații matematice între influențele manifestate de către acești parametri, astfel încât să se creeze posibilitatea reală de control și intervenție rapidă în proces în momentul în care unul din parametri nu poate fi menținut la o valoare prestabilită.

Scopul cercetărilor experimentale îl constituie identificarea și cercetarea sistematică a factorilor tehnologici responsabili de valorile rezistenței la rupere, a limitei de curgere și a alungirii specifice astfel încât să se poată preciza un complex optim al acestora care să asigure încadrarea în prevederile standardelor cu o marjă de siguranță.

Având în vedere că se urmărește determinarea unor valori practice ale parametrilor de proces se impune stabilirea unor interdependențe capabile să descrie atât natura cât și măsura influențelor considerate, prin urmare se impune determinarea unui model matematic.

Deoarece literatura de specialitate consultată nu pune la dispoziție un aparat matematic suficient de precis și operativ în descrierea interdependențelor menționate se optează pentru elaborarea modelului matematic pe cale statistică.

Este cunoscut faptul că numărul variabilelor acestui tip de tratament este mare și că este dificilă optimizarea condițiilor de tratament. Metoda de cercetare adoptată - metoda experimentului programat - permite, pe lângă reducerea considerabilă a numărului de experiențe, stabilirea unor corelații matematice (prin intermediul ecuațiilor de regresie) între influențele manifestate de diferiți parametri interdependenți ai procesului analizat.

Dintre multiplele posibilități pe care le pune la dispoziție matematica statistică sunt de preferat acele metode care să asigure ulterior o conducere eficientă a procesului analizat. Se adoptă, prin urmare, metoda regresiei în experiment activ, programarea experiențelor făcându-se pe baza experimentului factorial complet de tipul 2^k sau, dacă este necesar, prin utilizarea unor planuri compoziționale construite pe scheletul acestui experiment./63/ /64/

Se va urmări, mai întâi, stabilirea unui model matematic de ordinul întâi (liniar), iar în cazul în care acesta nu se va dovedi concordant cu datele experimentale, se va completa matricea experimentală cu experiențe care să permită determinarea unor modele de ordin superior.

Modelele matematice astfel elaborate vor fi supuse optimizării.

5.1.2 Stabilirea nivelelor de variație

În cazul aliajului de aluminiu de înaltă rezistență $AlZn_5Mg_2CuCr$ elaborat conform cap. 2.2 și prelucrat la cald conform variantei III (tabel 3.3) călirea pentru punere în soluție presupune în primul rând solubilizarea compușilor durificatori, proces care are loc prin activarea fenomenelor de difuzie în stare solidă. Ținând seama de legile difuziei se poate afirma că temperatura de punere în soluție și timpul de menținere la această temperatură vor avea o influență decisivă asupra eficienței tratamentului prin influența exercitată asupra coeficienților de difuzie și dinamicii procesului.

Ținând cont de faptul că în timpul deformării plastice compușii duri se deformează (se alungesc în direcția de deformare) sau se fărâmițează, se poate stabili o relație de proporționalitate directă între gradul de deformare plastică la rece și suprafața interfazică a acestora, respectiv suprafața de contact dintre matricea de bază formată din soluție solidă de aluminiu și compușii duri - fazele intermetalice.

Având în vedere cele de mai sus se vor considera, în cele ce urmează, ca parametri de proces următorii factori:

- 1 - Temperatura de punere în soluție - θ [°C]
- 2 - Timpul de menținere - τ [min]
- 3 - Gradul de deformare plastică la rece - ε [%].

Din analiza diagramei de echilibru a aliajelor Al-Zn-Mg-Cu (fig. 1.10) se apreciază valoarea de 485°C a nivelului maxim al temperaturii de punere în soluție care trebuie să fie inferioară punctului solidus al aliajului pentru a se evita apariția topiturilor în timpul tratamentului. Nivelul minim se adoptă la 455°C, iar nivelul de bază la 470°C.

Pentru stabilirea nivelelor de variație ale timpului de menținere la temperatura de punere în soluție și gradului total de deformare plastică la rece trebuie eliminată influența sistematică a grosimii eșantioanelor.

Timpul de menținere se poate considera ca fiind constituit din timpul necesar pentru egalizarea temperaturii pe secțiunea produsului și timpul de transformare. Deoarece nu se cunoaște raportul în care se află cele două componente ale timpului de menținere este necesar să fie utilizate eșantioane care să aibă aceeași grosime, prin urmare varierea gradului total de deformare la rece să se facă prin menținerea constantă a grosimii finale și varierea grosimii la care se efectuează tratamentul termic intermediar.

Ținându-se seama de valorile utilizate în mod curent în practica industrială, se stabilește nivelul maxim al timpului de menținere la temperatura de punere în soluție de 40 minute, iar cel minim de 20 minute.

Nivelul maxim al gradului total de reducere la rece se stabilește la 35 %, ținând seama de grosimea finală, adoptată la 1,0 mm și de reducerea totală maximă admisibilă a aliajului (de circa. 35-40 %). Nivelul minim se consideră valoarea de 15%.

Nivelul de bază al fiecărui factor se va considera la jumătatea intervalului dintre nivelele maxim și minim.

În cazul în care modelele liniare pentru caracteristicile fizico-mecanice supuse analizei de regresie în experiment activ nu se vor dovedi concordante se va continua experimentul factorial complet prin efectuarea de noi determinări în baza unei programări compozițional central-rotabile. Pentru aceasta factorii implicați se vor experimenta conform matricei experimentului la nivelele $\pm \alpha$, segmentul α derivând din proprietatea de pivotare (determinarea coeficienților din ecuația de regresie, deci a parametrului optimizat, cu dispersii minime și egale în diferite puncte ale spațiului multifactorial) calculat cu relația

$$\alpha = 2^{k/4}$$

în care $k = 3$ este numărul factorilor analizați.

$$\text{Deci } \alpha = 2^{3/4} = 1,682$$

În tabelul 5.1 sunt centralizate nivelele de variație ale celor trei factori analizați.

Tabelul 5.1

Nivelele de variație ale factorilor

FACTORI NIVELE	Temperatura de punere în soluție $\Theta \rightarrow x_1$		Timpul de menținere $\tau \rightarrow x_2$		Gradul de reducere $\mathcal{E} \rightarrow x_3$		
	Unități naturale [°C]	Unități codificate	Unități naturale [min.]	Unități codificate	Unități naturale [%]	Unități codificate	Gros. la t.t. interm. [mm]
Nivel + α	495	$\frac{495 - 470}{15} = +1,682$	47	$\frac{47 - 30}{15} = +1,682$	41,82	$\frac{41,82 - 25}{10} = +1,182$	1,72
Nivel superior	485	$\frac{485 - 470}{15} = +1$	40	$\frac{47 - 30}{10} = +1$	35	$\frac{35 - 25}{10} = +1$	1,54
Nivel de bază	470	$\frac{470 - 470}{15} = 0$	30	$\frac{30 - 30}{10} = 0$	25	$\frac{25 - 25}{10} = 0$	1,33
Nivel inferior	455	$\frac{455 - 470}{15} = -1$	20	$\frac{20 - 30}{10} = -1$	15	$\frac{15 - 25}{10} = -1$	1,18
Nivel - α	445	$\frac{445 - 470}{15} = -1,682$	13	$\frac{13 - 30}{10} = -1,682$	8,18	$\frac{8,18 - 25}{10} = -1,682$	1,09
Interval de variație	15	1	10	1	10	1	-

În vederea obținerii eșantioanelor cu diferite grade de reducere s-au laminat la cald la temperatura de 430-380°C un număr de cinci sleburi la grosimile de 1,72 mm, 1,54 mm, 1,33 mm, 1,18 mm și 1,09 mm. Aceste sleburi laminate la cald au fost apoi laminate la rece la grosimea finală de 1,0 mm, rezultând în final următoarele grade de reducere:

$$\Delta h_1 = H_1 - h = 1,72 - 1 = 0,72 ; \quad \mathcal{E}_1 = 41,82 \%$$

$$\Delta h_2 = H_2 - h = 1,54 - 1 = 0,54 ; \quad \mathcal{E}_2 = 35,00 \%$$

$$\Delta h_3 = H_3 - h = 1,33 - 1 = 0,33 ; \quad \mathcal{E}_3 = 25,00 \%$$

$$\Delta h_4 = H_4 - h = 1,18 - 1 = 0,18 ; \quad \mathcal{E}_4 = 15,00 \%$$

$$\Delta h_5 = H_5 - h = 1,09 - 1 = 0,09 ; \quad \mathcal{E}_5 = 8,18 \%$$

Din fiecare bandă s-au prelevat eșantioane destinate tratamentelor termice. Călirea pentru punere în soluție s-a efectuat într-un cuptor cu băi de săruri, încălzit

electric, cu agitator mecanic al spațiului de încălzire și cu precizia de reglare a temperaturii în palier de $\pm 2^\circ\text{C}$.

Tratamentul de călire de punere în soluție s-a efectuat la temperaturile de 495, 485, 470, 455 și 445°C , iar timpii de menținere în palier au fost de 47, 40, 30, 20 și 13 minute, conform matricelor experimentale prezentate în continuare. Călirea de punere în soluție s-a efectuat prin imersarea eșantioanelor în apă la temperatura ambiantă. Tratamentul termomecanic final s-a făcut prin îmbătrânire într-o etuvă la temperatura de 100°C timp de o oră, laminare la rece cu $\varepsilon = 10\%$ și îmbătrânire artificială la 120°C timp de 12 ore (vezi cap. 3.2).

Prelucrarea epruvetelor și efectuarea determinărilor pentru caracteristicile fizico-mecanice s-au realizat în conformitate cu prevederile STAS 200 - 1987.

5.1.3 Elaborarea și verificarea statistică a modelelor de ordinul I

Matricea experimentului programat. În vederea reprezentării codificate a experimentului s-au utilizat următoarele notații și simboluri:

x_1 - temperatura de punere în soluție, θ

x_2 - timpul de menținere, τ

x_3 - gradul total de reducere, ε

Y_1 - rezistența la rupere, R_m

Y_2 - limita de curgere, $R_{p0,2}$

Y_3 - alungirea specifică la rupere, A_5

+ 1 - nivel superior: $\theta = 485^\circ\text{C}$; $\tau = 40$ minute.; $\varepsilon = 35\%$

0 - nivel de bază : $\theta_0 = 470^\circ\text{C}$; $\tau_0 = 30$ minute; $\varepsilon_0 = 25\%$

- 1 - nivel inferior : $\theta = 455^\circ\text{C}$; $\tau = 20$ minute; $\varepsilon = 15\%$

Intervalele de variație: $\Delta \theta = 15^\circ\text{C}$; $\Delta \tau = 10$ minute; $\Delta \varepsilon = 10\%$

Între valorile naturale și cele codificate ale factorilor x_i există următoarele relații de legătură:

$$\boxed{x_1 = \frac{\theta - \theta_0}{\Delta \theta}}; \quad \boxed{x_2 = \frac{\tau - \tau_0}{\Delta \tau}}; \quad \boxed{x_3 = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\Delta \varepsilon}}$$

Valorile Y_i se exprimă în unități naturale.

Pentru a determina dispersia reproductibilității rezultatelor s-au efectuat șase experimente la nivelele de bază ale factorilor. În acest mod s-a realizat un experiment factorial complet de tipul 2^3 prezentat în tabelul 5.2.

Tabelul 5.2

Matricea experimentului factorial complet 2^3

Nr. exper	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	Y_1 MPa	Y_2 MPa	Y_3 %
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	658	618	7,25
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	668	627	11,20
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	636	598	8,95
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	644	605	12,90
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	642	602	7,92
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	636	598	11,68
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	618	580	9,32
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	622	585	12,52
9	+1	0	0	0	0	0	0	662	622	9,32
10	+1	0	0	0	0	0	0	668	628	9,96
11	+1	0	0	0	0	0	0	662	622	9,60
12	+1	0	0	0	0	0	0	668	628	9,32
13	+1	0	0	0	0	0	0	672	630	10,22
14	+1	0	0	0	0	0	0	674	634	9,32

Calculul coeficienților de regresie. Considerând funcția Y_i ca fiind expresia analitică a modelului de ordinul I, aceasta este de forma:

$$Y_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (5.1)$$

Ecuția (5.1) se scrie sub formă matricială astfel:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{XB} \quad (5.2)$$

în care: X este matricea condițiilor experimentale

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_{01} & X_{11} & \dots & X_{m1} \\ X_{02} & X_{12} & \dots & X_{m2} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ X_{0n} & X_{1n} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

m - numărul de termeni ai ecuației (5.1);

n - numărul de experiențe considerate;

\mathbf{B} - vectorul coloană al coeficienților b_i

$$\mathbf{B} = [b_0, b_1, \dots, b_n]^t \quad (5.4)$$

t - simbolul transpunerii matriceale

\mathbf{Y} - matricea rezultatelor experimentale

$$\mathbf{Y} = [Y_1, Y_2, \dots, Y_n]^t \quad (5.5)$$

Pentru cazul de față, funcția liniară (5.1) are forma particulară:

$$Y_i = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (5.6)$$

Înmulțind la stânga ambii termeni ai ecuației matriceale cu matricea unitară

$$\mathbf{E} = [\mathbf{X}^t \mathbf{X}]^{-1} \cdot \mathbf{X}^t,$$

rezultă:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{X}^t \cdot \mathbf{X}]^{-1} [\mathbf{X}^t \cdot \mathbf{Y}] \quad (5.7)$$

expresie care reprezintă relația de calcul al coeficienților ecuației de regresie.

Utilizând valorile din tabelul 5.2, pe baza relației (5.6) se obțin coeficienții modelelor de ordinul I, prezentați centralizat în tabelul 5.3.

Valorile coeficienților modelelor de ordinul I

b_{ij} \ Y_i	Y_1	Y_2	Y_3
b_0	652,14	612,643	9,96
b_1	- 2,00	- 2,125	- 1,86
b_2	10,50	9,625	- 0,71
b_3	11,00	10,375	- 0,14
b_{12}	1,00	0,875	- 0,07
b_{13}	- 2,50	- 1,875	- 0,12
b_{23}	1,00	0,875	- 0,15

Rezolvarea ecuației (5.6) s-a efectuat pe un calculator PC 586 DX5/133 Mhz utilizând mediul de programare Excel 5.0. sub WINDOWS ' 95 (vezi Anexa VIII).

Verificarea adecvanței modelelor. Modelele de ordinul I determinate mai sus urmează să fie verificate din punct de vedere statistic pentru a decide dacă pot fi utilizate pentru studiul procesului analizat sau este necesară determinarea modelelor de ordin superior. Pentru aceasta trebuie calculată valoarea criteriului Fischer, respectiv:/86/

$$F_{ci} = \frac{PM_{in}}{PM_{er}} \quad (5.8)$$

unde: PM_{in} reprezintă pătratul mediu de inadecvanță;

PM_{er} - pătratul mediu al erorilor.

Pentru determinarea acestor două mărimi este necesar să se determine dispersia reziduală și a erorii experimentale. Rezidualul reprezintă diferența dintre valorile măsurate Y_u și valorile prezise \tilde{Y}_u . Pentru o analiză mai riguroasă a modelului determinat se utilizează suma pătratelor rezidualilor, care se obține însumând pentru n experiențe ale programului experimental pătratul rezidualilor:

$$SP_{rz} = \sum_{u=1}^n (Y_u - \tilde{Y}_u)^2 \quad (5.9)$$

Matriceal această sumă se scrie:

$$SP_{rz} = [Y - \tilde{Y}]^t [Y - \tilde{Y}] \quad (5.10)$$

în care:

Y este vectorul coloană al răspunsurilor măsurate în fiecare punct experimental;

\tilde{Y} este vectorul coloană al răspunsurilor prezise cu ajutorul modelului determinat în punctele experimentale respective.

Pătratul mediu al rezidualilor se determină cu relația:

$$PM_{rz} = \frac{SP_{rz}}{f_{rz}} \quad (5.11)$$

în care: $f_{rz} = n - m - 1$

n - numărul de experiențe;

m - numărul de coeficienți, exclusiv termenul liber.

În cazul modelelor studiate $n = 14$ și $m = 6$.

Pentru determinarea erorii experimentale, programele centrale compoziționale sunt prevăzute cu un număr de n_0 experiențe repetate în centrul experimentului (la nivelul de ază). În cazul de față $n_0 = 6$.

Suma pătratelor erorii experimentale SP_{er} , în cazul folosirii replicatelor în centrul experimentului, se determină cu expresia matriceală:

$$SP_{er} = (Y_0 - \bar{Y}_0)^t (Y_0 - \bar{Y}_0) \quad (5.12)$$

în care: $Y_0 - \bar{Y}_0$ este un vector coloană ale cărui elemente sunt diferențele dintre răspunsurile măsurate la experiențele replicate în centrul experimentului (nivel de bază) și media acestor răspunsuri.

Pătratul mediu al erorii experimentale se determină cu relația:

$$PM_{re} = \frac{SP_{er}}{f_{er}} \quad (5.13)$$

în care:

$$f_{er} = n_0 - 1$$

$n_0 = 6$ numărul de experiențe la nivelul de bază

Pătratul mediu de inadecvănță se determină cu relația:

$$PM_{in} = \frac{SP_{in}}{f_{in}} \quad (5.14)$$

în care:

$$SP_{in} = SP_{rz} - SP_{er}$$

$$f_{in} = n - m - n_0$$

Utilizând relațiile (5.11) și (5.13) se determină valoarea criteriului Fischer (F_{ci})/64/

Valorile mărimilor calculate cu relațiile de mai sus sunt prezentate centralizat în tabelul 5.4.

Tabelul 5.4

Datele de calcul pentru verificarea adecvănței modelelor

Valori calculate	Y_1	Y_2	Y_3
SP_{rz}	2.671,714	2390,46	1,99554
PM_{rz}	381,6734	341,49	0,2851
SP_{er}	123,333	109,33	0,7459
PM_{er}	24,666	21,867	0,1492
SP_{in}	2.548,381	2281,1	1,2496
PM_{in}	1.274,1905	1140,6	0,6248
F_{ci}	51,65637	52,16	4,188
Concordanța	Modelul nu este concordant	Modelul nu este concordant	Modelul este concordant

Un model este considerat adecvat dacă:

$$F_{ci} < F_T(f_{in}, f_{er}, 95\%) \quad (5.15)$$

unde $F_T(f_{in}, f_{er}, 95\%) = 5,59$ reprezintă valoarea criteriului Fischer adoptată din tabelele distribuției Fischer $F_T(v_1, v_2, 1 - \alpha)$.

Din tabelul 5.4 rezultă că singurul model care concordă cu datele experimentale și care poate fi utilizat în optimizarea procesului este cel pentru alungirea specifică la rupere.

Verificarea semnificației statistice a coeficienților modelelor de ordinul I.

Este posibil ca unii dintre termenii modelului determinat să nu aibă o influență importantă asupra răspunsului Y prezis de model. În cazul modelelor ortogonale, caracterizate prin aceea că toți coeficienții sunt independenți, se recomandă eliminarea termenilor ne semnificativi.

În cazul de față modelul determinat nu este ortogonal fapt pentru care se recomandă eliminarea numai a acelor termeni cu influență foarte redusă deoarece eliminarea tuturor termenilor ne semnificativi presupune recalcularea întregului model.

Pentru verificarea semnificației coeficienților în cazul modelului adecvat (pentru alungirea specifică) se determină pentru fiecare coeficient raportul:

$$F_{csi} = \frac{PM_{bi}}{PM_{rz}} \quad (5.16)$$

în care:

PM_{rz} este pătratul mediu al rezidualilor (tabelul 5.4);

PM_{bi} - pătratul mediu al coeficienților care se calculează cu relația matriceală

$PM_{bi} = D(X^t Y)$, unde D este matricea diagonală având ca elemente ale

diagonalei principale coeficienții modelului, celelalte elemente ale matricei fiind nule.

Matricea diagonală este:

$$D = \begin{pmatrix} 9,96286 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1,8575 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0,705 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0,1425 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0,07 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,1175 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,145 \end{pmatrix}$$

Utilizând relația (5.16) obținem valorile raportului F_{csi} pentru coeficienții modelului prezentați în tabelul 5.5.

Tabelul 5.5

Valorile raportului $F_{csi} = PM_{bi} / PM_{rz}$

b_i	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}
F_{csi}	4.874,5	96,82	13,94	0,569	0,137	0,387	0,59

Se consideră semnificativi coeficienții b_i pentru care $F_{csi} > F_T [1, f_{rz}, (1-\alpha) \%]$; în cazul de față $F_T (1, 7, 95 \%) = 5,59$.

Rezultă de aici că valorile calculate sunt puternic influențate de termenii precedați de coeficienții b_0 , b_1 și b_2 , iar termenii b_3 și b_{23} au o influență relativ slabă.

Influența cea mai slabă o exercită termenii b_{12} și b_{13} , termeni la care se poate renunța fără a afecta semnificativ precizia modelului.

Așadar modelul matematic corespunzător alungirii specifice la rupere, pentru variabile codificate, este:

$$A_5 = 9,9628 - 1,8575 x_1 - 0,705 x_2 - 0,1425 x_3 - 0,145 x_2 x_3 \quad (5.17)$$

5.1.4. Elaborarea și verificarea statistică a modelelor de ordinul II.

Matricea programării central - compozițional rotabile.

Deoarece modelele liniare ale rezistenței la rupere și a limitei de curgere nu s-au dovedit adecvate rezultatelor experimentale se va proceda la elaborarea modelelor de ordinul II.

Matricea programării experimentului factorial complet 2^3 utilizată pentru calculul modelelor liniare, a fost completată cu alte 6 experiențe în care fiecare factor, pe rând, a fost experimentat la nivelele $\pm \alpha$, ceilalți doi fiind menținuți la nivelul de bază.

Nivelele $\pm \alpha$ pentru fiecare dintre factori, obținute din valoarea segmentului $\alpha = 2^{k/4} = 2^{3/4} = 1,682$ și din conversia factorilor din unități convenționale în unități naturale rezultă din tabelul 5.6.

Tabelul 5.6

Nivelele de variație ale factorilor

Nivel	x_1 (θ)		x_2 (τ)		x_3 (ϵ)	
	x_1	θ [°C]	x_2	τ [minute]	x_3	ϵ [%]
$+\alpha$	+ 1,682	495	+ 1,682	47	+ 1,682	41,82
+ 1	+ 1	485	+ 1	40	+ 1	35
0	0	470	0	30	0	25
- 1	- 1	455	- 1	20	- 1	15
$-\alpha$	- 1,682	445	- 1,682	13	- 1,682	8,18

Matricea programării central compozițional rotabile este prezentată în tabelul 5.7.

Tabelul 5.7

Matricea programării central compozițional rotabile

u	x₁	x₂	x₃	x₁x₂	x₁x₃	x₂x₃	x₁²	x₂²	x₃²	Y₁ MPa	Y₂ MPa
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	658	618
2	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	668	627
3	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	636	598
4	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	644	605
5	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	642	602
6	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	636	598
7	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	618	580
8	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	622	585
9	+1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0	574	538
10	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	0	594	558
11	0	+1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	664	621
12	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	0	626	588
13	0	0	+1,682	0	0	0	0	0	2,829	700	654
14	0	0	-1,682	0	0	0	0	0	2,829	670	628
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	662	622
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	668	628
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	662	622
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	668	628
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	672	630
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	674	634

Calculul coeficienților de regresie.

Forma generală a unui model de ordinul II este:

$$Y_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j=1}^k b_{ij} X_i X_j \quad (5.18)$$

Rezolvarea acestei ecuații generale se face utilizând aceeași metodă ca cea utilizată în cap. 5.1.3. Pentru rezolvare s-a utilizat o schemă de calcul implementată pe un calculator PC 586 DX5/133 MHz în mediul de programare Excel 5.0. sub WINDOWS 95 (vezi Anexa IX).

Ecuația generală a coeficienților b_i este aceeași ca și în cazul modelelor de ordinul I.

$$B = [X^t X]^{-1} [X^t Y] \quad (5.19)$$

termenii ecuației având aceeași semnificație ca și în cazul ecuației (5.7), valorile corespunzătoare ale coeficienților fiind prezentate în tabelul 5.8.

Tabelul 5.8

Valorile coeficienților modelelor de ordinul II

b_{ij} \ Y_i	Y_1	Y_2
b_0	667,529	627,155
b_1	- 3,634	- 3,7076
b_2	10,829	9,70154
b_3	10,1374	9,27879
b_{12}	1	0,875
b_{13}	- 2,5	- 1,875
b_{23}	1	0,875
b_{11}	- 28,66	- 26,86
b_{22}	- 7,106	- 6,8953
b_{33}	7,027	6,00223

Verificarea adecvănței modelelor de ordinul II se face similar modelelor de ordinul I , utilizând criteriul Fischer, respectiv:

$$F_{ci} = \frac{PM_{in}}{PM_{er}} \quad (5.20)$$

în care:

PM_{in} este pătratul mediu de inadecvănță;

PM_{er} - pătratul mediu al erorilor.

Relațiile de calcul ale termenilor de mai sus sunt aceleași ca și în cazul modelelor liniare de ordinul I. Valorile calculate ale acestora sunt prezentate în tabelul 5.9 (pentru $f_{rz} = 10$, $f_{er} = 5$ și $f_{in} = 5$).

Tabelul 5.9

Datele de calcul pentru verificarea adecvănței modelelor

Valori calculate	Y ₁	Y ₂
SP _{rz}	267,989	295,08
PM _{rz}	26,7989	29,508
SP _{er}	123,33	109,33
PM _{er}	24,66	21,867
SP _{in}	144,656	185,75
PM _{in}	28,931	37,149
F _{ci}	1,172	1,6989

Din tabelul distribuției Fischer rezultă:

$$F_T(5, 5, 95\%) = 5,05$$

Deoarece $F_{ci} < F_T(5, 5, 95\%)$ pentru ambele modele rezultă că acestea sunt adecvate.

Verificarea semnificației coeficienților de regresie a celor două modele se face similar modelului de ordinul I.

În acest sens se va compara raportul:

$$F_{csi} = \frac{PM_{bi}}{PM_{rz}} \quad (5.21)$$

cu valoarea criteriului Fischer $F_T(1, f_{rz}, 95\%)$, adoptată din tabele, în care:

PM_{bi} este pătratul mediu al coeficienților;

PM_{rz} - pătratul mediu al rezidualilor calculat și prezentat în tabelul 5.9.

Pătratul mediu al coeficienților se calculează cu relația:

$$PM_{bi} = D (X^t Y) \quad (5.22)$$

în care D , X^t și Y au aceeași semnificație ca și în cazul modelului liniar.

Valorile raportului F_{csi} corespunzătoare coeficienților b_i sunt prezentate în tabelul 5.10.

Tabelul 5.10

Valorile raportului $F_{csi} = PM_{bi} / PM_{rz}$

b_i	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{11}	b_{22}	b_{33}
F_{csi} Y_1	322768	6,73209	59,7746	52,376	0,298	1,8657	0,2985	-9015,25	-2326,89	2360,41
F_{csi} Y_2	258531,1	6,3628	43,5649	39,8509	0,20757	0,95313	0,20757	-7204,4	-1924,19	1717,04

Condiția ca un coeficient să fie semnificativ este ca $F_{csi} > F_T(1, f_{rz}, 95\%)$.

În cazul de față $F_T(1, 10, 95\%) = 4,96$. Analizând valorile prezentate în tabelul 5.10 rezultă că toți termenii sunt semnificativi cu excepția termenilor precedați de coeficienții b_1 , b_{12} , b_{13} și b_{23} în cazul modelului pentru Y_1 , respectiv b_{12} și b_{23} în cazul modelului pentru Y_2 .

Ținând seama de faptul că modelul nu este ortogonal se va renunța la termenii cu influență foarte slabă (b_{12} și b_{23} pentru Y_1 respectiv b_{12} și b_{23} pentru Y_2) rezultând următoarele modele matematice valabile pentru variabilele codificate:

$$Y_1 = 667,5296 - 3,6344 x_1 + 10,82979 x_2 + 10,1374 x_3 - 2,5 x_1 x_3 - 28,66 x_1^2 - 7,1066 x_2^2 + 7,027 x_3^2 \quad (5.23)$$

$$Y_2 = 627,155 - 3,7076 x_1 + 9,70154 x_2 + 9,27879 x_3 - 1,875 x_1 x_3 - 26,86 x_1^2 - 6,8953 x_2^2 + 6,00223 x_3^2 \quad (5.24)$$

Modelul de ordinul I (5.17) și modelele de ordinul II (5.23) și (5.24) se vor utiliza la optimizarea procesului studiat. Pentru a nu afecta precizia funcțiilor determinate nu se va renunța la termenii cu semnificație redusă, astfel că ecuațiile de regresie vor fi:

$$Y_1 = 667,5296 - 3,6344x_1 + 10,82979x_2 + 10,1374x_3 + x_1x_2 - 2,5x_1x_3 + x_2x_3 - 28,66x_1^2 - 7,1066x_2^2 + 7,027x_3^2 \quad (5.25)$$

$$Y_2 = 627,155 - 3,7076x_1 + 9,70154x_2 + 9,27879x_3 + 0,875x_1x_2 - 1,875x_1x_3 + 0,875x_2x_3 - 26,86x_1^2 - 6,8953x_2^2 + 6,00223x_3^2 \quad (5.26)$$

$$Y_3 = 9,9628 - 1,8575x_1 - 0,705x_2 - 0,1425x_3 - 0,07x_1x_2 - 0,1175x_1x_3 - 0,145x_2x_3 \quad (5.27)$$

Transformarea ecuațiilor (5.25), (5.26) și (5.27) în ecuații cu variabile naturale se face pornind de la relațiile de conversie:

$$x_1 = \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}; \quad x_2 = \frac{\tau - \tau_0}{\Delta\tau}; \quad x_3 = \frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\Delta\varepsilon} \quad (5.28)$$

corespunzătoare datelor prezentate în tabelul 5.1.

Coefficienții b_i , corespunzători noului sistem de coordonate (θ , τ , ε) pot fi obținuți în mod direct utilizând programul experimental, prin înlocuirea valorilor codificate cu valorile naturale corespunzătoare. Astfel, ecuațiile de mai sus devin:

$$Y_1(\theta, \tau, \varepsilon) = -27956,94299 + 121,543548 \cdot \theta + 1,833828 \cdot \tau + 4,991132 \cdot \varepsilon + 0,0066667 \cdot \theta \tau - 0,016666 \cdot \theta \varepsilon + 0,01 \cdot \tau \varepsilon - 0,129329 \cdot \theta^2 - 0,068979 \cdot \tau^2 + 0,0711189 \cdot \varepsilon^2 \quad (5.29)$$

$$Y_2(\theta, \tau, \varepsilon) = -26157,58659 + 113,7985548 \cdot \theta + 2,02681591 \cdot \tau + 3,500384812 \cdot \varepsilon + 0,00583333 \cdot \theta \tau - 0,125 \cdot \theta \varepsilon + 0,00875 \cdot \tau \varepsilon - 0,121179357 \cdot \theta^2 - 0,067022333 \cdot \tau^2 + 0,060799882 \cdot \varepsilon^2 \quad (5.30)$$

$$Y_3(\theta, \tau, \varepsilon) = 53,7641 - 0,0903 \cdot \theta + 0,18508 \cdot \tau + 0,39742 \cdot \varepsilon - 0,0005 \cdot \theta \tau - 0,0008 \cdot \theta \varepsilon - 0,0015 \cdot \tau \varepsilon \quad (5.31)$$

Ecuațiile (5.29), (5.30) și (5.31) sunt valabile pentru : $\theta = 445...495^\circ\text{C}$, $\tau = 13...47$ min și $\varepsilon = 8,18...41,82$ %. Pentru exemplificare, în tabelele 5.10A, 5.10B și 5.10C sunt prezentate valorile factorilor analizați, calculate cu ecuațiile de mai sus, dând diferite valori parametrilor de TTMI.

Tabelul 5.10A

Valori calculate $Y_i = f(\theta)$ pentru $\tau_0 = 30$ min și $\varepsilon_0 = 25$ %

Temperatura de punere în soluție θ , °C	450	460	470	480	490
Y_1 (R _m , MPa)	620,7	657,1	667,6	652,2	611,0
Y_2 (R _{p0,2} , MPa)	583,6	617,5	627,2	612,5	573,7
Y_3 (A ₅ , %)	11,74	10,49	9,23	7,98	6,73

Tabelul 5.10B

Valori calculate $Y_i = f(\tau)$ pentru $\theta_0 = 470^\circ\text{C}$ și $\varepsilon_0 = 25$ %

Timpul de menținere τ , minute	15	20	30	40	45
Y_1 (R _m , MPa)	635,9	649,9	667,6	671,5	668,2
Y_2 (R _{p0,2} , MPa)	597,6	610,8	627,2	630,1	626,6
Y_3 (A ₅ , %)	10,54	10,11	9,23	8,36	7,92

Tabelul 5.10C

Valori calculate $Y_i = f(\varepsilon)$ pentru $\theta_0 = 470^\circ\text{C}$ și $\tau_0 = 30$ min

Gradul de reducere ε , %	10	15	25	35	40
Y_1 (R _m , MPa)	668,4	664,5	667,6	684,8	698,8
Y_2 (R _{p0,2} , MPa)	626,9	623,9	627,2	642,5	654,7
Y_3 (A ₅ , %)	9,58	9,47	9,23	9,00	8,88

5.2 Optimizarea parametrilor de tratament termomecanic intermediar

5.2.1 Obiectivele optimizării și metoda de abordare

Obiectivele optimizării constau în maximizarea rezistenței la rupere Y_1 și a limitei de curgere Y_2 cu condiția ca alungirea specifică la rupere Y_3 să fie asigurată la cel puțin minimul de 7 % prevăzut în norma de recepție.

Determinarea punctelor de extrem pentru funcțiile neliniare se poate face prin metode analitice sau metode grafice. Metodele grafice presupun aducerea funcției la forma canonică, funcție care în noul sistem de coordonate este reprezentată de o suprafață cunoscută ale cărei puncte extreme sunt în general ușor de stabilit, iar metodele analitice permit determinarea punctelor staționare și de extrem local utilizând derivatele parțiale de ordinul I și II (în cazul funcțiilor neliniare de ordin ≥ 2 și care admit derivate parțiale de ordinul I și II).

Prin ambele metode, determinarea punctelor de extrem se desfășoară în două etape:

Etapa 1 - Determinarea punctelor staționare

Punctele staționare sunt puncte particulare ale suprafeței reprezentate de funcția optimizată, puncte în care derivatele parțiale de ordinul I se anulează. Din familia acestor puncte fac parte punctele de inflexiune și punctele de extrem local sau global.

Etapa 2 - Determinarea punctelor de extrem

Punctele de extrem sunt puncte de minim sau de maxim (global sau local) și se bucură de proprietatea că în orice vecinătate a acestora funcția nu își schimbă semnul. Punctele extreme sunt foarte importante în procesul de optimizare a unei tehnologii deoarece acestea indică în general regimul tehnologic optim.

În numeroase situații însă, modelele matematice obținute nu prezintă puncte de extrem; este cazul funcțiilor liniare, fără excepție, precum și a altor funcții neliniare care prezintă numai puncte staționare (puncte de inflexiune).

În aceste cazuri punctele staționare se consideră puncte de extrem doar în raport cu o parte din variabilele funcției analizate, a căror valori maxime/minime coincid de obicei cu capetele domeniului de definiție al celorlalte variabile.

În continuare se va cerceta existența punctelor de extrem ale funcțiilor Y_1 și Y_2 corespunzătoare rezistenței la rupere, respectiv limitei de curgere, în mod separat.

5.2.2 Rezistența la rupere

Ecuția de regresie a rezistenței la rupere (5.29) exprimată în mărimi naturale este dată de funcția

$$Y_1(\theta, \tau, \varepsilon) = -27956,94299 + 121,543548 \cdot \theta + 1,833828 \cdot \tau + 4,991132 \cdot \varepsilon + 0,0066667 \cdot \theta \cdot \tau - 0,016666 \cdot \theta \cdot \varepsilon + 0,01 \cdot \tau \cdot \varepsilon - 0,129329 \cdot \theta^2 - 0,068979 \cdot \tau^2 + 0,0711189 \cdot \varepsilon^2$$

Derivatele parțiale de ordinul I sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Y_1}{\partial \theta} = 121,543548 + 0,0066667 \cdot \tau - 0,016666 \cdot \varepsilon - 2 \cdot 0,129329 \cdot \theta \\ \frac{\partial Y_1}{\partial \tau} = 1,833828 + 0,0066667 \cdot \theta + 0,01 \cdot \varepsilon - 2 \cdot 0,068979 \cdot \tau \\ \frac{\partial Y_1}{\partial \varepsilon} = 4,991132 - 0,016666 \cdot \theta + 0,01 \cdot \tau + 2 \cdot 0,0711189 \cdot \varepsilon \end{array} \right.$$

Punctele staționare ale funcției $Y_1(\theta, \tau, \varepsilon)$ sunt soluțiile sistemului de ecuații:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial \theta} = 0; \quad \frac{\partial Y_1}{\partial \tau} = 0; \quad \frac{\partial Y_1}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (5.32)$$

Desfășurat, sistemul de ecuații (5.32) se scrie:

$$\begin{cases} - 2 \cdot 0,129329 \cdot \theta + 0,0066667 \cdot \tau - 0,016666 \cdot \varepsilon = - 121,543548 \\ 0,0066667 \cdot \theta - 2 \cdot 0,068979 \cdot \tau + 0,01 \cdot \varepsilon = - 1,833828 \\ 0,016666 \cdot \theta + 0,01 \cdot \tau + 2 \cdot 0,071189 \cdot \varepsilon = - 4,991132 \end{cases} \quad (5.32)$$

și, sub formă matriceală, sistemul (5.33) devine:

$$A \cdot X = B \quad (5.34)$$

unde:

$$A = \begin{bmatrix} - 0,258658 & 0,0066667 & 0,016666 \\ 0,0066667 & - 0,137958 & 0,01 \\ - 0,016666 & 0,01 & 0,142378 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} - 121,543548 \\ - 1,833828 \\ - 4,991132 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} \theta \\ \tau \\ \varepsilon \end{bmatrix}$$

Înmulțind ambii membri ai ecuației matriceale (5.34), la stânga, cu inversa matricei A

$$A^{-1} \cdot A \cdot X = A^{-1} \cdot B \quad (5.35)$$

rezultă soluția sistemului:

$$X = A^{-1} \cdot B \quad (5.36)$$

în care:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} -3,8437021 & -0,2172505 & -0,4346643 \\ -0,2172589 & -7,2241464 & 0,48196089 \\ -0,4346637 & 0,481961865 & 6,93882676 \end{bmatrix}$$

Soluția (5.36) a sistemului (5.33), determinată pe calculator în mediul de programare Excel 5.0, este:

$$X_1 = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \tau_1 \\ \varepsilon_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 469,7451 \\ 37,24873 \\ 17,31413 \end{bmatrix}$$

Pentru a verifica dacă punctul de coordonate $(\theta_1, \tau_1, \varepsilon_1)$ este punct de extrem local, se calculează derivatele parțiale de ordinul II:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 Y_1}{\partial \theta^2} = -0,258658 \\ \frac{\partial^2 Y_1}{\partial \tau^2} = -0,137958 \\ \frac{\partial^2 Y_1}{\partial \varepsilon^2} = 0,142378 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 Y_1}{\partial \theta \partial \tau} = 0,0066667 \\ \frac{\partial^2 Y_1}{\partial \theta \partial \varepsilon} = -0,016666 \\ \frac{\partial^2 Y_1}{\partial \tau \partial \varepsilon} = 0,01 \end{array} \right. \quad (5.39)$$

Matricea hessiană asociată este:

$$H = \begin{bmatrix} -0,258658 & 0,0066667 & -0,016666 \\ 0,0066667 & -0,137958 & 0,01 \\ -0,016666 & 0,01 & 0,142378 \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

Pentru a verifica dacă punctul de coordonate $(\theta_1, \tau_1, \varepsilon_1)$ este punct de extrem local se utilizează proprietățile funcționalelor referitoare la natura acestora. Astfel, dacă avem funcția $f : R^3 \rightarrow R$ care admite derivate parțiale de ordinul I și II într-o vecinătate a punctului staționar (a, b, c) atunci:

a) dacă funcționala f este negativ definită atunci (a, b, c) este punct de maxim local;

b) dacă funcționala f este pozitiv definită atunci (a, b, c) este punct de minim local.

O funcțională $f : R^3 \rightarrow R$ este pozitiv definită dacă toți minorii principali ai matricei hessiene asociate:

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial z} & \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} & \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \end{bmatrix} \quad (5.41)$$

sunt pozitivi: /82/

$$\Delta_1 = \left| \begin{array}{c} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \end{array} \right| > 0 ; \quad \Delta_2 = \left| \begin{array}{cc} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \end{array} \right| > 0 ; \quad \Delta_3 = \det (H) > 0 \quad (5.42)$$

O funcțională este negativ definită dacă minorii principali ai matricei hessiene asociate sunt alternativ negativi și pozitivi:

$$\Delta_1 < 0 ; \quad \Delta_2 > 0 ; \quad \Delta_3 < 0 \quad (5.43)$$

Pentru orice altă combinație de semne funcționala nu admite puncte de extrem local.

În cazul funcției Y_1 minorii principali ai matricei hessiene sunt:

$$\Delta_1 = - 0,258658 ; \quad \Delta_2 = 0,035639 ; \quad \Delta_3 = 0,00513 \quad (5.44)$$

Rezultă de aici că punctul de coordonate $(\theta_1, \tau_1, \varepsilon_1)$ nu este punct de extrem local.

5.2.3 Limita de curgere

Ecuatia de regresie a limitei de curgere la tracțiune (5.30) exprimată în mărimi naturale este dată de funcția:

$$\begin{aligned} Y_2(\theta, \tau, \varepsilon) = & -26157,58659 + 113,7985548 \cdot \theta + 2,02681591 \cdot \tau + 3,500384812 \cdot \varepsilon \\ & + 0,005833333 \cdot \theta \tau - 0,0125 \cdot \theta \varepsilon + 0,00875 \cdot \tau \varepsilon - 0,121179357 \cdot \theta^2 - \\ & 0,067022333 \cdot \tau^2 + 0,060799882 \cdot \varepsilon^2 \end{aligned} \quad (5.45)$$

Derivatele parțiale de ordinul I sunt:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Y_2}{\partial \theta} = 113,7985548 + 0,005833 \cdot \tau - 0,0125 \cdot \varepsilon - 2 \cdot 0,121179 \cdot \theta \\ \frac{\partial Y_2}{\partial \tau} = 2,0268159 + 0,005833 \cdot \theta + 0,00875 \cdot \varepsilon - 2 \cdot 0,06702233 \cdot \tau \\ \frac{\partial Y_2}{\partial \varepsilon} = 3,5003848 - 0,0125 \cdot \theta + 0,00875 \cdot \tau + 2 \cdot 0,06079988 \cdot \varepsilon \end{array} \right. \quad (5.46)$$

Punctele staționare ale funcției $Y_2(\theta, \tau, \varepsilon)$ sunt soluțiile sistemului de ecuații:

$$\frac{\partial Y_2}{\partial \theta} = 0 ; \quad \frac{\partial Y_2}{\partial \tau} = 0 ; \quad \frac{\partial Y_2}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (5.47)$$

Desfășurat, sistemul de ecuații (5.47) se scrie:

$$\left\{ \begin{array}{l} -2 \cdot 0,121179 \cdot \theta + 0,005833 \cdot \tau - 0,0125 \cdot \varepsilon = -113,7985548 \\ 0,005833 \cdot \theta - 2 \cdot 0,06702233 \cdot \tau + 0,00875 \cdot \varepsilon = -2,0268159 \\ -0,0125 \cdot \theta + 0,00875 \cdot \tau + 2 \cdot 0,06079988 \cdot \varepsilon = -3,5003848 \end{array} \right. \quad (5.48)$$

Sub formă matriceală sistemul (5.47) devine:

$$A \cdot X = B \quad (5.49)$$

în care:

$$A = \begin{bmatrix} -0,242358 & 0,005833 & -0,0125 \\ 0,005833 & -0,134044 & 0,00875 \\ -0,0125 & 0,00875 & 0,1215997 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -113,7985548 \\ -2,0268159 \\ -3,5003848 \end{bmatrix}$$

Înmulțind la stânga ambii membri ai ecuației matriceale (5.49) cu inversa matricei A:

$$A^{-1} \cdot A \cdot X = A^{-1} \cdot B \quad (5.50)$$

rezultă soluția sistemului:

$$X = A^{-1} \cdot B \quad (5.51)$$

în care:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} -4,110044 & -0,2054641 & -0,4077124 \\ -0,2054641 & -7,4355937 & 0,5139248 \\ -0,4077124 & 0,5139248 & 8,144808 \end{bmatrix}$$

Soluția sistemului (5.48), este:

$$X_1 = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \tau_2 \\ \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 469,56 \\ 36,6531 \\ 16,84549 \end{bmatrix} \quad (5.52)$$

Pentru a verifica dacă punctul de coordonate $(\theta_2, \tau_2, \varepsilon_2)$ este punct de extrem local se calculează derivatele parțiale de ordinul II:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 Y_2}{\partial \theta^2} = -0,242358 \\ \frac{\partial^2 Y_2}{\partial \tau^2} = -0,134044 \\ \frac{\partial^2 Y_2}{\partial \varepsilon^2} = 0,1215997 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^2 Y_2}{\partial \theta \partial \tau} = 0,005833 \\ \frac{\partial^2 Y_2}{\partial \theta \partial \varepsilon} = -0,0125 \\ \frac{\partial^2 Y_2}{\partial \tau \partial \varepsilon} = 0,00875 \end{array} \right. \quad (5.53)$$

Matricea hessiană asociată este:

$$H = \begin{bmatrix} -0,242358 & 0,00583 & -0,0125 \\ 0,00583 & -0,134044 & 0,00875 \\ -0,0125 & 0,00875 & 0,1215997 \end{bmatrix} \quad (5.54)$$

Minorii principali ai matricei (5.54) sunt:

$$\Delta_1 = -0,242358 ; \quad \Delta_2 = 0,03245 ; \quad \Delta_3 = 0,003984$$

Din analiza semnelor minorilor principali rezultă că punctul de coordonate $(\theta_2, \tau_2, \varepsilon_2)$ nu este punct de extrem local.

În concluzie, rezultă că funcțiile $Y_1(\theta, \tau, \varepsilon)$ și $Y_2(\theta, \tau, \varepsilon)$ au punctele staționare:

$$\begin{array}{|c|} \hline \theta_1 \\ \hline \tau_1 \\ \hline \varepsilon_1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline 469,7451 \\ \hline 37,24873 \\ \hline 17,31413 \\ \hline \end{array}, \text{ respectiv } \begin{array}{|c|} \hline \theta_2 \\ \hline \tau_2 \\ \hline \varepsilon_2 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline 469,56 \\ \hline 36,6531 \\ \hline 16,84549 \\ \hline \end{array} \quad (5.55)$$

Deoarece în practică temperatura se stabilește cu o precizie de ordinul gradelor, iar timpul cu o precizie de ordinul minutelor se adoptă valorile rotunjite ale acestor mărimi după cum urmează:

$$\theta_1 = \theta_2 = 469^\circ\text{C} ; \quad \tau_1 = \tau_2 = 37 \text{ min.}$$

rezultând punctele staționare

$$\begin{array}{|c|} \hline \theta_1^* \\ \hline \tau_1^* \\ \hline \varepsilon_1^* \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline 469 \\ \hline 37 \\ \hline 17,31413 \\ \hline \end{array}, \text{ respectiv } \begin{array}{|c|} \hline \theta_2^* \\ \hline \tau_2^* \\ \hline \varepsilon_2^* \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline 469 \\ \hline 37 \\ \hline 16,84549 \\ \hline \end{array} \quad (5.56)$$

Aceste puncte nu sunt puncte de extrem ale funcțiilor Y_1 și Y_2 fiind cunoscute sub denumirea de "puncte șa". În general coordonatele acestor puncte coincid cu coordonatele punctelor extreme ale funcțiilor în raport cu o parte din variabilele respective.

Acest lucru poate fi verificat pe baza proprietății potrivit căreia o funcție $f : R^3 \rightarrow R$ are punctul de extrem (a, b, c) dacă $(\forall) x, y, z \in R$ rezultă că diferența $f(x, y, z) - f(a, b, c)$ nu își schimbă semnul în vecinătatea punctului (a, b, c) . Dacă această diferență este negativă punctul (a, b, c) este de maxim în caz contrar punctul este de minim.

Acest calcul de verificare se poate face și în cazul când funcția considerată admite puncte extreme în raport cu anumite variabile; pentru aceasta se consideră că toate celelalte variabile sunt parametri, deci vor avea valori constante în mod arbitrar.

Considerând funcția Y_1 în raport cu variabila θ , vom verifica dacă $\theta_1^* = 469^\circ C$ corespunde unui punct de extrem, relativ la variabila θ , pentru τ și \mathcal{E} constanți.

Adoptând $\tau = 37 \text{ min.}$, $\mathcal{E} = 25 \%$ rezultă:

$$\begin{cases} Y_1(467, 37, 25) = 671,177 \text{ MPa} \\ Y_1(469, 37, 25) = 671,82024 \text{ MPa} \\ Y_1(471, 37, 25) = 671,4289 \text{ MPa} \end{cases} \quad (5.57)$$

În consecință $Y_1(\theta, \tau, \mathcal{E}) - Y_1(469, \tau, \mathcal{E}) < 0$, rezultă că $\theta_1^* = 469^\circ C$ corespunde unui punct de maxim al funcției Y_1 în raport cu variabila θ , pentru τ și \mathcal{E} constanți.

În mod similar, pentru funcția Y_2 vom avea:

$$\begin{cases} Y_2(467, 37, 25) = 630,1523 \text{ MPa} \\ Y_2(469, 37, 25) = 630,7083 \text{ MPa} \\ Y_2(471, 37, 25) = 630,2949 \text{ MPa} \end{cases} \quad (5.58)$$

de unde: $Y_2(\theta, \tau, \mathcal{E}) - Y_2(469, \tau, \mathcal{E}) < 0$, rezultă că $\theta_2^* = 469^\circ C$ corespunde unui punct de maxim al funcției Y_2 în raport cu variabila θ , pentru τ și \mathcal{E} constanți.

Procedând în mod analog se ajunge la rezultatul că $\tau_1^* = 37 \text{ min.}$ corespunde unui punct de maxim al funcției Y_1 în raport cu variabila τ respectiv $\tau_2^* = 37 \text{ min.}$ corespunde unui punct de maxim al funcției Y_2 în raport cu variabila τ , în ambele cazuri θ și \mathcal{E} fiind considerați parametri constanți.

Aceste rezultate pot fi deduse și din analiza semnelor minorilor matricelor hessiene corespunzătoare funcțiilor Y_1 și Y_2 pentru care $\Delta_1 < 0$, $\Delta_2 > 0$.

În raport cu variabila ε se demonstrează cu ușurință că funcțiile Y_1 și respectiv Y_2 prezintă un punct de minim pentru $\varepsilon_1^* = 17,31413$ respectiv $\varepsilon_2^* = 16,8374$ pentru care:

$$Y_1(\theta, \tau, \varepsilon) - Y_1(\theta, \tau, \varepsilon_1^*) > 0$$

$$Y_2(\theta, \tau, \varepsilon) - Y_2(\theta, \tau, \varepsilon_2^*) > 0$$

unde θ, τ - constanți.

Ținând cont de rezultatele obținute anterior rezultă că funcțiile Y_1 și Y_2 admit puncte de optim având coordonatele:

$$\theta^* = 469^\circ\text{C}, \quad \tau_1^* = 37 \text{ min.}$$

variabila ε fiind adoptată în funcție de cerințele tehnologice.

Deoarece funcțiile Y_1 și Y_2 prezintă puncte de minim în raport cu variabila ε , respectiv $\varepsilon_1^* = 17,31413$ în cazul funcției Y_1 și $\varepsilon_2^* = 16,8374$ în cazul funcției Y_2 , se recomandă evitarea acestor valori.

Deoarece ambele funcții Y_1 și Y_2 sunt crescătoare în raport cu ε , pentru $\varepsilon > \varepsilon_{1,2}^*$, rezultatele cele mai bune se obțin pentru valorile maxime ale lui ε .

5.2.4 Alungirea specifică la rupere

O condiție ce trebuie îndeplinită la optimizarea regimului de tratament termomecanic al aliajului Al-Zn-Mg-Cu este asigurarea unei alungiri minime $A_5 > 7\%$.

Derivatele de ordinul I ale funcției:

$$Y_3(\theta, \tau, \varepsilon) = 53,7641 - 0,0903 \theta + 0,18508 \tau + 0,39742 \varepsilon - 0,0005 \theta \tau - 0,0008 \cdot \theta \varepsilon - 0,0015 \tau \varepsilon \quad (5.59)$$

sunt următoarele:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial Y_3}{\partial \theta} = -0,0903 - 0,0005 \cdot \tau - 0,0008 \cdot \varepsilon \\ \frac{\partial Y_3}{\partial \tau} = 0,18508 - 0,0005 \cdot \theta - 0,0015 \cdot \varepsilon \\ \frac{\partial Y_3}{\partial \varepsilon} = 0,39742 - 0,0008 \cdot \theta - 0,0015 \cdot \tau \end{array} \right. \quad (5.60)$$

$$\text{Soluțiile sistemului: } \frac{\partial Y_3}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial Y_3}{\partial \tau} = 0, \quad \frac{\partial Y_3}{\partial \varepsilon} = 0 \quad (5.61)$$

reprezintă coordonatele punctelor staționare.

Sistemul, în formă explicită, se poate scrie:

$$\left\{ \begin{array}{l} -0,0005 \cdot \tau - 0,0008 \cdot \varepsilon = 0,0903 \\ -0,0005 \cdot \theta - 0,0015 \cdot \varepsilon = -0,18508 \\ -0,0008 \cdot \theta - 0,0015 \cdot \tau = -0,39742 \end{array} \right. \quad (5.62)$$

Matricea A atașată sistemului (5.62) este:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -0,0005 & -0,0008 \\ -0,0005 & 0 & -0,0015 \\ -0,0008 & -0,0015 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

Sub formă matriceală sistemul de mai sus se scrie:

$$A \cdot X = B,$$

unde:

$$B = \begin{bmatrix} 0,0903 \\ - 0,18508 \\ - 0,39742 \end{bmatrix} \quad (5.64)$$

Înmulțind ambii membri la stânga cu inversa matricei A rezultă:

$$A^{-1} \cdot A \cdot X = A^{-1} \cdot B \quad \text{de unde} \quad X = A^{-1} \cdot B \quad (5.65)$$

în care:

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} 1875 & - 1000 & - 625 \\ - 1000 & 533,33 & - 333,33 \\ - 625 & - 333,33 & 208,33 \end{bmatrix} \quad (5.66)$$

Rezolvând ecuația matriceală rezultă:

$$X = \begin{bmatrix} 602,78 \\ - 56,536 \\ - 77,54 \end{bmatrix} \quad (5.67)$$

care reprezintă punctul staționar corespunzător funcției Y_3 . Observăm că acest punct staționar nu are semnificație fizică având coordonatele τ și ε negative (imposibil în realitate).

Acest punct nu este nici punct de extrem întrucât derivatele parțiale de ordinul doi

$$\frac{\partial^2 Y_3}{\partial \theta^2}, \quad \frac{\partial^2 Y_3}{\partial \tau^2} \quad \text{și} \quad \frac{\partial^2 Y_3}{\partial \varepsilon^2}$$

sunt nule.

Analizând semnul derivatelor parțiale de ordinul I se constată următoarele:

a) pentru (\forall) τ și ε din domeniul de definiție $\frac{\partial Y_3}{\partial \theta} < 0$ deci funcția Y_3

este descendentă în raport cu θ ;

b) pentru (\forall) θ și ε din domeniul de definiție $\frac{\partial Y_3}{\partial \tau} < 0$ rezultă

deci că funcția Y_3 este descendentă în raport cu τ ;

c) $\frac{\partial Y_3}{\partial \varepsilon} = 0,39742 - 0,0008 \cdot \theta - 0,0015 \cdot \tau$

Din $\frac{\partial Y_3}{\partial \varepsilon} = 0 \Rightarrow \tau = \frac{0,39742 - 0,0008 \cdot \theta}{0,0015}$

Pentru $\theta = 469^\circ\text{C} \Rightarrow \tau = 14,81 \text{ min.}$

Rezultă deci că pentru $\theta = 469^\circ\text{C}$ și $\tau < 14,81 \text{ min.}$, $\frac{\partial Y_3}{\partial \varepsilon} > 0$ deci funcția Y_3

este crescătoare în raport cu ε , iar pentru $\theta = 469^\circ\text{C}$ și $\tau > 14,81 \text{ min.}$, $\frac{\partial Y_3}{\partial \varepsilon} < 0$,

deci funcția Y_3 este descendentă în raport cu ε .

Se observă că pentru $\tau > 13$ min. alungirea specifică scade odată cu creșterea gradului de deformare ε .

În consecință rezultă că valoarea minimă a alungirii, pentru condiții optime de procesare, $\theta^* = 469^\circ\text{C}$, $\tau = 37$ min și un grad de reducere maxim $\varepsilon = 41,82$ este:

$$Y_3(469, 37, 41,82) = 8,193 \quad (5.68)$$

Din considerente tehnologice, gradul de reducere maxim se stabilește la valoarea $\varepsilon = 35 \%$ de unde rezultă că valorile optime ale parametrilor de tratament termomecanic intermediar, obținuți pentru aliajul AlZn5Mg2CuCr, reprezentativ sistemului de aliaje de aluminiu de înaltă rezistență Al-Zn-Mg-Cu sunt următorii:

$$\begin{aligned} \theta &= 469^\circ\text{C} \\ \tau &= 37 \text{ min} \\ \varepsilon &= 35 \% \end{aligned} \quad (5.69)$$

Această combinație a parametrilor de tratament termomecanic intermediar asigură, conform celor propuse inițial, valori maxime ale rezistenței la rupere și ale limitei de curgere simultan cu asigurarea unei alungiri specifice la rupere la nivelul impus de normele de recepție:

$$\begin{aligned} R_m &= 689,9 \text{ MPa} \\ R_{p0,2} &= 646,8 \text{ MPa} \\ A_5 &= 8,42 \% (> 7 \%) \end{aligned} \quad (5.70)$$

5.3 Modelarea matematică a parametrilor de tratament termomecanic final

Pentru îmbunătățirea proprietăților finale ale aliajelor de aluminiu de înaltă rezistență se utilizează diferite combinații ale mai multor procedee de prelucrare. Astfel de combinații sunt și tratamentele termomecanice finale care au fost aplicate de către unii cercetători și în cazul aliajelor sistemului Al - Zn - Mg - Cu (vezi tabelul 2.2).

Deformarea plastică s-a efectuat, în general, după punere în soluție și călire /6, 7, 8/. S-a urmărit în special îmbunătățirea proprietăților de rezistență și plasticitate urmate de reziliență, rezistență la coroziune sub sarcină și rezistentă la oboseală prin îmbătrâniri artificiale la temperaturi relativ ridicate, în schimb informațiile privind îmbătrânirea artificială la temperaturi joase (revenire joasă) sunt mult mai limitate.

Rezultatele cercetărilor privind acest din urmă tip de îmbătrânire arată că pentru a se obține o creștere semnificativă a rezistenței comparativ cu cazul tratamentelor convenționale, este necesară o îmbătrânire parțială înaintea deformării, iar îmbătrânirea după deformare este recomandată după o deformare la rece.

Pentru elaborarea modelului matematic metoda de cercetare adoptată este metoda experimentului programat. Principalii parametri sunt temperatura și timpul de îmbătrânire înaintea deformării, gradul de deformare la rece și temperatura și timpul de îmbătrânire artificială finală.

Așa cum s-a arătat și în cap. 5.1, temperatura și timpul de îmbătrânire înaintea deformării la rece s-a luat de 100° C și, respectiv 1 oră, datorită condițiilor necesare deformării la rece a materialului /2/. Lucrări recente /3, 5, 8/ au obținut condițiile de tratament optim prin metode convenționale de cercetare, aceste condiții fiind în jur de 120°C x 12 ore îmbătrânire artificială după deformare și, respectiv, 10 % deformare la rece.

Condițiile de tratament termomecanic optim nu s-au obținut însă prin variația simultană a diferiților parametri, fiind necesară, deci, o relație cantitativă între variabile și proprietățile necesare.

În prezentele cercetări se utilizează analiza factorială completă a experimentărilor de tipul 2^3 pentru a elabora ecuațiile de regresie ale celor patru proprietăți mecanice urmărite (rezistența la rupere R_m , limita de curgere $R_{p 0,2}$, microduritatea Vickers HV și alungirea relativă la rupere A_5), parametri independenți fiind temperatura și timpul îmbătrânirii finale și gradul de deformare la laminarea la rece înaintea îmbătrânirii artificiale finale.

Aliajul $AlZn_5Mg_2CuCr$ utilizat pentru experimentări a fost elaborat la nivel industrial conform celor prezentate în cap. 2.2 și are compoziția chimică dată în tabelul 2.5. Aliajul s-a prelucrat la cald conform variantei III din tabelul 3.3 la grosimea de 1,54 mm și în final s-a laminat la rece la grosimea de 1 mm, realizându-se un grad total de deformare de 35 %, conform variantei optime de TTMI (vezi capitolul 5.2). Din aceste table laminate la cald și la rece s-au prelevat eșantioanele destinate experimentărilor care au fost supuse tratamentului de punere în soluție la 469°C timp de 37 min și apoi călite în apă, conform celor determinate în cap. 5.2.

Toate eșantioanele au fost îmbătrânite la temperatura și timpul constante de, respectiv, 100°C și 1 oră.

Pentru înlăturarea greșelilor sistematice, ordinea desfășurării experiențelor necesare s-a ales conform succesiunii întâmplătoare a numerelor naturale. Eșantioanele au fost laminate la rece cu diferite grade de reducere (5, 8 și 11 %) și îmbătrânite artificial la diferite combinații de temperatură și timp.

Tabelul 5.11 prezintă corespondența dintre valorile factorilor în unități naturale și în unități codificate.

Tabelul 5.11

Intervalele de variație ale factorilor

Nivelul de variație	Temperatura de îmbătrânire, T [°C]	Timpul de îmbătrânire, t [ore]	Gradul de reducere, e [%]
Codificarea	x_1	x_2	x_3
Nivelul superior (+1)	135	14	11
Nivelul de bază (0)	125	12	8
Nivelul inferior (-1)	115	10	5
Intervalul de variație	10	2	3

În tabelul 5.12 se prezintă matricea programării experimentului și valorile caracteristicilor mecanice obținute pentru fiecare combinație de tratament termomecanic final.

Valorile din tabel sunt media a trei rezultate foarte apropiate obținute independent de la experiențe repetate de trei ori.

Tabelul 5.12

Matricea de experimentare

Nr. exp.	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₁ x ₂	x ₁ x ₃	x ₂ x ₃	R _m MPa Y ₁	R _{p0,2} MPa Y ₂	HV Y ₃	A ₅ % Y ₄
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	622	561	134	11,85
2	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	704	662	164	6,91
3	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	640	592	146	9,82
4	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	671	632	156	8,28
5	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	622	554	134	12,47
6	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	644	598	142	8,93
7	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	630	592	138	9,89
8	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	628	580	132	11,75
9	+1	0	0	0	0	0	0	649	596	143	9,98
10	+1	0	0	0	0	0	0	639	596	142	9,6
11	+1	0	0	0	0	0	0	644	595	145	9,3
12	+1	0	0	0	0	0	0	640	597	143	9,75
13	+1	0	0	0	0	0	0	645	596	143	9,9
14	+1	0	0	0	0	0	0	641	597	144	9,78

Modelul matematic calculat este constituit din următoarele ecuații de regresie:

$$Y_1 = 644,21429 - 16,625 x_1 + 2,875 x_2 + 14,125 x_3 - 9,375 x_1x_2 - 11,625 x_1x_3 + 0,875 x_2x_3 \quad (5.71)$$

$$Y_2 = 596,286 - 21,625 x_1 - 2,625 x_2 + 15,375 x_3 - 14,625 x_1x_2 - 13,625 x_1x_3 + 2,375 x_2x_3 \quad (5.72)$$

$$Y_3 = 143,286 - 5,25 x_1 + 0,25 x_2 + 6,75 x_3 - 4,25 x_1x_2 - 4,75 x_1x_3 - 1,25 x_2x_3 \quad (5.73)$$

$$Y_4 = 9,87214 + 1,02 x_1 + 0,0525 x_2 - 0,7725 x_3 + 1,1 x_1x_2 + 0,6 x_1x_3 + 0,1125 x_2x_3 \quad (5.74)$$

Pentru elaborarea ecuațiilor de regresie de mai sus s-a utilizat metoda suprafețelor de răspuns prezentată detaliat în cap. 5.1. Calculele au fost efectuate utilizând mediul de programare Excel 5.0 sub WINDOWS ' 95 (vezi Anexa X), pe un calculator PC 586 DX5/133 MHz.

În urma analizei statistice a modelului determinat (ecuațiile 5.71...5.74) rezultă că ecuațiile sunt adecvate pentru un interval de încredere de 95 %, deci modelul matematic este corect ales.

Calculul de verificare a semnificației coeficienților modelelor obținute (vezi Anexa X) scoate în evidență o semnificație scăzută a coeficienților corespunzători variabilelor x_2 , respectiv x_2x_3 pentru funcțiile Y_1 , Y_3 și Y_4 . Pentru funcția Y_4 o semnificație scăzută o prezintă și termenii corespunzători variabilelor x_2 , x_3 , x_1x_3 și x_2x_3 .

Deoarece programul experimental nu este ortogonal, pentru calcule precise vor fi luați în considerare și termenii cu semnificație redusă.

Utilizând programul experimental anterior, prin înlocuirea variabilelor codificate (x_1 , x_2 și x_3) cu valorile naturale corespunzătoare (T , t și e), rezultă funcțiile corespunzătoare variabilelor naturale (vezi Anexa XI), după cum urmează:

$$Y_1(T, t, e) = -279,5149 + 7,0625 \cdot T + 58,864583 \cdot t + 51,395833 \cdot e - 0,46875 \cdot T \cdot t - 0,3875 \cdot T \cdot e + 0,1458333 \cdot t \cdot e \quad (5.75)$$

$$Y_2(T, t, e) = -671,69 + 10,2458 \cdot T + 86,9271 \cdot t + 57,1458 \cdot e - 0,7313 \cdot T \cdot t - 0,4542 \cdot T \cdot e + 0,39583 \cdot t \cdot e \quad (5.76)$$

$$Y_3(T, t, e) = -307,67 + 3,29167 \cdot T + 28,3542 \cdot t + 24,5417 \cdot e - 0,2125 \cdot T \cdot t - 0,1583 \cdot T \cdot e - 0,2083 \cdot t \cdot e \quad (5.77)$$

$$Y_4(T, t, e) = 103,167 - 0,718 \cdot T - 6,99875 \cdot t - 2,9825 \cdot e + 0,055 \cdot T \cdot t + 0,02 \cdot T \cdot e + 0,01875 \cdot t \cdot e \quad (5.78)$$

Domeniul de definiție al funcțiilor de mai sus este $T = 115-135^\circ\text{C}$; $t = 10 - 14$ ore; $e = 5-11\%$. Pentru exemplificare, în tabelul 5.13 se prezintă valorile factorilor analizați, calculate cu ecuațiile de mai sus, pentru diferite valori ale temperaturii de îmbătrânire, păstrând constante, la nivelul de bază, valorile duratei de menținere și gradului de deformare.

Tabelul 5.13

Valori calculate $Y_i = f(T)$ pentru $t_0 = 12$ ore și $e = 8\%$

Temperatura de îmbătrânire T , $^\circ\text{C}$	115	120	125	130	135
Y_1 (Rm, MPa)	660,8	652,5	644,2	635,9	627,6
Y_2 ($R_{p0,2}$, MPa)	617,8	606,9	596,2	585,4	574,5
Y_3 (HV)	148,6	145,9	143,3	140,7	138,1
Y_4 (A_5 , %)	8,85	9,36	9,87	10,38	10,89

5.4 Optimizarea parametrilor de tratament termomecanic final

Obiectivul optimizării modelelor matematice descrise de relațiile 5.75...5.78 îl constituie determinarea acelor parametri pentru care se obțin efecte utile maxime. Deoarece funcțiile descrise de aceste relații sunt funcții liniare, acestea nu admit puncte de extrem global. În acest caz parametri optimi de lucru pot fi stabiliți studiindu-se monotonia funcțiilor în raport cu variabilele independente.

Pentru aceasta se analizează cele patru funcții în raport cu temperatura, celelalte două variabile t și e fiind considerate parametri.

Derivatele parțiale de ordinul I în raport cu variabila T , corespunzătoare celor patru funcții sunt:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial T} = 7,0625 - 0,46875 \cdot t - 0,3875 \cdot e \quad (5.79)$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial T} = 10,2458 - 0,7313 \cdot t - 0,4542 \cdot e \quad (5.80)$$

$$\frac{\partial Y_3}{\partial T} = 3,29167 - 0,2125 \cdot t - 0,1583 \cdot e \quad (5.81)$$

$$\frac{\partial Y_4}{\partial T} = -0,718 - 0,055 \cdot t - 0,02 \cdot e \quad (5.82)$$

Pentru a studia monotonia funcțiilor 5.75...5.78 se procedează la determinarea punctelor în care se anulează derivatele parțiale corespunzătoare. Astfel rezultă următoarele ecuații:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial T} = 0 \quad ; \quad 7,0625 - 0,46875 \cdot t - 0,3875 \cdot e = 0 \quad (5.83)$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial T} = 0 \quad ; \quad 10,2458 - 0,7313 \cdot t - 0,4542 \cdot e = 0 \quad (5.84)$$

$$\frac{\partial Y_3}{\partial T} = 0 \quad ; \quad 3,29167 - 0,2125 \cdot t - 0,1583 \cdot e = 0 \quad (5.85)$$

$$\frac{\partial Y_4}{\partial T} = 0 \quad ; \quad -0,718 - 0,055 \cdot t - 0,02 \cdot e = 0 \quad (5.86)$$

Corespunzător celor patru funcții $Y_{1...4}$ rezultă următoarele puncte critice și domeniul de valori pe care acestea îl acoperă, pentru $e = 5 \div 11 \%$

$$Y_1 : t_{cr1} = \frac{7,0625 - 0,3875 \cdot e}{0,46875} ; t_{cr1} = 5,9 \dots 10,9 \quad (5.87)$$

$$Y_2 : t_{cr2} = \frac{10,2458 - 0,4542 \cdot e}{0,7313} ; t_{cr2} = 7,1 \dots 10,9 \quad (5.88)$$

$$Y_3 : t_{cr3} = \frac{3,29167 - 0,1583 \cdot e}{0,2125} ; t_{cr3} = 7,3 \dots 11,7 \quad (5.89)$$

$$Y_4 : t_{cr4} = \frac{0,718 - 0,02 \cdot e}{0,055} ; t_{cr4} = 9 \dots 11,2 \quad (5.90)$$

Se observă că derivatele parțiale $\partial Y_1/\partial T$, $\partial Y_2/\partial T$ și $\partial Y_3/\partial T$ sunt pozitive pentru $t < t_{cr}$ și negative în rest. Acest lucru arată că funcțiile Y_1 , Y_2 și Y_3 sunt crescătoare pentru valori ale duratei $t < t_{cr}$ (relațiile 5.87 - 5.89) și descrescătoare pentru valori ale duratei $t > t_{cr}$. Se poate verifica cu ușurință că valorile maxime ale funcțiilor Y_1 , Y_2 și Y_3 se obțin pentru temperaturi T minime și, respectiv, pentru durata de menținere și grad de deformare maxime.

În cazul alungirii specifice, descrise de funcția Y_4 , se poate observa că pentru $t < t_{cr4}$ derivata parțială $\partial Y_4 / \partial T$ este negativă, fiind pozitivă în rest. În consecință funcția Y_4 este descrescătoare pentru $t < t_{cr4}$ și crescătoare pentru $t > t_{cr4}$. Este evident că valorile minime ale alungirii specifice la rupere A_5 se obțin pentru temperaturi minime, și timp de menținere și grad de deformare maxime.

Așadar pentru $T = 115^\circ\text{C}$, $t = 14$ ore și $e = 11\%$ rezultă următoarele valori extreme ale caracteristicilor studiate:

$$\begin{aligned} R_m &= 699,71 \text{ MPa} \\ R_{p0,2} &= 661,16 \text{ MPa} \\ HV &= 163,3 \\ A_5 &= 6,5445 \% \end{aligned} \quad (5.91)$$

Se observă că alungirea A_5 este mai mică decât limita inferioară de 7% admisă de normele de recepție. Obținerea unei alungiri corespunzătoare se face modificând valorile parametrilor T , t și e în mod convenabil astfel încât să avem o scădere minimă a valorilor caracteristicilor mecanice R_m , $R_{p0,2}$ și HV , simultan cu creșterea valorii alungirii la rupere A_5 .

Din considerente economice se poate verifica cu ușurință că este convenabilă scăderea duratei de menținere T de la 14 ore la 13 ore, valoarea pentru care se obține:

$$\begin{array}{l}
 T = 115^{\circ}\text{C} \\
 t = 13 \text{ ore} \\
 e = 11 \%
 \end{array}
 \Rightarrow
 \begin{array}{l}
 R_m = 693,15 \text{ MPa} \\
 R_{p0,2} = 653,98 \text{ MPa} \\
 HV = 161,71 \\
 A_5 = 7,012 \%
 \end{array}
 \quad (5.92)$$

Valorile parametrilor T , t și e sunt valorile optime pentru procesul tehnologic considerat.

În cazul în care se dorește îmbunătățirea în continuare a proprietăților de plasticitate ($A_5 = \text{min. } 8 \%$), se va scădea durata de menținere t de la 14 ore la 13,4 ore, concomitent cu creșterea temperaturii T de la 115°C la 120°C , pentru care se obține:

$$\begin{array}{l}
 T = 120^{\circ}\text{C} \\
 t = 13,4 \text{ ore} \\
 e = 11 \%
 \end{array}
 \Rightarrow
 \begin{array}{l}
 R_m = 678,37 \text{ MPa} \\
 R_{p0,2} = 634,1 \text{ MPa} \\
 HV = 155,87 \\
 A_5 = 8,02 \%
 \end{array}
 \quad (5.93)$$

Această combinație a parametrilor de laminare și de tratament termic final asigură, conform celor propuse inițial, valori maxime ale rezistenței la rupere, ale limitei de curgere și ale microdunității, simultan cu asigurarea unei alungiri specifice la rupere la nivelul impus de norma de recepție.

5.5 Analiza și interpretarea rezultatelor

Cu ajutorul modelelor matematice determinate și verificate statistic s-au determinat combinațiile optime ale parametrilor tehnologici de tratament termomecanic intermediar (TTMI) și, respectiv, de tratament termomecanic final (TTMF) care maximizează caracteristicile de rezistență, asigurând în același timp nivelul minim impus de normele de recepție pentru caracteristicile de plasticitate.

Se remarcă faptul că proprietățile fizico-mecanice au o dependență puternică de parametri tehnologici luați în considerare.

5.5.1 În cazul TTMI , rezistența la rupere a atins o valoare maximă de circa. 690 MPa, iar limita de curgere o valoare maximă de 647 MPa. Pe măsură ce temperatura crește până la circa 469°C, rezistența la rupere și limita de curgere cresc, apoi înregistrează o scădere.

Acest lucru se datorează intensificării difuziei în stare solidă prin creșterea temperaturii, care se soldează cu o mai mare cantitate de fază solubilă, durificatoare, antrenată în procesul de punere în soluție.

Efectul durificator maxim se obține la temperatura de circa 469°C. Creșterea temperaturii în continuare face posibilă atingerea punctului solidus al aliajului și face posibilă topirea eutecticelor prezente în structură.

Din analiza diagramei de echilibru termodinamic (vezi fig. 1.10) se poate constata că intervalul temperaturilor investigate este relativ depărtat de curba solidus. Apariția topiturilor eutectice se explică prin faptul că aliajul studiat nu a fost obținut în condiții de echilibru termodinamic, curba solidus reală, pentru aliajul obținut în condiții industriale, fiind plasată la valori mai mici ale temperaturii. Acest fenomen este responsabil de scăderea valorilor rezistenței la rupere și a limitei de curgere pe măsură ce temperatura de punere în soluție crește peste valoarea optimă.

Alungirea specifică la rupere variază invers proporțional cu temperatura de punere în soluție. Scăderea alungirii se explică prin intensificarea efectului de durificare pe măsură ce temperatura crește până la 469°C; scăderea în continuare se datorează faptului că în structură apar și se dezvoltă segregatii eutectice care afectează plasticitatea materialului (zonele afectate de topiturile eutectice au caracteristicile materialului în stare turnată).

În ceea ce privește efectul timpului de menținere la temperatura de punere în soluție se constată că pe măsură ce crește timpul de menținere se îmbunătățesc caracteristicile de rezistență și scad cele de plasticitate. Aceasta se datorează caracterului complet pe care îl are punerea în soluție atunci când se practică un timp de menținere mare.

Asupra gradului de reducere aplicat la laminarea la rece se poate concluziona că reducerea optimă este de circa. 35 %, valorile mai mici conducând la caracteristici mai slabe de rezistență și mai ridicate de plasticitate, iar creșterea peste valoarea optimă a gradului de reducere se soldează cu afectarea structurii materialului laminat (apar microfisuri) prin depășirea gradului admisibil de deformare. Evident microfisurile apărute la laminare nu se sudează la tratamentele termice ulterioare ci, din contră, acestea iau amploare ca urmare a efectului de concentrator de eforturi și tensiunilor termice reziduale generate la călire.

5.5.2 În cazul TTMF , din analiza ecuațiilor de regresie obținute rezultă că o creștere a temperaturii de îmbătrânire finală, în intervalul de variație analizat, peste nivelul de bază de 125°C va conduce la scăderea caracteristicilor de rezistență (rezistența la rupere, limita de curgere și duritatea) în schimb crește plasticitatea (alungirea relativă crește într-o anumită măsură cu creșterea temperaturii de îmbătrânire).

Creșterea timpului de îmbătrânire artificială în intervalul de variație analizat peste nivelul de bază de 12 ore afectează pozitiv proprietățile mecanice cercetate însă efectul este destul de scăzut în comparație cu efectul temperaturii. În schimb creșterea simultană atât a temperaturii cât și a timpului de îmbătrânire finală peste nivelele de bază afectează negativ rezistența la rupere, limita de curgere și duritatea, însă afectează pozitiv alungirea relativă la rupere.

Mărirea gradului de reducere la laminarea la rece peste nivelul de bază de 8 % conduce la creșterea semnificativă a rezistenței la rupere, a limitei de curgere și a durității însă aceasta micșorează alungirea la rupere.

Interacțiunea între creșterea temperaturii de îmbătrânire și a gradului de deformare la rece determină o scădere substanțială a proprietăților de rezistență și o ușoară creștere a plasticității.

Pe baza modelului matematic stabilit se poate concluziona că sunt atinse condițiile optime de TTMF atunci când temperatura de îmbătrânire este de 115°C, timpul de îmbătrânire este de 13 ore și gradul de reducere realizat la laminarea la rece înaintea îmbătrânirii finale este de 11 %.

Maxima durificare a materialului la îmbătrânirea artificială prin menținerea la temperatura de 115°C timp de 13 ore se explică prin cea mai mare concentrație de zone G.P. și de faze de tranziție care se formează în aceste condiții. Aceste faze prezintă o structură intermediară între aceea a matricei și cea a precipitatului stabil.

Conținutul controlat de crom determină o distribuție mai uniformă a precipitatelor durificatoare și formarea, în timpul tratamentului termic de punere în soluție, de precipitate ale cromului între matrice și limitele de grăunți.

Această distribuție uniformă a precipitatelor durificatoare, datorată cromului, ca element antirecristalizant, conduce la îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență mecanică.



M. V. Suci - Teza de doctorat

CERCETĂRI PRIVIND DEFORMAREA PLASTICĂ ȘI TRATAMENTUL TERMIC AL UNOR ALIAJE DE ALUMINIU SPECIALE DESTINATE INDUSTRIEI AERONAUTICE

Capitolul 6

CONCLUZII GENERALE

Lucrarea prezintă principalele rezultate obținute de autor prin cercetările efectuate privind deformarea plastică și tratamentul termic al aliajelor de aluminiu speciale AlZn5Mg2CuCr și AlCu4Mg1,5Mn reprezentative sistemelor de aliaje Al-Zn-Mg-Cu de tip zical și, respectiv, Al-Cu-Mg de tip dural. Cercetările experimentale efectuate au urmărit definirea celor mai avantajoase modalități de efectuare a ciclurilor de prelucrare termică și mecanică, diferite de cele tradiționale, care să asigure cea mai bună congruență a caracteristicilor mecanice, structurale, tehnologice și de exploatare.

În acest capitol, pe lângă concluziile parțiale formulate pe parcursul lucrării, se prezintă concluziile generale asupra ansamblului lucrării, rezultate atât din studiul literaturii de specialitate cât și din cercetările experimentale proprii, scoțându-se în evidență aportul original al autorului și, în final, se puntează noi direcții de cercetare în domeniu.

1. Inițierea cercetărilor în acest domeniu, alegerea direcțiilor de cercetare, a metodelor adecvate de investigare etc., au fost stabilite în urma parcurgerii unui bogat material documentar de specialitate, cuprinzând ultimele noutăți în domeniu. În acest sens s-a pornit de la clasificarea aliajelor de aluminiu destinate industriei aeronautice, după care s-a efectuat o analiză riguroasă a influenței manifestate de elementele de aliere, de condițiile de deformare plastică și de tratament termic asupra caracteristicilor mecanice și structurale ale aliajelor de tip zical și dural.

2. Cele mai răspândite aliaje speciale de tip Al-Zn-Mg-Cu și Al-Cu-Mg, de înaltă rezistență mecanică, utilizate în industria aeronautică se încadrează într-un câmp de compoziții relativ restrâns: Zn = 5,0 - 8,5%, Mg = 2,1 - 3,4% și Cu = 1,2 - 2,6% în primul caz și Cu = 1,8 - 6,8%, Mg = 0,2 - 1,8% în al doilea caz. În lucrare nu s-a luat în considerare adăugarea sau substituirea de elemente de aliere deoarece acest lucru ține, mai degrabă, de domeniul de dezvoltare a aliajelor decât de îmbunătățirea proprietăților cu ajutorul deformărilor plastice și tratamentelor termice.

3. Rezultatele studiului documentar, referitoare la aliajele de aluminiu speciale în general și la prelucrabilitatea acestora prin deformări plastice și tratamente termice în particular, au scos în evidență o serie de elemente incomplet elucidate, legate de corelarea caracteristicilor structurale inițiale cu condițiile de deformare plastică și de tratament termic precum și cu caracteristicile mecanice și structurale finale.

Avându-se în vedere anizotropia caracteristicilor finale ale semifabricatelor

realizate prin procedee convenționale, a rezultat necesitatea cercetării și punerii la punct a unor variante de tratament termomecanic (TTM) care să înlăture aceste deficiențe.

De asemenea, a rezultat faptul că literatura de specialitate nu pune la dispoziție un aparat matematic specific care să determine precis și operativ gradul de influență manifestat de fiecare parametru de tratament termomecanic asupra valorilor caracteristicilor finale și nici care să descrie o corelație între influențele manifestate de către acești parametri.

A rezultat, de asemenea, că există posibilități de ameliorare a caracteristicilor mecanice și structurale ale acestor aliaje prin aplicarea unor noi variante de tratament termomecanic și prin controlul parametrilor de tratament.

4. Aceste aspecte rezultate în urma efectuării studiului documentar au servit drept elemente inițiatoare ale programului de cercetare adoptat în cadrul prezentei teze de doctorat, direcțiile de cercetare fiind următoarele:

- influența tratamentelor termomecanice intermediare (TTMI) și finale (TTMF) asupra caracteristicilor mecanice și structurale, comparativ cu metodele convenționale;

- modelarea matematică și optimizarea parametrilor de TTMI și TTMF.

5. Spre deosebire de prelucrările convenționale, în care procesele de deformare plastică și de tratament termic s-au tratat separat, atât din punct de vedere teoretic cât și practic, tratamentele termomecanice au implicat combinații ale acestor procese astfel încât modificările caracteristicilor mecanice și structurale au fost influențate de acțiunea conjugată a acestora.

Variatatea mecanismelor implicând crearea, rearanjarea și eliminarea dislocațiilor și limitelor de grăunți explică influența acestor tratamente termomecanice asupra modificărilor microstructurale și asupra proprietăților mecanice și de exploatare (vezi Anexa XIV). Interacțiunea dislocațiilor și a limitelor de grăunți cu precipitatele dizolvate și cu particulele de faze secundare conduce la creșterea caracteristicilor de rezistență (R_m , $R_{p0,2}$, HB) și la o anumită scădere a caracteristicilor de plasticitate (A_5).

6. Comportarea la deformarea plastică a aliajelor de aluminiu speciale, modificările cu caracter dinamic ce survin la deformarea la cald a acestora și legătura dintre plasticitate și rezistență la deformare, pe de o parte și condițiile de deformare plastică și tratament termic, pe de altă parte, sunt prezentate în lucrare (vezi și Anexa XV), comparativ cu alte materiale metalice. Astfel, s-a urmărit evidențierea aspectelor legate de influența elementelor principale de aliere, a temperaturii, gradului și vitezei de deformare asupra rezistenței la deformare și asupra plasticității, de influența condițiilor inițiale de omogenizare asupra procesului de recristalizare și asupra deformabilității acestor aliaje.

7. Tratamentele termice de omogenizare totală sau parțială înaintea deformării plastice efectuate prin încălziri la temperaturi ridicate (480/400°C) și timp îndelungați care au variat între 3 și 24 ore, au condus la solubilizarea compușilor intermetalici, la transformarea parțială sau la coalescența compușilor greu solubili precum și la precipitarea compușilor duri și fragili.

Consecințele practice ale omogenizării au constat în:

- eliminarea tensiunilor interne de turnare care sunt ridicate pentru aliajele luate în studiu deoarece acestea au intervalul de solidificare larg și s-au obținut prin turnare semicontinuă sub apă;

- îmbunătățirea deformabilității la prelucrarea la cald prin laminare sau prin extrudare;

- creșterea caracteristicilor mecanice finale de rezistență prin dispersarea particulelor de faze insolubile.

8. Rezultatele cercetărilor experimentale privind îmbunătățirea proprietăților de rezistență și plasticitate a aliajului AlZn5Mg2CuCr prin tratamente termomecanice intermediare au arătat că modificări oportune ale structurii în diferite etape de prelucrare la cald (omogenizare, recristalizare, laminare) conduc la îmbunătățirea combinațiilor dintre aceste proprietăți (vezi schema din Anexa XVI). S-a constatat că semifabricatele laminate la cald prin cele patru variante de cercetare adoptate se diferențiază între ele prin diversa morfologie și distribuție a particulelor conținând elemente antirecristalizante care apar, în mod deosebit, mai fine și disperse și mai omogene la semifabricatele obținute prin tratamente termomecanice, comparativ cu varianta convențională de prelucrare.

9. Valorile ridicate ale caracteristicilor mecanice obținute pentru aliajul de înaltă rezistență AlZn5Mg2CuCr, reprezentativ sistemului de aliaje Al-Zn-Mg-Cu ($R_m = 670$ MPa, $R_{p0,2} = 635$ MPa, $A_5 = 7\%$) prin tratament termomecanic conferă un plus de interes aliajelor acestui sistem în comparație cu alte aliaje de aluminiu de înaltă rezistență.

10. În cazul cercetărilor privind îmbunătățirea caracteristicilor mecanice și structurale ale aliajului AlCu4Mg1,5Mn, reprezentativ sistemului Al-Cu-Mg, s-au adoptat, de asemenea, un număr de patru variante de tratament termomecanic care au urmărit stabilirea parametrilor optimi de prelucrare. Valorile maxime ale proprietăților mecanice obținute ($R_m = 510$ MPa, $R_{p0,2} = 430$ MPa, $A_5 = 8\%$) sunt inferioare celor obținute pentru aliajul reprezentativ sistemului Al-Zn-Mg-Cu din care cauză se consideră oportun ca aliajele sistemului Al-Cu-Mg, considerate până nu demult ca fiind cele mai performante, să fie înlocuite de cele ale sistemului Al-Zn-Mg-Cu în noile aplicații din industria aeronautică. Din același motiv s-a optat pentru aliajul AlZn5Mg2CuCr în vederea aprofundării cercetărilor prin modelarea matematică și optimizarea parametrilor de TTMI și TTMF pentru maximizarea caracteristicilor mecanice.

11. Modelarea matematică a proceselor tehnologice de TTMI și TTMF aplicate aliajului de înaltă rezistență AlZn5Mg2CuCr, reprezentativ sistemului Al-Zn-Mg-Cu, a fost efectuată prin metoda suprafețelor de răspuns. Această metodă permite modelarea statistico-matematică a proceselor și fenomenelor complexe care au loc la prelucrarea termomecanic a aliajelor speciale de aluminiu și constă în determinarea funcțiilor de regresie dintre o variabilă dependentă și una sau mai multe variabile independente, relații care pot fi liniare sau neliniare, în funcție de complexitatea procesului studiat.

Metoda suprafețelor de răspuns a fost aplicată pentru prima dată la noi în țară relativ recent, în urmă cu circa 25 ani, la studierea fiabilității sculelor pentru mașini unelte, ulterior fiind aplicată și în alte ramuri, de vârf, ale științei și tehnicii (aeronautică, electronică, chimie). Această metodă modernă de cercetare experimentală, pe lângă analiza de regresie și analiza dispersională, utilizează și programarea statistică a experimentelor îmbinate într-un tot unitar.

12. Ca metodologie de determinare a modelelor matematice, în prezenta lucrare a fost adoptată metodologia bazată pe calcule matriciale, metodologie mai puțin utilizată până în prezent datorită calculelor laborioase care intervin în cadrul proceselor cu număr mare de variabile independente, însă această metodologie prezintă avantajul că permite utilizarea eficientă a calculatorului electronic care poate opera cu vectori și matrice de dimensiuni mari și foarte mari.

În cadrul lucrării, determinarea modelelor matematice de ordinul I și de ordinul II, atât pentru variabile codificate cât și pentru mărimi naturale, s-a efectuat utilizând mediul de programare Excel 5.0 sub WINDOWS ' 95. Pentru aceasta, în baza experimentelor programate, au fost construite tabele de calcul (sheet-uri), prezentate în anexele VIII-XI, cărora li s-au asociat, sub formă de macrouri, cele două programe prezentate în anexele XII și XIII.

13. Optimizarea modelelor matematice s-a efectuat utilizând o metodă analitică de calcul. Spre deosebire de metodele grafice de optimizare (pe secțiuni) care au o precizie scăzută și o arie de aplicabilitate mult mai restrânsă, metodele analitice permit determinarea punctelor de extrem și, respectiv, de optim local sau global, oferind informații suplimentare privind gradul de influență al fiecărei variabile independente asupra suprafeței de răspuns (variabilei dependente).

Ca metodă analitică a fost adoptată metoda de optimizare a funcționalelor de tipul $F: R_n \rightarrow R$, unde $n \in N^*$, metodă bazată pe calculul diferențial, particularizată pentru cazul funcțiilor de gradul I și II. Această metodă de optimizare este utilizată mai mult în cercetările din domenii de vârf ale științei și tehnicii (electronică, telecomunicații, termotehnică, analiza fenomenelor economice complexe) fiind însă mai puțin folosită, până în prezent, în studiul proceselor și fenomenelor metalurgice.

În lucrarea de față a fost oportună utilizarea acestei metode de optimizare în cazul proceselor metalurgice cercetate datorită posibilității de optimizare pe calculator a modelelor matematice stabilite, de complexitate ridicată, greu de abordat prin metode clasice de calcul.

14. Valorile caracteristicilor mecanice obținute în cazul cercetării aliajului AlZn5Mg2CuCr pe baza experimentului programat, prin modelarea matematică și optimizarea parametrilor de TTMI și TTMF, au crescut semnificativ comparativ cu cele obținute în cazul variantelor clasice de cercetare. Astfel, rezistența la rupere a crescut de la valoarea de 670 MPa, obținută prin cea mai adecvată variantă cercetată dintre cele patru variante propuse inițial (vezi tabelul 3.6, varianta III), la valoarea de 690 MPa în cazul modelării și optimizării parametrilor de TTMI și, respectiv la valoarea de 693 MPa în cazul modelării și optimizării parametrilor de TTMF (vezi anexele XVII și XVIII), în condițiile în care caracteristicilor de plasticitate le-au fost impuse valori minime admise.

Trebuie precizat, în finalul acestor concluzii generale, faptul că proprietățile fundamentale ale aliajelor speciale pentru industria aeronautică sunt strict dependente de întregul ciclu de tratament termomecanic la care sunt supuse aceste aliaje. Condițiile de tratament termomecanic, dacă nu sunt respectate într-o singură fază a ciclului, pot prejudicia în mod serios câmpul de utilizări al acestor aliaje, în timp ce variații destul de mici ale modalităților de execuție a acestor tratamente termomecanice pot micșora puternic caracteristicile tipice.

În ceea ce privește contribuția personală a autorului în abordarea temei lucrării de doctorat se poate remarca efortul depus de a aprofunda, prin cercetările experimentale efectuate, cunoștințele privind aliajele existente de tip Al-Zn-Mg-Cu și Al-Cu-Mg, de a verifica și de a confirma posibilitățile de ameliorare a caracteristicilor mecanice și structurale prin tratamente termomecanice adecvate și de a defini tipuri noi de tratamente termomecanice și metodologii noi de investigare și de prelucrare matematică a rezultatelor experimentale.

Ca elemente de originalitate ale lucrării pot fi specificate următoarele:

- grupările de condiții de deformări plastice și tratamente termice, care au fost selectate, pentru ambele aliaje studiate, în câte patru variante de cercetare, evaluându-se comparativ posibilitățile oferite de variantele neconvenționale propuse în raport cu cele convenționale;

- s-au determinat ecuațiile de regresie ale caracteristicilor mecanice (R_m , $R_{p0,2}$, A_5 , HB) în funcție de gradul de deformare prin laminare la rece și ale durtății HRB în funcție de durata îmbătrânirii naturale, în cazul semifabricatelor laminate la rece din aliaj AlCu4Mg1,5Mn;

- s-au stabilit două noi variante de TTMF pentru aliajul AlCu4Mg1,5Mn.

În cazul semifabricatelor din aliaj AlZn5Mg2CuCr:

- s-a pus la punct o nouă variantă de TTMI și o nouă variantă de TTMF;

- s-au elaborat modelele matematice ale caracteristicilor mecanice (pentru R_m , $R_{p0,2}$ și A_5) în funcție de parametri de TTMI și TTMF;

- s-au stabilit, prin optimizarea modelelor matematice, valorile optime ale parametrilor de TTMI și TTMF pentru maximizarea caracteristicilor de rezistență mecanică;

- s-a stabilit o metodologie nouă de modelare și optimizare pe calculator a parametrilor de TTMI și TTMF.

Metodologia de modelare și optimizare elaborată și utilizată de autor în prezenta lucrare are caracter original prin faptul că:

- utilizează calculul matricial, atât la determinarea modelelor matematice cât și la optimizarea acestor modele, asociat facilităților oferite de mediul de programare Excel 5.0 referitoare la operarea cu vectori și matrice de dimensiuni foarte mari;

- pentru efectuarea automată a tuturor secvențelor de calcul ce intervin în determinarea modelelor matematice de ordinul I și de ordinul II, autorul a elaborat două programe originale, corespunzătoare celor două tipuri de modele, care au fost atașate sub formă de macroui tabelelor de calcul (sheet - urilor) realizate în Excel 5.0;

- permite determinarea și verificarea statistică a modelelor matematice atât pentru operare cu variabile codificate cât și direct în mărimi naturale;

- reprezintă un instrument nou și eficient de modelare și optimizare și este aplicată pentru prima dată în lucrarea de față pentru studierea proceselor și fenomenelor complexe din metalurgie;

- utilizând tabelele de calcul (sheet-urile) și programele asociate pot fi modelate și optimizate procese și fenomene și din alte domenii și în care intervin 8-9 variabile independente, sau chiar mai multe, în funcție de resursele calculatorului utilizat și de numărul de date experimentale necesare constituirii programului experimental;

- este ușor de implementat și de utilizat pe orice calculator care are instalat mediul de programare Excel 5.0.

În finalul lucrării se poate aprecia că în domeniul metalurgiei aliajelor de aluminiu speciale destinate industriei aeronautice este necesar, în continuare, să se intensifice cercetările privind în special aliajele sistemului Al-Zn-Mg-Cu, cu mijloace din ce în ce mai perfecționate, care să permită aprofundarea cunoștințelor asupra fenomenelor care determină caracteristicile acestor aliaje și care să conducă la descoperirea unor noi aliaje și a unor noi procese de elaborare și transformare, astfel încât să se obțină produse din ce în ce mai performante.

Având în vedere caracterul complex al problemelor de rezolvat, eforturile vor trebui dirijate în direcția dezvoltării și industrializării unor noi aliaje speciale Al-Zn-Mg-Cu cu caracteristici mecanice ridicate prin variația conținutului de zinc, în direcția îmbunătățirii complexului de proprietăți ale acestor aliaje și în direcția punerii la punct a unor noi procedee de TTMI și TTMF care să conducă la îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență la oboseală, păstrând un bun compromis între rezistența mecanică, rezistența la coroziune și tenacitate.



M. V. Suci - Teza de doctorat

CERCETĂRI PRIVIND DEFORMAREA PLASTICĂ ȘI TRATAMENTUL TERMIC AL UNOR ALIAJE DE ALUMINIU SPECIALE DESTINATE INDUSTRIEI AERONAUTICE

BIBLIOGRAFIE

1. Siniavski, V.S. ș.a. -Korrozia I zaščita aliuminevîh splavov, Moskva, Metallurghia, 1979.
2. Melehov, R.K. -Korrozione rastrskivanie titanovîh i aliuminevîh splavov, Kiev, Tehnica, 1979.
3. Goner, H., Marx, S. -Aluminium Handbuch, Berlin, VEB Verlag Technik, 1971.
4. Kolpașnikov, A. I. -Prokatka listov iz legkih splavov, Izdztelistov Metallurghia, Moskva, 1970.
5. Herwing N., ș.a. -Aluminievîe splavî, 13-e izdanie, Moskva, Metallurghia, 1979.
6. Fridliander, I. N. -Vîsokoprocînîe deformiruemîe aluminievîe splavî, Oboronghiz, Moskva, 1960.
7. Develay, R. -Progrésse métallurgiques recentes dans les alliages de l' aluminium corroyés, in: Revue de l' aluminium, France, nr. 493, martie, 1980, p.137-159.
8. Gerhard, R. -Selbstdiffusion in Edelmetallen unter hydrostatischen Druck, Stuttgart, 1980.
9. Mondolfo, L. F. -Struktura I svoistva aliminievîh splavov, Moskva, Metallurghia, 1979.
10. Akademia Nauk S.S.S.R. -Zașcitnîe pokrîtia na metallah, Kiev, Naukova Dumka, 1980.
11. Fridliandler, I. N. -Aluminievîe deformiruemîe konstrukționîe splavî, Moskva, Metallurghia, 1979.
12. Jonson, W., Mellor, P. -Teoria plasticinosti dlia injenerov, Moskva, Mașinostroenie, 1979.
13. Adrian, M. -Tehnologia laminării, Editura tehnică, București, 1977.
14. Drăgan, I. ș.a. -Tehnologia deformărilor plastice, Editura didactică și pedagogică, București, 1979.
15. Cazimirovici, E. -Teoria deformării plastice, Editura didactică și pedagogică, București, 1981.
16. Rădulescu, M. ș.a. -Utilaje de laminoare, Editura tehnică, București, 1979.

17. Katchanov, L. - Elements de la theorie de la plasticité, Edition MIR, Moskou, 1975.
18. Poluhin, V. -Simulation mathematiques et calcul sur ordinateur des laminoirs á toles, Edition MIR, Moscou, 1975.
19. Poluhin, V. ş.a. -Resistance des metaux et des alliages á la deformation plastique, Edition MIR, Moscou, 1980.
20. Carl, W. Dickenmessgeräte mit Radionucliden zur Banddickenregelung an Kltwalzwerken. In: Bänder Bleche Rohre, Düsseldorf, nr. 4, 15, 1974.
21. xxx Fröhling stellt neues 12-Rollen Reversier Walzgerüst vor. In: Bender Bleche Rohre 12, 1974.
22. Telikov, A. I., Ziuzin, V. I. - Modern developement of rolling mills, MIR Publishers, Moskow, 1975.
23. Groupe Pechiney -L ' Aluminium, vol. 1; 2, Edition Eyrolles, Paris, 1964.
24. Smiriaghin, A. E. -Obrabotka tvetnîh metallov I splavov, Spravocinik, Moskva, Metallurghizdat, 1961.
25. A.S.M. -Metals Hadbook, American Society for Metals, Ohio, 1961.
26. Van Horn -Aluminium, vol. 1; 2; 3, American Society for Metals, Ohio, 1968.
27. Galanty, A. -Kierunki rozvoju walcownictwa aluminium. In: Rudy I Metale Niezelazne, Polonia, nr. 11, 1977, p. 639-641.
28. Groza, I. ş.a. -Deformarea plastică a metalelor şi aliajelor neferoase, Editura tehnică, Bucureşti, 1977.
29. Kurt L., Helmut S. -Strangpressen, Aluminium Verlag GmbH Düsseldorf, 1976.
30. Ermanok, M.Z., ş.a. -Pressovanie trub iz aliuminievîh splavov, Metallurghia, Moskva, 1976.
31. Adie, J.F., Harper, S. -Hydrostatisches Strangpressen. In: Zeitschrift für Metallkunde, RFG, 62, 1971, p. 343 - 350.
32. Dorman, D. -Extrusion directe á froid. In: Formage et Traitements des Metaux, France, 41, 1973, p. 19-26.
33. Fiorentino, R. J. -Comparison of cold, warm and hot extrusion by conventional and hydrostatic methods. In: Metallurghia and Metal Forming, Anglia, nr. 2 1973. p. 52-60.
34. Lugosi, R., ş.a. -Hydrostatic extrusion-a modern technology, In: Metals Engineering quarterly, SUA, nr.3, 1973, p. 12-18.

35. Dettin, P. -Caratteristiche e tecnologia dell ' estrusione diretta mediante esplosivi delle leghe leggere In: Alluminio e nuova metallurgia, nr. 31 și 35, 1968, p. 395-408 și 447-454.
36. Zasadzinski, J., ș.a. -Rudi I metale niezelazne, Polonia, Nr. 10, 1980, p.457-461.
37. Kurt, L. -Isothermes Strangpressen. In: Zeitschrift für Metallkunde, nr. 9, 1960, p. 491-495.
38. Hiromasa, H. -The indirect extrusion of aluminium alloys. In: Light metal age, febr. 1975, p. 8-14.
39. Biswas,A.,Zilges,F.J -Direct, indirect und hydrostatisches Strangpressen, prospect Schloemann, 1973.
40. Stig Johnson -Fortschritte beim hydrostatischen Strangpressen. In: Draht-Welt, 54, nr. 4, 1969, p. 209-213.
41. Hornmark, N., Nilsson, J. - Hydrostatisches Strangpressen von Stahl und NE-metallen,Broschüre AQ 14-107T,ASEA,Schweden,1971.
42. xxx -Aluminium standards & data, The Aluminium Association, New-York, 1979.
43. Popescu, V. I. -Tehnologia forjării și extruziunii, Editura didactică și pedagogică, București, 1967.
44. Dulămiță, T., Florian, E. -Tratamente termice și termochimice, Editura didactică și pedagogică, București, 1982.
45. Sontea, S. ș.a. -Metale și aliaje neferoase de turnătorie, Editura Scrisul Românesc, Craiova, 1981.
46. Ienciu, M. ș.a. -Elaborarea și turnarea aliajelor neferoase, Editura didactică și pedagogică, București, 1982.
47. Geru, N. -Metalurgie fizică, Editura didactică și pedagogică, București, 1981.
48. Rostoker, W. ș.a. -Interpretation of Metallographic Structures, Academic Press, New-York, 1977.
49. xxx -Les traitements thermiques de l ' aluminium et de ses alliages. In:Revue de L ' Aluminium, France, nr. 406, p.334-354, nr. 407, p. 416-426; nr. 408, p.520-542; nr. 409, p. 615-618, 1972.
50. Suciu, M.V. - Proiectarea tehnologică a sectoarelor de laminare. Editura U.P.B., București, 1984.
51. Suciu, M.V. , ș.a. - Contribuții privind tragerea țevelor pe dop flotant. În rev. Metalurgia 34, nr. 2, 1982.

52. Cazimirovici, E., Suciu, M.V., ș.a. - Cercetări privind placarea aliajelor de aluminiu. În rev. Metalurgia 34, nr. 5, 1982.
53. Suciu, M.V., ș.a. - Determinarea modului de rigiditate a cajei de laminare. În rev. Metalurgia 34, nr. 10, 1982.
54. Suciu, M.V. - Obținerea semifabricatelor plate din aluminiu și aliaje de aluminiu prin metode neconvenționale. În rev. Metalurgia 35, nr. 5, 1983.
55. Suciu, M.V. - Considerații privind deformabilitatea aliajelor de aluminiu de înaltă rezistență. În rev. Metalurgia 36, nr. 9, 1984.
56. Chircă, D., Suciu, M.V., ș.a. - Cercetări privind modificarea proprietăților mecanice și electrice ale aliajelor AlMgSi în procesul de îmbătrânire naturală și artificială. În rev. Metalurgia 38, nr. 12, 1986.
57. Suciu, M.V. - Cercetări privind determinarea parametrilor optimi de tratament termomecanic în vederea îmbunătățirii caracteristicilor mecanice ale aliajelor Al-Zn-Mg-Cu, destinate industriei aerospațiale. În rev. Buletinul U.P. București - seria Metalurgie, 1985.
58. Zamfir, S., Suciu, M.V., ș.a. - Caracteristici structurale, tehnologice și de exploatare ale unor aliaje AlSiCuMgNi turnate și deformate plastic. În rev. Metalurgia 37, nr. 5, 1985.
59. Suciu, M.V. - Utilizarea experimentului programat pentru determinarea parametrilor optimi de tratament termomecanic în vederea îmbunătățirii caracteristicilor mecanice ale aliajelor Al-Zn-Mg-Cu, destinate industriei aeronautice. În rev. Noutăți în domeniul prelucrărilor la cald, vol. 2, Univ. Brașov, 1985.
60. Suciu, Valeria și Suciu, M.V. - Cercetări privind modificarea aliajelor de aluminiu destinate industriei aeronautice. În rev. Noutăți în domeniul prelucrărilor la cald, vol. 1, Brașov, 1987.
61. Chircă, D., Suciu, M.V., ș.a. - Cercetări privind efectul de modificare al unor adaosuri de microaliere asupra structurii aliajelor de aluminiu. În rev. Metalurgia 39, nr. 1, 1987.
62. Chircă, D., Suciu, M.V., ș.a. - Cercetări privind efectul încălzirii de scurtă durată după tratamentul termic de punere în soluție asupra proprietăților mecanice și electrice ale aliajelor AlMgSi deformate plastic la rece și îmbătrânite artificial. În rev. Metalurgia 39, nr. 3, 1987.
63. Taloi, D. - Optimizarea proceselor tehnologice-aplicații în metalurgie. Editura Academiei, București, 1987.

64. Taloi, D., ș.a. - Optimizarea proceselor metalurgice. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
65. Vermeșan, G. - Tratamente termice. Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1987.
66. Banabic, D., Dorr, I.R. - Modelarea proceselor de deformare plastică a tablelor metalice. Editura Transilvania Press, Cluj-Napoca, 1995.
67. Ienciu, M. ș.a. - Elaborarea și turnarea aliajelor neferoase speciale. Editura Didactică și Pedagogică, București 1985.
68. Geru, N. ș.a. - Analiza structurii materialelor metalice. Editura Tehnică, București, 1991.
69. Bunea, D. ș.a. - Studiul materialelor. Ed. U.P. București, 1993
70. Petrescu, N. ș.a. - Science des material, transformations et traitements. Ed. U.P. București, 1995.
71. Akademiia Nauk SSSR - Metalovedenie aliuminievîh splavov. Moskva Nauka 1985.
72. Dobatkin, V.I. ș.a. - Struktura i svoistva polifabricatov iz aliuminievîh splavov. Moskva Metallurgiiia, 1974.
73. Morris, J.G. - Thermomechanical Processing of Aluminium Alloys. The Metallurgical Society of AIME, USA, 1987.
74. Belov, A.F. ș.a. - Proizvodctvo polifabricatov iz aliuminievîh splavov. Moskva Metallurgiiia, 1985.
75. Kar, J. R. ș.a. - Aluminium - litium alloys. ASM International, Los Angeles, 1987.
76. Popescu, N. ș.a. - Tratamente termice neconvenționale. Editura Tehnică, București, 1990.
77. Petrescu, Maria ș.a. - Thermodynamics and Structure in Materials Science. Department of Engineering Sciences. Ed. P.U. Bucharest, 1996.
78. Gotlib, B.M. ș.a. - Osnovî statisticeskoi teorii obrabotki metallov davleniem. Moskva Metallurghiiia, 1989.
79. Wanhill, R.J.H. ș.a. - Thermomechanical treatment of aluminium alloys. In rev. Aluminium, nr. 9, 1988.
80. Popescu, O. ș.a. - Matematici aplicate în economie, vol. I și vol. II. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1993.
81. Săcuiu, I. ș.a. - Elemente de teoria probabilităților, Ed. ASE, București, 1991.
82. Udriște, C. - Algebră, geometrie și ecuații diferențiale. Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1993.
83. Rathbone, A. - Windows ' 95 For Dummies. Traducerea din limba engleză. Editura Teora, București, 1995.

84. Jones, G.E. - Excel for Windows ' 95 - quick and easy. Traducere din limba engleză. Editura All Educational. București, 1996.
85. Naisnith, S.J. - Encyclopedie dictionary of mathematics for engineers and applied scientists. Editura S.J.N, Oxford, 1986.
86. Baron, T. ș.a. - Statistică teoretică și economică. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1995.
87. Bădiță, M. ș.a. - Statistică. Editura Sylvi, București, 1993.
88. Hartley, J.R. - Aluminium benefits from materials revolution in the motor industry. In rev. Aluminium Today, vol 5, nr.6 1993.
89. Longmuir, A. Improving aluminium products and processes. In rev. Aluminium Today, vol. 6, nr. 3, 1994.
90. Clarke, J.E. - Coating sistem to boost aeroengine treatments. In rev. Aluminium Today, vol. 7, nr. 2, 1995.
91. Nistor, L. ș. a. - Modelarea formei secțiunii transversale a laminatului prin optimizarea puterii consumate în procesul de laminare pe principiul metodei de calcul variațional. În rev. Metalurgia nr. 5, 1995.
92. Zamfir, S. ș.a. - Comportarea la coroziune a unui aliaj Al-Mg-Si-Cu durificat prin precipitare cu dublă îmbătrânire. În rev. Metalurgia, nr. 6, 1995.
93. Abel, A. ș.a. - Ciclic plasticity behaviours of 2014 aluminium alloy under nonproportional loading. In rev. Revue de Métallurgie, nr. 2, 1996.
94. Owen, J. - Expansion plans for hard - alloy extrusions. In rev. Aluminium Today, vol. 8, nr. 4, 1996.
95. Legrand, B. Recent developments reviewed in European rolling sector. In rev. Aluminium Today, vol. 8, nr. 5, 1996.
96. Li, D.X. - Dislocations pile - up model of fatigue thresholds for 2024 - and 7075 - alike aluminium alloys. In rev. Aluminium Today, vol 7, nr. 6, 1995.
97. Sinclair, S. ș. a. - Modelling microstructural formation in two phase aluminium alloys after hot deformation. In rev. Materials science and technology, vol. 12, nr. 2, 1996.
98. Liu, G. ș. a. - Fatigue crack tip opening behavior in particulate reinforced Al - alloy composites. In rev. Acta materialia, vol. 44, nr. 1, 1996.
99. Järvsträt, N. ș. a. - A mechanical material model for aluminium extrusion during on - line, quenching. In rev. Journal of engineering materials and technology, vol. 118, nr. 1, 1996.
100. Osamura, K. ș.a. - Development of high - strenght aluminium alloys by Mesoscopic Structure Control. In rev. Journal of engineering materials and technology, vol. 118, nr. 2, 1996.

<http://www.marcelsuciu.lx.ro/>