

LAMINAREA MATERIALELOR METALICE SPECIALE

Partea a V-a:

BAZELE LAMINĂRII ALIAJELOR SPECIALE ALE UNOR METALE NEFEROASE UȘOARE

Capitolul 15	Laminarea aliajelor neferoase speciale cu bază de aluminiu.....	195
15.1	Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice ale metalului de bază...	196
15.2	Principalele proprietăți ale aliajelor speciale cu bază de aluminiu destinate laminării.....	201
15.3	Influența elementelor de aliere în aliajele speciale cu bază de aluminiu.....	209
15.4	Parametrii tehnologici de laminare a aliajelor speciale cu bază de aluminiu.....	213
15.5	Prelucrarea termomecanică a aliajelor speciale cu bază de aluminiu.....	220
Capitolul 16	Laminarea aliajelor neferoase speciale cu bază de magneziu...	225
16.1	Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice ale metalului de bază..	226
16.2	Principalele proprietăți ale aliajelor speciale cu bază de magneziu destinate laminării.....	227
16.3	Influența elementelor de aliere în aliajele speciale cu bază de magneziu.....	228
16.4	Parametrii tehnologici de laminare a aliajelor speciale cu bază de magneziu.....	230
Capitolul 17	Laminarea aliajelor neferoase speciale cu bază de titan.....	235
17.1	Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice ale metalului de bază..	236
17.2	Principalele proprietăți ale aliajelor speciale cu bază de titan destinate laminării.....	238
17.3	Influența elementelor de aliere în aliajele speciale cu bază de titan.....	242
17.4	Parametrii tehnologici de deformare a aliajelor speciale cu bază de titan.....	243
Bibliografie.....		253

Partea a V-a: **BAZELE LAMINĂRII ALIAJELOR SPECIALE ALE UNOR METALE NEFEROASE UȘOARE**

Capitolul 15

LAMINAREA ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE CU BAZĂ DE ALUMINIU

Proprietățile deosebite ale aluminiului și aliajelor de aluminiu (greutate specifică redusă, plasticitate mare, proprietăți mecanice foarte bune în cazul aliajelor, conductibilitate termică și electrică mare, rezistență bună la coroziune, aspectul deosebit de agreabil al produselor) au determinat extinderea folosirii produselor obținute prin deformare plastică în toate domeniile industriei și vieții moderne.

Industria transporturilor navale, aeriene și terestre, industria electrotehnică și electronică, industria ambalajelor, industria alimentară, arhitectură și construcții, industria chimică și textilă, industria bunurilor de consum reprezintă principalii consumatori ai semifabricatelor și produselor finite obținute prin deformare plastică din aluminiu și aliaje de aluminiu.

În domeniul aviației aliajele speciale de aluminiu de înaltă rezistență sau impus în mod deosebit prin greutatea specifică redusă, rezistența mare la oboseală, rezistență la temperatură, proprietăți magnetice și conductibilitate electrică bune. Aliat cu litiu, aluminiul își conservă proprietățile mecanice până la temperatura de 220°C, iar prin aliere cu cupru, mangan, zinc, titan și zirconiu, până la 255°C.

Utilizarea aluminiului și aliajelor speciale de aluminiu în construcția vagoanelor și a caroseriilor auto (camioane, izoterme etc.) a condus la reducerea substanțială a greutății acestora, concomitent cu creșterea capacității utile de transport. În construirea vagoanelor pentru metrouri, aliajele speciale de aluminiu sunt folosite pe scară largă ca urmare a specificului acestui trafic caracterizat prin demaraje frecvente și accelerații mari.

Conductibilitatea electrică foarte bună (61% din cea a cuprului) alături de greutatea specifică de peste trei ori mai mică decât a cuprului, fac din aluminiu înlocuitorul ideal al cuprului în domeniul electrotehnicii (cabluri electrice, bare de conexiuni, condensatori, radiatoare pentru piese electronice etc.).

Sub formă de table laminate sau profiluri extrudate, aceste aliaje sunt din ce în ce mai mult folosite în construcții, datorită aspectului decorativ deosebit prin forme și colorit divers și datorită rezistenței deosebite la agenții atmosferici. În industria chimică, folosirea aluminiului se explică prin rezistență la coroziune, conductibilitate termică ridicată și rezistență bună la temperaturi scăzute.

15.1. PROPRIETĂȚI FIZICO-MECANICE ȘI TEHNOLOGICE ALE METALULUI DE BAZĂ

Aluminiul aparține subgrupeii III A a sistemului periodic al elementelor. Este metalul cel mai răspândit în scoarța pământului constituind 7,5% din litosferă și, respectiv, 8,2% din rocile vulcanice, iar dintre toate elementele este al treilea ca răspândire, după oxigen și siliciu.

Temperatura de topire a aluminiului crește cu gradul de puritate; pentru aluminiul cu puritatea de 99,996% temperatura de topire este de 660,24°C, pentru aluminiul tehnic (99,2 %) este de 657°C, iar pentru aluminiul rafinat (99,9 %) este de 659,8°C.

Sistemul de cristalizare a aluminiului este cubic cu fețe centrate (C.F.C.); până la topire (660°C) nu prezintă nici o transformare alotropică. Parametrul de rețea are valoarea $a = 4,04958 \text{ \AA}$ și se micșorează cu scăderea purității (impuritățile produc contracția rețelei).

Greutatea specifică a aluminiului prezintă interes în tehnică datorită valorilor mici. Aceasta crește de la 2,6989 g/cm³ pentru puritatea de 99,996 %, la 2,71 g/cm³ pentru puritatea 99,000 %. Pentru o anumită valoare a purității, greutatea specifică scade cu creșterea temperaturii. De exemplu, pentru puritatea de 99,75%, greutatea specifică scade cu temperatura de la 2,705 g/cm³ la 20°C, la 2,55 g/cm³ la 660°C și, de asemenea, scade la trecerea în stare de ecruisare cu circa 0,13 %.

Coeficientul de dilatare liniară, la temperatura ambiantă, are valoarea de $23,4 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ și variază neesențial cu gradul de puritate.

Conductibilitatea termică scade cu creșterea purității și crește cu creșterea temperaturii. Pentru aluminiul de puritate 99,996 % conductibilitatea electrică λ are valoarea de 237 W/m·K la temperatura de 100°C. Aluminiul de puritate 99,99 %, la temperatura de 100°C are conductibilitatea de 217 W/m·K, iar la temperatura de 500°C are conductibilitatea de 209 W/m·K.

Căldura masică, la temperatura ambiantă, este $C = 24,37 \text{ J/mol} \cdot \text{grad}$, respectiv $C = 0,215 \text{ cal/g} \cdot \text{grad}$, iar la anumite temperaturi se determină cu relația:

$$C = 20,68 + 12,39 \cdot 10^{-3} \cdot T \text{ [J / mol} \cdot \text{grad]} \quad (15.1)$$

Rezistivitatea electrică a aluminiului variază sensibil în funcție de gradul de puritate, de starea materialului (turnat, ecruisat, recopt) și în funcție de structură și de temperatură.

Astfel, rezistivitatea scade cu creșterea purității, de exemplu de la 2,992 $\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ pentru puritatea de 99,000 %, la 2,63 $\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ pentru puritatea de 99,996 %, crește cu creșterea temperaturii de la 2,63 $\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ la 20°C, la 9,774 $\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ la 600°C, iar cu gradul de ecruisare ε creșterea de rezistivitate $\Delta\rho$ are valoarea 0,005 $\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ la $\varepsilon = 60 \%$ și $\Delta\rho = 0,023 \Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ la $\varepsilon = 90$. Principalele proprietăți fizice ale aluminiului sunt prezentate în tabelul 15.1.

Proprietățile mecanice ale aluminiului variază mult cu gradul de puritate, cu natura și conținutul impurităților, precum și cu prelucrarea plastică și termică.

Tabelul 15.1

Proprietățile fizice ale aluminiului

Nr. crt.	Proprietatea	Unitatea de măsură	Valoarea
1.	Numărul atomic	-	13
2.	Masa atomică	-	26,9815
3.	Volumul atomic(20°C)	cm ³ /atom · g	10,0
4.	Configurație electronică	-	[Ne] 3s ² p ¹
5.	Rețeaua cristalină	-	c . f . c
6.	Parametrul rețelei (20°C)	Å	4,0414
7.	Densitatea (20°C)	kg·dm ⁻³	2,7
8.	Temperatura de topire	°C	660,2
9.	Temperatura de fierbere	°C	2450
10.	Căldura specifică (20°C)	J/kg · k	859,5
		(cal/g · grd)	(0,214)
11.	Conductibilitatea termică	W/mK	225,2
		(cal/,cm·grd·s)	(0,538)
12.	Coeficientul de dilatare termică liniară (25°C)	grd ⁻¹	23,4·10 ⁻⁶
13.	Rezistivitatea electrică (0°C)	Ohm·m	2,63·10 ⁻⁸

Rezistența la rupere R_m și limita de curgere R_{p02} scad cu creșterea temperaturii și a purității aluminiului, iar alungirea A_5 crește cu temperatura.

Variația caracteristicilor mecanice ale aluminiului în funcție de gradul de puritate se prezintă în tabelul 15.2 și în funcție de temperatură, în tabelul 15.3.

Tabelul 15.2

Variația proprietăților mecanice ale aluminiului în funcție de puritate

Simbolizare conform SR EN 573-3:1995	Rezistența la rupere, R_m [MPa]	Limita de curgere, R_{p02} [MPa]	Alungire relativă A_5 , [%]	Duritatea HB
EN AW - Al 99,7	60	15	20	18
EN AW - Al 99,5	65	20	20	20
EN AW - Al 99,0	75	25	20	23

Tabelul 15.3

Variația proprietăților mecanice ale aluminiului Al 99,5 laminat și recopt în funcție de temperatură

Temperatura [°C]	Rezistența la rupere, R_m [MPa]	Limita de curgere, R_{p02} [MPa]	Alungire relativă, A_5 [%]
150	60	20	55
200	40	15	65
250	30	12	75
300	20	10	80
350	15	7	85

Creșterea temperaturii de la 20°C la 350°C pentru Al 99,5 laminat și recopt produce scăderea rezistenței la tracțiune de la 65 MPa la 15 MPa și, respectiv, creșterea alungirii de la 20 % la 85 %.

Pentru aluminiul Al 99,996, la temperatura de 30°C și presiunea de un bar, modulul de elasticitate longitudinală al lui Young are valoarea $E = 72000$ MPa, iar modulul transversal are valoarea $G = 27000$ MPa. Valorile modulelor M scad cu creșterea temperaturii T și cresc cu presiunea p conform relației:

$$M = M_0 - a \cdot T = b \cdot p \quad (14.2)$$

în care M_0 este valoarea modulului la $T = 0^\circ\text{C}$ și $p = 1$ bar (fig.15.1).

Gradul de ecruisare influențează, de asemenea, valorile proprietăților mecanice (fig.15.2). De menționat că valorile proprietăților depind și de mărimea secțiunii produsului. Astfel, cu cât grosimea produsului este mai mare, proprietățile de rezistență sunt

mai scăzute ca urmare a nepătrunderii deformării cu aceeași valoare pe toată grosimea.

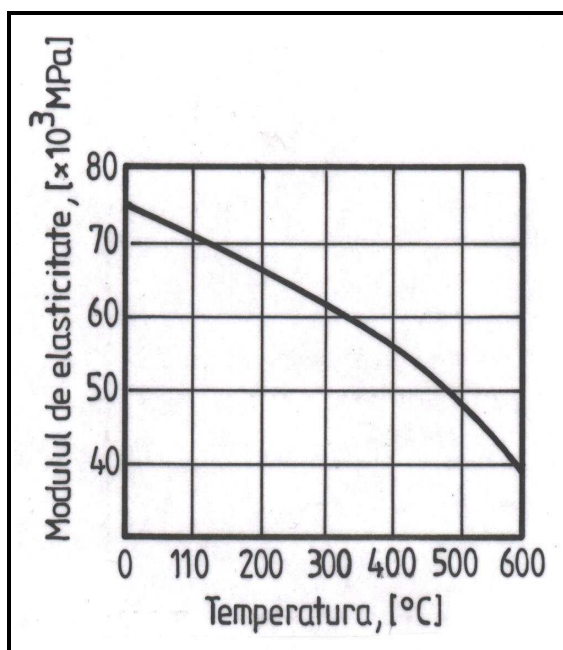


Fig.15.1. Modulul de elasticitate pentru Al 99,5 la temperaturi de 0...600°C.

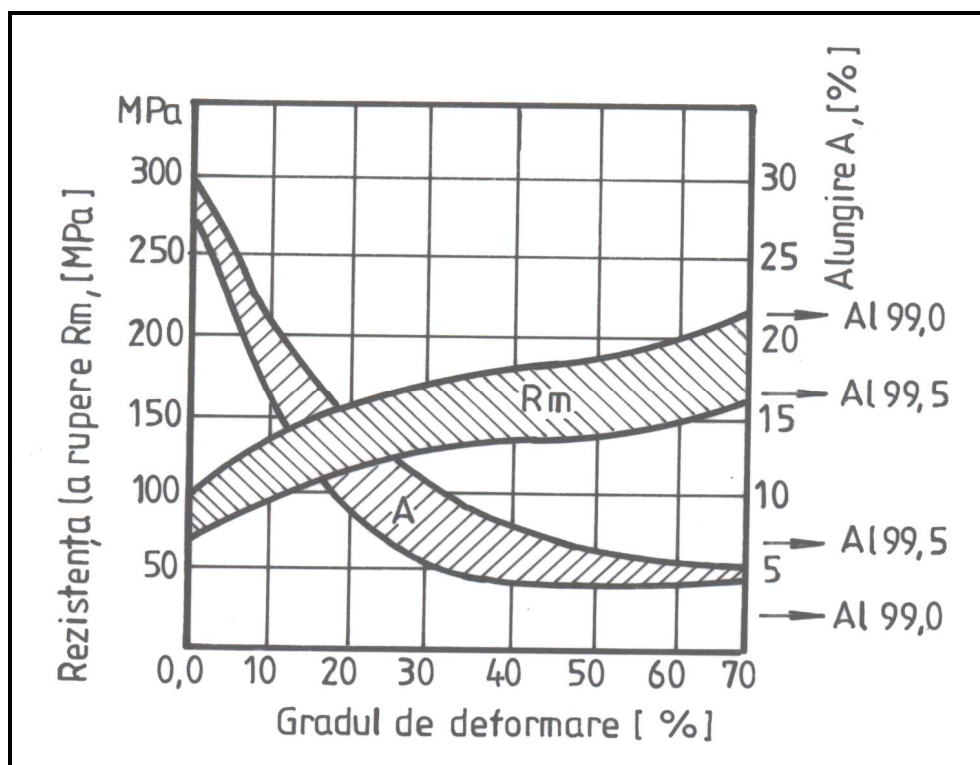


Fig. 15.2. Caracteristicile mecanice ale Al 99,0 și Al 99,5 în funcție de gradul de deformare.

Referitor la *proprietățile tehnologice* se precizează următoarele:

- plasticitatea aluminiului crește cu creșterea purității, dar chiar la aluminiul de puritate tehnică plasticitatea este încă foarte mare atingând valori

ale gradului de deformare la rece de peste 80 %, iar la cald plasticitatea este și mai ridicată;

- recristalizarea aluminiului depinde de puritatea și de gradul de ecruisare inițial al materialului.

Temperatura de începere a recristalizării variază de la temperatura ambiantă pentru Al 99,999, la 250...350°C pentru Al 99,5.

În funcție de temperatura de recoacere variază și proprietățile mecanice ale aluminiului. În figura 15.3 se prezintă aceste variații în cazul tablelor laminate cu grosimea de 2 mm din Al 99,5 și Al 99,0, iar în figura 15.4 se prezintă diagrama de recristalizare a Al 99,5.

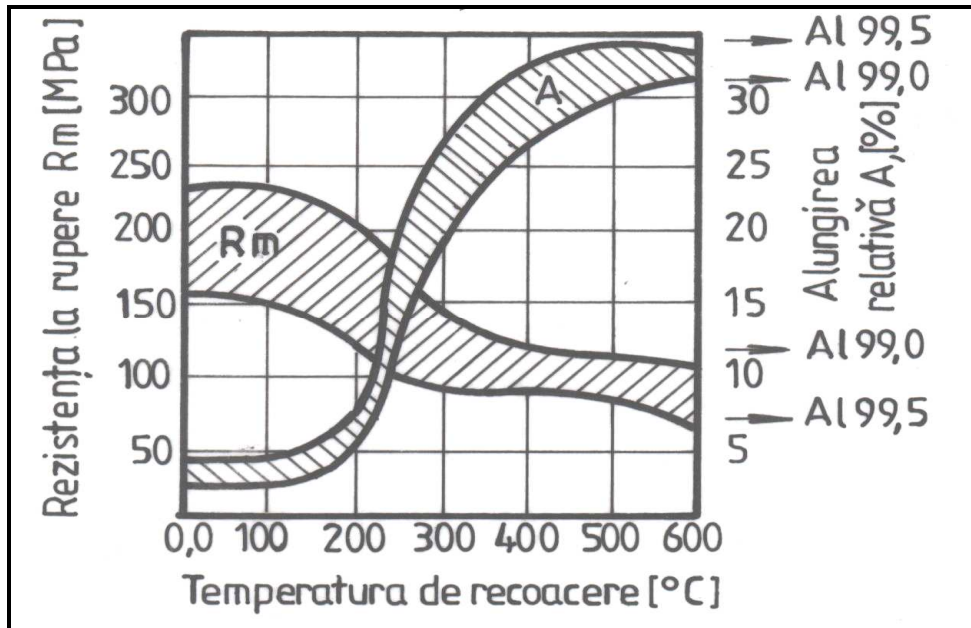


Fig. 15.3. Modificarea la recoacere a caracteristicilor mecanice ale tablelor cu grosimea de 2 mm din Al 99,5 și Al 99,0.

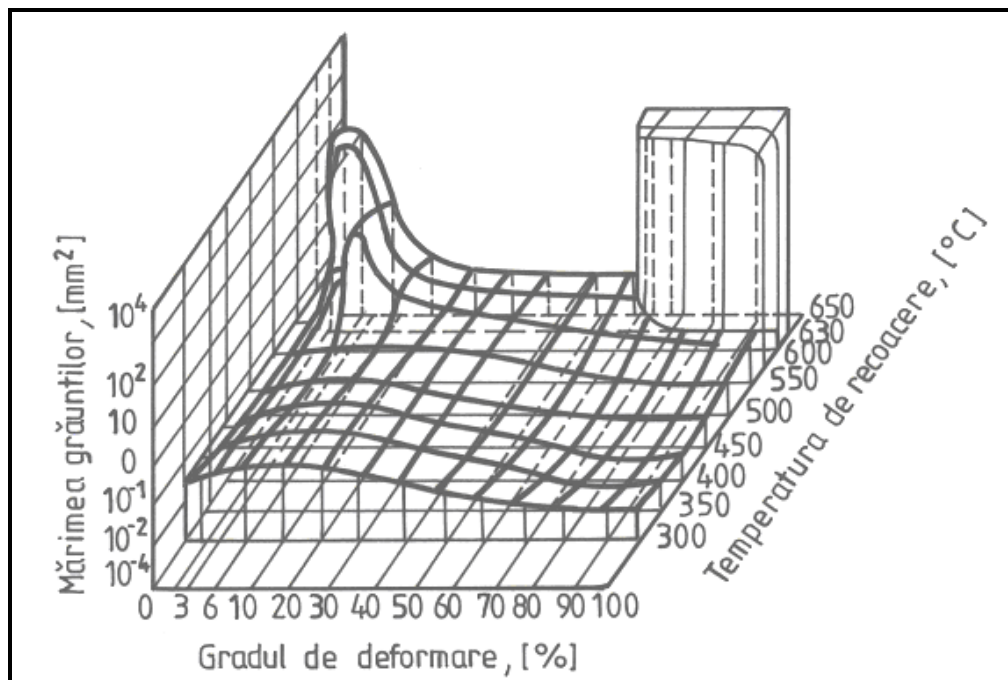


Fig. 15.4. Diagrama de recristalizare a aluminiului Al 99,5.

În diagrama de recristalizare a aluminiului Al 99,5 se remarcă următoarele zone:

- prezența unei zone cu creșteri mari a grăunților pentru temperaturi de 550°C și grade de ecrisare reduse (grade critice); pentru această zonă granulația rezultată este necorespunzătoare pentru prelucrarea ulterioară (apare aspectul de “coajă de portocală”);

- o altă zonă cu grade de ecrisare medii (15...70 %); aceasta generează o granulație fină, practic la orice temperatură;

- a treia zonă cu recristalizare grosolană, ca efect al recristalizării secundare care apare la temperaturi înalte, peste 600°C și grade de ecrisare de asemenea mari, de peste 70 %.

Se consideră structura foarte bună atunci când dimensiunile grăunților sunt de 45...80 μm , iar la granulații de peste 125 μm , structura este considerată necorespunzătoare.

Pentru aluminiul tehnic și pentru majoritatea aliajelor cu bază de aluminiu domeniul optim de temperatură pentru recoacerea de recristalizare este între 300 și 400°C (fig. 15.5).

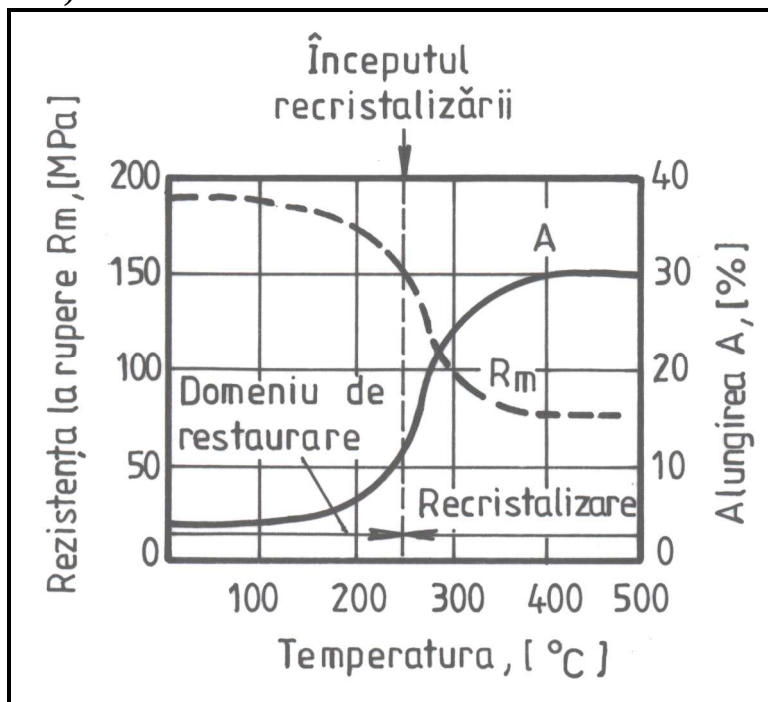


Fig. 15.5. Variația caracteristicilor mecanice ale Al 99,5 la încălzirea pentru recristalizare până la 500 °C.

Caracteristicile tehnologice principale ale aluminiului sunt:

- temperatura de turnare este de 710...730°C;
- temperatura de prelucrare la cald este de 350...450°C la care aluminiul recristalizează complet chiar la purități scăzute;
- temperatura de recoacere este de 350...400°C;
- plasticitatea este bună, permițând deformări care merg până la 90...98 % în funcție de gradul de puritate a aluminiului; datorită acestei capacități deosebite de deformare plastică aluminiul se poate lamina în folii subțiri până la grosimi de 4...5 μm .

15.2. PRINCIPALELE PROPRIETĂȚI ALE ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE ALUMINIU DESTINATE LAMINĂRII

În afară de deformabilitatea la rece, care scade, proprietățile de rezistență ale aluminiului se îmbunătățesc substanțial prin adăugarea unor elemente de aliere în anumite limite, obținându-se astfel o gamă variată de aliaje deformabile ale căror caracteristici vor fi prezentate în continuare.

În funcție de concentrația elementelor de aliere și caracteristicile aliajelor de aluminiu, acestea se pot clasifica în:

- *aliaje cu magneziu* care conțin 0,45...2,8 % Mg, 0,15...1,6 % Mn și 0,2...0,6 % Cu pentru aliajele din grupele Al-Mg și Al-Mn, aliaje deformabile moi sau plastice cu $R_m = 100...300$ MPa și $A = 10...20$ %;

- *aliaje cu cupru* care conțin 1,8...5,2 % Cu; 0,4...1,8 % Mg; 0,3...1,0 % Mn și diferite adausuri de Ni, Fe și Si, aliaje considerate cu duritate și plasticitate medie ($R_m = 240...480$ MPa și $A = 12$ %);

- *aliaje cu zinc* care conțin 6...8,6 % Zn; 1,7...4,8 % Cu; 0,4 ... 3,2 % Mg; 0,2...1,0 % Mn și mici adausuri de Cr (0,1...0,25 %), aliaje considerate cu duritate ridicată și plasticitate scăzută ($R_m = 450...700$ MPa, $A = 5...10$ %, acestea fiind proprietăți similare cu ale unor oțeluri, v. figura 11.5).

În aliajele de aluminiu deformabile elementele de aliere Mg, Si, Cu, Mn și Zn formează soluții solide cu aluminiul, îmbunătățindu-i substanțial tenacitatea.

Când conținutul elementelor de aliere este scăzut, soluțiile solide obținute sunt stabile la orice temperatură, iar creșterea caracteristicilor mecanice este moderată. La procente mai ridicate ale elementelor de aliere, soluțiile solide obținute sunt metastabile la temperatura ambiantă și, în consecință, aliajele pot fi durificabile structural prin precipitarea din soluția solidă a unor compuși care conduce la o creștere importantă a rezistenței aliajului, dar în detrimentul plasticității care scade.

Rezultă deci că aliajele de aluminiu se pot clasifica și din acest punct de vedere în aliaje durificabile și nedurificabile prin tratamente termice (călire+revenire).

Din grupa aliajelor *nedurificabile prin tratament termic* fac parte aliajele din sistemele Al-Mn; Al-Mg și Al-Mn-Mg. Pentru aceste aliaje tipul de diagrame de echilibru caracteristic este dat în figura 15.6, iar punctelor A și B le corespund temperaturile și concentrațiile prezentate în tabelul 15.4. Din grupa aliajelor *durificabile prin tratament termic* reprezentantul

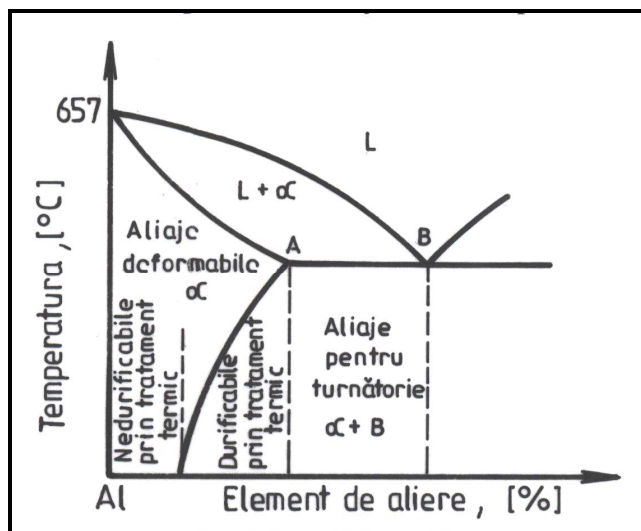


Fig. 15.6. Diagrama de echilibru caracteristică aliajelor Al-Mg și Al-Mn.

tipic este *aliajul Al-Cu cu circa 4...4,5% Cu*. Fenomenele care au loc la tratamentele termice ale acestui aliaj se regăsesc practic la toate aliajele de aluminiu durificabile prin tratament termic. Aceste aliaje (foarte rar doar binare Al-Cu) sunt cunoscute sub numele de *duraluminiu*, iar elementele componente formează compuși solubili la încălzire, ca de exemplu Cu Al₂, Al₂CuMg, Mg₂Si și compuși insolubili de Fe și Mn, cum sunt (Mn, Fe) Al₆ și Al₇Cu₂Fe.

Tabelul 15.4

Temperaturile și concentrațiile corespunzătoare punctelor A și B

Sistemul	Punctul A		Punctul B	
	Concentrația (%)	Temperatura (°C)	Concentrația (%)	Temperatura (°C)
Al - Mn	1,82	658	1,95	658
Al - Mg	17,4	450	35,0	450

În stare recoaptă duraluminiul este format din soluție solidă și compuși sub formă de precipitate secundare. La încălzire (la circa 500°C) CuAl₂ și Mg₂Si se dizolvă în aluminiu, iar compușii de Mn și Fe nu se dizolvă. Prin călire de la această temperatură aliajul va consta din soluție solidă suprasaturată și compuși de Fe și Mn.

În tabelul 15.5 se prezintă compoziția chimică a aliajelor de aluminiu deformabile și a celor de turnătorie.

Din cele peste douăzeci de elemente care se pot găsi în aliajele de aluminiu nici unul nu se dizolvă complet în soluția solidă de aluminiu. Unele dintre elementele de aliere se dizolvă în măsură suficient de mare în soluția solidă de aluminiu, dar odată cu micșorarea temperaturii solubilitatea lor scade, ceea ce permite supunerea aliajelor de aluminiu tratamentelor termice de călire și îmbătrânire. În această categorie de elemente de aliere intră Cu, Mg, Si, Zn, Ag, Ge și Li, care durifică aluminiul prin formarea unor soluții solide dure.

Aluminiul se aliază ușor și cu alte elemente ca Br, Cr, Fe, Mn, Ni, Ti și Zr formând faze puțin solubile sau complet insolubile în matricea de aluminiu. Aceste faze pot mări rezistența și duritatea aliajului la temperaturi ridicate micșorează granulația dar, în același timp, micșorează și plasticitatea. Alte elemente ca Bi, Cd, Pb și Tl au solubilitatea limitată în aluminiu în stare topită și produc îmbunătățirea prelucrabilității prin aşchiere.

Unele elemente de aliere influențează asupra formei și dimensiunilor componentelor structurali, astfel încât acționează asupra proprietăților aliajelor.

Astfel, calciul și sodiul precum și alte metale alcaline modifică concentrația siliciului în aliajele hipoeutectice Al-Si, iar fosforul micșorează conținutul de siliciu în aliajele hipereutectice Al-Si. Beriliul se introduce în aliajele de aluminiu pentru micșorarea oxidării aluminiului în stare lichidă.

În funcție de principalele elemente de aliere, conform standardului european adoptat ca standard românesc SR EN 573-3:1995, aliajele de aluminiu se împart în mai multe sisteme sau serii de aliaje. Simbolizarea acestora se face în două moduri și anume simbolizare numerică cu patru cifre și, respectiv, cea bazată pe simboluri chimice.

Aliaje cu bază de aluminiu deformabile conform SR EN 573-3:1995 și aliaje de turnătorie **Tabelul 15.5**

Nr. crt.	Clasa	Marca	Compoziția chimică (elementele principale de aliere, în %, restul aluminiu și impurități)								
			Mn	Mg	Cu	Si	Zn	Cr	Fe	Ni	Ti
1.	Nedurificabile prin tratament termic	AlMn 1 (3103)	0,9...1,5	max 0,3	max 0,1	max 0,5	max 0,2	0,1	0,7	-	-
2.		AlMn1Mg1 (3004)	1,0...1,5	0,8...1,3	max 0,25	max 0,3	max 0,2	-	0,7	-	-
3.		AlMg 1 (5005)	0,1...0,3	0,5...1,1	max 0,2	max 0,3	max 0,2	0,1	0,7	-	-
4.		AlMg 2 (5251)	0,1...0,5	1,7...2,4	max 0,15	max 0,4	max 0,1	0,15	0,5	-	-
5.	Tip dura- luminiiu	AlCu4SiMg (2014)	0,4...1,2	0,2...0,8	3,9...5,0	0,5...1,2	max 0,2	0,1	0,7	-	-
6.		AlCu4Mg1 (2024)	0,3...0,9	1,2...1,8	3,8...4,9	max. 0,5	max 0,1	0,1	0,5	-	-
7.	Aliaje AlMgSi	AlMgSi (6101)	max 0,03	0,35...0,8	0,1	0,3...0,7	max 0,1	0,03	0,5	-	-
8.	Durificabile prin tratament termic	AlZn6Mg2Cu (7012)	max 0,15	1,8...2,2	0,8...1,2	0,15	6...6,5	0,04	0,25	-	0,08
		AlZn5,5MgCu (7075)	max 0,30	2,1...2,9	1,2...2,2	0,40	5...6,1	0,28	0,50	-	0,20
		AlCu2Mg1,5Ni (2618)	max 0,25	1,2...1,8	1,8...2,7	0,15...0,2	0,15	-	1,4	1,4	0,10
		AlLi2,5Cu1,5Mg1 (8090)	max 0,10	0,6...1,3	1,0...1,6	max 0,20	max 0,2	0,1	0,3	-	0,10
10.	Aliaje Al - Cu	ATCu4Ti	-	-	4,0...5,0	-	-	-	-	-	0,05...0,35
11.		ATCu4Si	-	-	4,0...5,0	0,8...1,2	-	-	-	-	-
12.		ATCu8	-	-	7,0...8,5	-	-	-	-	-	-
13.		ATCu10Mg	-	0,15 - 0,35	9,0...11,0	-	-	-	-	-	-
14.	Aliaje Al - Si (siluminuri)	ATSi2Mg	0,6...0,8	0,5...0,8	-	1,8...2,3	-	-	-	-	-
15.		ATSi6Cu4	0,2...0,6	-	3,0...5,0	5,0...7,0	-	-	-	-	-
16.		ATSi12	0,2...0,5	-	-	11,0...13,5	-	-	-	-	-
17.		ATSi12MgFe	0,2...0,5	0,2...0,5	-	11,0...13,5	-	-	-	-	-
18.	Aliaje Al - Mg	ATSi12CuMgNi	0,2...0,5	0,8...1,5	0,8...1,5	11,0...13,5	-	-	-	1,3	0,1...0,2
19.		ATMg3Si	0,3...0,6	2,0...4,5	-	0,9...1,3	-	-	-	-	0,05...0,2
20.		ATMg6	0,2...0,4	5,0...7,0	-	-	-	-	-	-	-
21.		ATMg10	0,2...0,5	8,5...10,5	-	-	-	-	-	-	0,05...0,2
22.	Aliaje Al - Zn	ATZn5Mg	-	0,4...0,7	0,15...0,35	-	-	0,15...	-	-	0,1...0,3
23.		ATZn10Si7	-	0,1...0,3	-	6,0...8,0	4,5...6,0 7,0...12,0	0,4	-	-	-
24.	Rezistente la cald	ATCu4Ni2Mg2	-	1,2...1,8	3,5...4,5	-	-	-	-	2,3	-

Se preferă utilizarea sistemului internațional cu patru cifre, simbolizările bazate pe simboluri chimice fiind indicate numai pentru referințe.

Principalele serii, respectiv, sisteme standardizate de aliaje de aluminiu deformabile sunt prezentate în continuare.

a) *seria 1 000 : aluminiul*, este caracterizată de o matrice metalică, practic fără impurități, iar impuritățile care totuși apar într-o concentrație foarte mică sunt Si și Fe, a căror distribuție depinde de tipul și gradul de deformare .

b) *seria 2 000 : sistemul Al-Cu (-Mg)*, conține cuprul ca principal element de aliere, iar în microstructura aliajului apar faze bogate în cupru cum sunt CuAl_2 și CuMgAl_2 (dacă aliajul are și Mg); prin încălzire acești compuși se dizolvă în matricea de aluminiu, iar cantitatea lor va da măsura eficacității procesului de călire;

c) *seria 3 000 : sistemul Al-Mn*, conține manganul ca principal element de aliere care formează fazele MnAl_6 și $\text{Mn}_3\text{SiAl}_{12}$ (dacă aliajul are și Si) întinse în spațiul intergranular sau sub forma unei dispersii fine în masa aliajului;

d) *seria 4 000 : sistemul Al-Si*, conține soluție solidă și particule de siliciu aproape pur cu aspect aciform, sfericoidal sau sub forma unor plăcuțe; la forma, dimensiunile și repartizarea acestor particule influențează puternic regimul de turnare și temperatura de prelucrare;

e) *seria 5 000 : sistemul Al-Mg*, conține magneziul ca element principal de aliere, se găsește în soluția solidă dizolvat, iar în unele cazuri apare și faza Mg_2Al sub forma unor particule mari insolubile sau particule mici separate, formate în procesul răcirii lente sau prin recoacere. În prezența siliciului în aliaj se formează și faza Mg_2Si , iar în aliajele cu crom și mangan se formează particule mari de compuși cu Cr și Mg;

f) *seria 6 000 : sistemul Al-Mg-Si*, conține magneziu și siliciu sub forma compușilor Mn_2Si ușor solubili prin încălzire înainte de călire. Dacă conținutul de siliciu este mai mare decât cel necesar formării compusului Mg_2Si apar și particule de siliciu pur;

g) *seria 7 000 : sistemul Al-Zn(-Mg-Cu)*, reprezintă aliajele sistemelor Al-Zn-Mg și Al-Zn-Mg-Cu. Elementele de aliere din aceste sisteme se găsesc dizolvate în soluția solidă sau se găsesc sub forma unor particule foarte fine dispersate. În unele aliaje se formează faze separate care conțin Cr și dispersii de Cr. De asemenea se găsesc și particule de compus Mg_2Si într-o cantitate proporțională cu concentrația siliciului în aliaj.

Caracteristicile mecanice ale principalelor aliaje de aluminiu speciale, de înaltă rezistență mecanică, utilizate în domenii de vârf ale tehnicii sunt prezentate în tabelul 15.6. Aceste caracteristici variază în funcție de mai mulți *factori* dintre care cei mai importanți sunt compoziția chimică și starea structurală, gradul de deformare și direcția de curgere a materialului metalic în procesul de deformare plastică precum și de tratamentele termice aplicate.

În ceea ce privește influența elementelor de aliere s-a constatat că în aliajele binare Al-Cu cu 2...5 % Cu și Al-Zn cu 3...7 % Zn, magneziul ridică sensibil caracteristicile mecanice datorită formării compușilor intermetalici sub formă de particule precipitate, repartizate uniform în soluția de bază. În figura 15.7 se prezintă caracteristicile mecanice ale aliajelor speciale Al-Zn-Mg-Cu

de înaltă rezistență mecanică a căror conținut în zinc variază între 2 și 5 % și a căror conținut în magneziu atinge valoarea de 5 %; conținutul în zinc și magneziu determină nu numai cantitatea de fază durificatoare ci și viteza critică de călire a aliajului și, prin urmare și autocălibilitatea și sensibilitatea la tratamentul de îmbătrânire artificială.

Tabelul 15.6

Proprietăți mecanice ale unor aliaje speciale de aluminiu laminate

Aliajul	Starea de livrare	Rezistența la rupere MPa	Limita de curgere MPa	Alungirea relativă h=1,6 ϕ =1,2 %	Rezistența la forfecare MPa	Rezistența la oboseală MPa
2014	0	186	97	- 18	125	90
	T4	425	290	- 20	260	140
	T6	485	415	- 13	290	125
2014 P*	0	170	69	21 -	125	-
	T3	435	275	20 -	255	-
	T4	420	255	22 -	256	-
	T6	470	415	10 -	285	-
2024	0	175	76	20 22	125	90
	T3	485	345	18 -	285	140
	T4, T351	470	325	20 19	285	140
	T361	495	395	13 -	290	125
2024 P	0	180	76	20 -	125	-
	T4, T351	440	290	19 -	275	-
	T361	460	365	11 -	285	-
	T81, T851	450	415	5 -	275	-
	T861	485	456	6 -	290	-
2124	T851	490	440	9,4 -	-	-
7075	0	230	105	17 -	150	-
	T6, T651	570	505	11 -	330	160
	T73	505	435	13 -	-	-
7075 P	0	220	96	17 -	150	-
	T6, T651	525	460	11	315	-

* P - aliaj placat.

Aliajele relativ bogate în zinc și magneziu prezintă caracteristici mecanice ridicate după punerea în soluție, călire în apă și îmbătrânire artificială (fig.15.7c) dar dacă tratamentul de călire se efectuează în aer, caracteristicile sunt considerabil mai scăzute (fig.15.7 b); la călirea în aer și îmbătrânire artificială caracteristicile rămân relativ apropiate de acelea ale aliajelor mai puțin bogate în zinc și magneziu (fig.15.7 a).

Obținerea unei structuri fine și omogene este o garanție a calității, în special din punctul de vedere al plasticității și rezilienței.

Cu scopul evitării unei structuri grosiere, în practică se urmărește să se obțină fie o structură recristalizată cu grăunți fini, fie o structură nerecristalizată, fibroasă (restaurată).

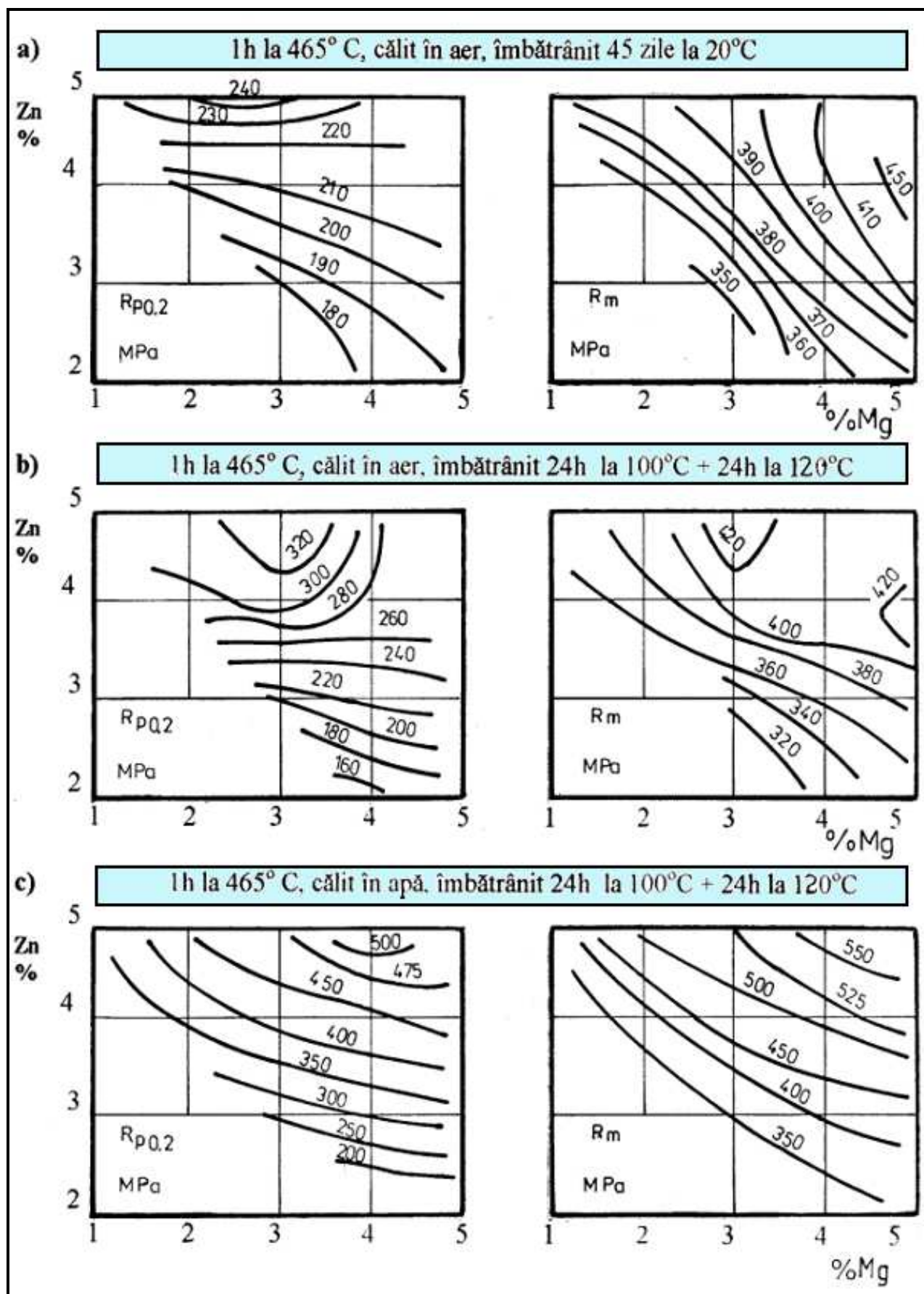
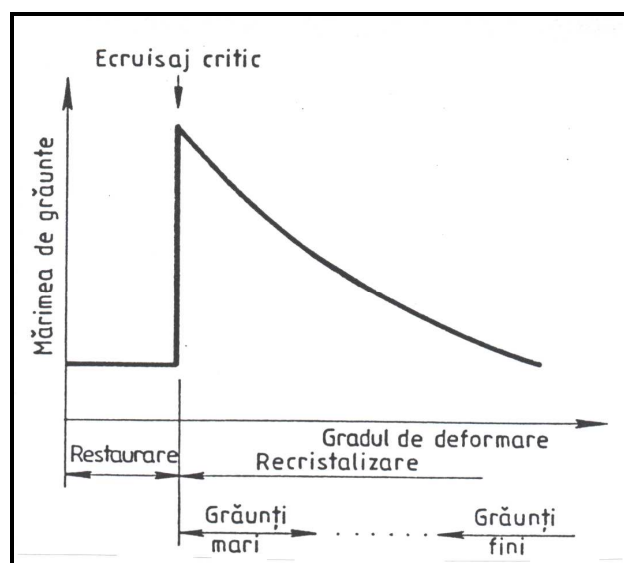


Fig. 15.7. Curbele de egală rezistență în funcție de conținutul în Zn și Mg al aliajelor speciale Al-Zn-Mg-Cu:

a - călire în aer și îmbătrânire naturală; b - călire în aer și îmbătrânire artificială;
c - călire în apă și îmbătrânire artificială.

Reprezentarea clasică a mărimii de grăunte de recristalizare în funcție de gradul de deformare pentru o temperatură și durată de menținere date este prezentată schematic în figura 15.8.

Fig.15.8. Reprezentarea schematică a mărimii de grăunte în funcție de gradul de deformare.



Pentru evitarea recristalizării totale trebuie ca laminarea să se efectueze sub "ecruisajul critic" corespunzător aliajului considerat, la temperatura și durata de tratament pentru realizarea transformării la cald.

Pentru a se realiza o recristalizare cu grăunți fini trebuie, din contră, să se depășească "ecruisajul critic".

Pentru a se obține una din aceste două structuri se utilizează numeroase mijloace pe parcursul elaborării și prelucrării aliajelor considerate.

Aceste mijloace pot fi clasate, în general, în două grupe, în ceea ce privește compoziția aliajului și în ceea ce privește procesele de prelucrare. Tabelul 15.7 prezintă diferiți factori care influențează, de-a lungul elaborării și prelucrării aliajelor speciale de aluminiu, obținerea unei structuri fie nerecristalizate, fibroase, fie a unei structuri total recristalizate.

Tabelul 15.7

Factorii care influențează structura produselor laminate din aliaje speciale de aluminiu

Factorii care influențează formarea unei structuri	
nerecristalizate	recristalizate
Prezența elementelor Mn, Cr, Zr	Absența elementelor Mn, Cr, Zr
Absența omogenizării înaintea deformării sau omogenizarea la temperaturi joase	Omogenizarea la temperaturi ridicate
Încălzirea lingourilor în timp scurt și la temperaturi mari	Încălzirea lingourilor la temperaturi relativ joase
Temperatură ridicată de deformare	Temperatură scăzută de deformare
Viteză mare de deformație	Viteză mică de deformație
Grad de deformare scăzut	Grad de deformare ridicat

Gradul de reducere și direcția de curgere a materialului la laminare au o influență importantă în cazul produselor cu secțiune mare, secțiune care poate fi mai mult sau mai puțin apropiată de cea a lingoului turnat (tabelul 15.8).

Tabelul 15.8

Influența gradului de reducere și a direcției de prelevare a epruvetelor asupra proprietăților mecanice ale aliajului 2014 - T4.

Grad de reducere, %	Sens longitudinal			Sens transversal			Sens grosime		
	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A ₅ %	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A ₅ %	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A ₅ %
2	310	467	17	512	460	14	305	422	12
4	314	470	21	290	460	20	290	433	11
6	285	470	22	280	460	22	290	445	13
11	278	462	24	285	459	21	290	460	14

În sens transversal și longitudinal se observă o creștere a alungirii în funcție de gradul de reducere; în sensul grosimii din contră, alungirea este mai scăzută și crește foarte puțin cu creșterea gradului de reducere. În ceea ce privește rezistența la rupere, creșterea gradului de reducere are ca efect uniformizarea acesteia în toate direcțiile de prelevare.

Tratamentul termic de omogenizare a lingourilor înainte de laminare conferă, după punerea în soluție, călire și îmbătrânire, produse cu o structură recristalizată care se caracterizează prin limită de curgere și rezistență la rupere mai scăzute, dar cu alungire mai ridicată decât în cazul unei structuri nerecristalizate. În tabelul 15.9 se prezintă influența temperaturii de laminare și a tratamentului termic de omogenizare asupra caracteristicilor mecanice ale aliajului 2014.

Tabelul 15.9

Influența temperaturii de laminare asupra proprietăților mecanice ale aliajului 2014

Temperatura de laminare °C	Starea T4			Starea T6			Observații
	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A ₅ %	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A ₅ %	
320	230	430	24	340	450	18	Omogenizat la 505 °C / 24h
380	250	440	33	340	460	16	
440	280	500	18	420	530	12	
425	290	540	16	430	540	11	
320	240	440	21	350	460	15	Neomogenizat
380	330	510	16	390	510	14	
440	340	540	15	430	540	13	
475	340	550	15	440	540	13	

Produsele laminate din aliaje speciale de aluminiu, sunt supuse în serviciu la solicitări multidirecționale datorită faptului că prezintă o bună combinație între proprietățile de rezistență mecanică, plasticitate, tenacitate, rezistență la oboseală și la coroziune sub sarcină. Aceste proprietăți sunt bune cu preponderență în sens longitudinal, prezintă o substanțială scădere în sensul lățimii și au valori foarte scăzute în sensul grosimii laminatelor. Tratamentele termomecanice intermediare (TTMI) și finale (TTMF) urmăresc îmbunătățirea plasticității și rezilienței acestor aliaje, în special în sensul grosimii laminatului, fără scăderea rezistenței mecanice, comparativ cu procedeele convenționale.

15.3. INFLUENȚA ELEMENTELOR DE ALIERE ÎN ALIAJELE SPECIALE CU BAZĂ DE ALUMINIU

15.3.1. Influența elementelor de aliere asupra proprietăților mecanice și fizice ale aliajelor

Cuprul este principalul element de durificare a aliajelor speciale de aluminiu, ca urmare a formării compusului CuAl_2 . Concentrația cuprului în aliajele de tip duraluminu nu depășește în general 5%. Creșterea conținutului de cupru conduce la creșterea rezistenței mecanice, dar scade continuu plasticitatea și rezistența la coroziune a aliajului. Plasticitatea scade ca urmare a fragilității compusului CuAl_2 .

Magneziul este de asemenea un element de durificare a aliajelor de aluminiu prin formarea compusului Al_2Mg_3 , iar în prezența și a siliciului formează compusul Mg_2Si . Concentrația magneziului în aliajele de aluminiu deformabile este limitată la 2,5% deoarece peste această valoare plasticitatea aliajelor scade foarte mult. În general până la 1,4 % Mg aliajele nu se durifică prin tratament termic, iar la concentrații mai mari până la maximum 3%Mn aliajele se pot durifica prin tratament termic însă efectul de durificare este foarte mic. Magneziul mărește și rezistența la coroziune a aliajului.

Siliciul în aliajele deformabile de aluminiu se introduce într-o proporție de 0,5...1,2 %. La concentrații mai mari proprietățile mecanice ale aliajelor nu cresc simțitor însă plasticitatea scade foarte mult.

Zincul este unul dintre principalele elemente durificabile în aliajele de aluminiu speciale cu rezistența mecanică înaltă, prin formarea compusului Al_2Zn_3 care are un efect de durificare superior celorlalți compuși. Concentrația zincului în aliajele speciale de aluminiu deformabile este de 6...8%. Peste aceste valori creșterea concentrației de zinc nu se recomandă, ca urmare a scăderii foarte accentuată a plasticității și rezistenței la coroziune a aliajului.

Manganul se adaugă în aliajele de aluminiu mai ales pentru mărirea rezistenței la coroziune a acestora. Însă influența sa dăunătoare asupra plasticității limitează concentrația manganului la maxim 1,2%. Manganul are și rolul de a înlătura influența dăunătoare a fierului în aceste aliaje. De asemenea, manganul mărește temperatura de recristalizare a aliajelor de aluminiu și micșorează sensibilitatea la creștere a grăunților.

Nichelul se introduce în aliajele speciale de aluminiu până la concentrația de 2,5%, mărindu-le astfel refractaritatea dar aceasta, în detrimentul plasticității.

Cromul și titanul în aliajele de aluminiu ca și manganul măresc temperatura de recristalizare și micșorează sensibilitatea la creșterea grăunților. Concentrația acestor elemente este în general sub 1%.

O particularitate a aliajelor de aluminiu deformabile cu concentrații mari de elemente de aliere o reprezintă apariția tensiunilor suplimentare (remanente) în timpul proceselor de încălzire și răcire, datorită variațiilor de volum care apar la dizolvarea și, respectiv, precipitarea compușilor intermetalici CuAl_2 , Al_2Mg_3 , Al_2Zn_3 , Mg_2Si etc. Având în vedere că tensiunile suplimentare care apar sunt, în general, de tracțiune, atingerea limitei de plasticitate are loc la valori mai

reduse ale gradelor de deformare aplicate, respectiv plasticitatea acestor aliaje scade. Scăderea plasticității acestor aliaje complexe se datorează și neomogenității chimice existente în masa semifabricatelor.

Plasticitatea aliajelor de aluminiu este dependentă și de *concentrația gazelor* din aliaj existente în pori, sufluri sau sub formă de oxizi, nitruri, soluții solide cu anumite metale. În toate cazurile prezența gazelor produce micșorarea plasticității aliajelor. Concentrația de gaze din aliaj depinde atât de calitatea materialelor introduse la elaborare cât și de condițiile de topire și turnare a semifabricatelor. Dintre gazele existente în atmosfera cuptoarelor de topire sau încălzire, *hidrogenul* se găsește în cea mai mare proporție în aceste aliaje ca urmare a solubilității sale ridicate în aluminiu și aliajele sale. De asemenea, difuzia hidrogenului în aluminiu și aliajele sale este favorizată și de rolul de catalizator pe care îl are aluminiul în procesul de disociere a vaporilor de apă, prin care se produce hidrogen atomic cu putere de difuzie mult mai mare.

În ceea ce privește *oxigenul*, acesta se găsește în aluminiu și aliajele sale sub formă de incluziuni nemetalice de Al_2O_3 care, la o concentrație ridicată formează pelicule intergranulare, micșorând plasticitatea și producând și stratificarea materialului în timpul procesului de deformare.

Densitatea aliajelor de aluminiu este mărită de Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Ti și Zn, iar elemente ca Mg, Li și Si micșorează densitatea aliajelor (fig.15.9).

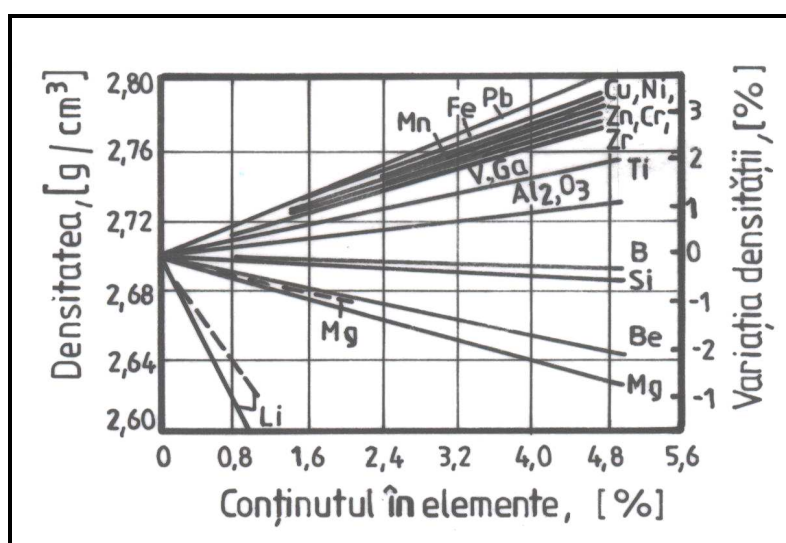


Fig. 15.9. Densitatea aliajelor binare cu bază de aluminiu:
 ——— date calculate; ---- rezultate experimentale.

Ca urmare a variației practic liniare a densității aliajului în funcție concentrația elementelor de aliere, se poate calcula *densitatea unui aliaj complex* prin însumarea variației de densitate corespunzătoare concentrației fiecărui element de aliere.

Dilatarea termică în funcție de concentrația elementelor de aliere, de asemenea are o variație practic liniară. Astfel, elemente de aliere ca Mg și Zn măresc coeficientul de dilatare, iar Ni, Fe, Cu, Si, Mn și Cr micșorează acest coeficient (fig.15.10).

Conductibilitatea electrică este micșorată de toate elementele de aliere ale aluminiului, cu atât mai mult dacă acestea se dizolvă în soluția solidă a aliajului.

Cea mai mare influență asupra scăderii conductibilității o are cromul apoi, în ordinea descrescătoare a influenței, urmează Mn, Fe, Si, Mg și Cu.

Modulul de elasticitate a aliajelor de aluminiu depinde, de asemenea, de compoziția aliajului. Influența elementelor de aliere se manifestă atunci când acestea formează compuși intermetalici cu aluminiul. Modulul de elasticitate al aliajelor cu bază de aluminiu, pentru condiții statice, crește pe măsură de concentrația de elemente ca Mn, Co, Be, Ni sau Si crește (fig.15.11), în timp ce unele elemente ca Mg, Zn, Si sau Cu micșorează modulul de elasticitate a aluminiului pentru condiții dinamice.

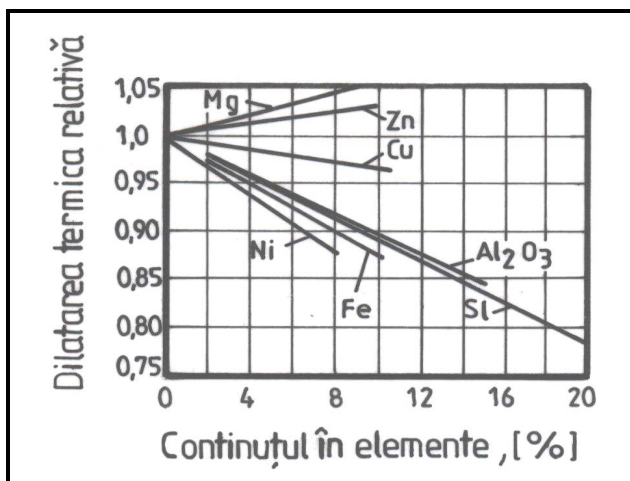


Fig.15.10. Influența elementelor de aliere la dilatarea termică a aluminiului Al 99,96.

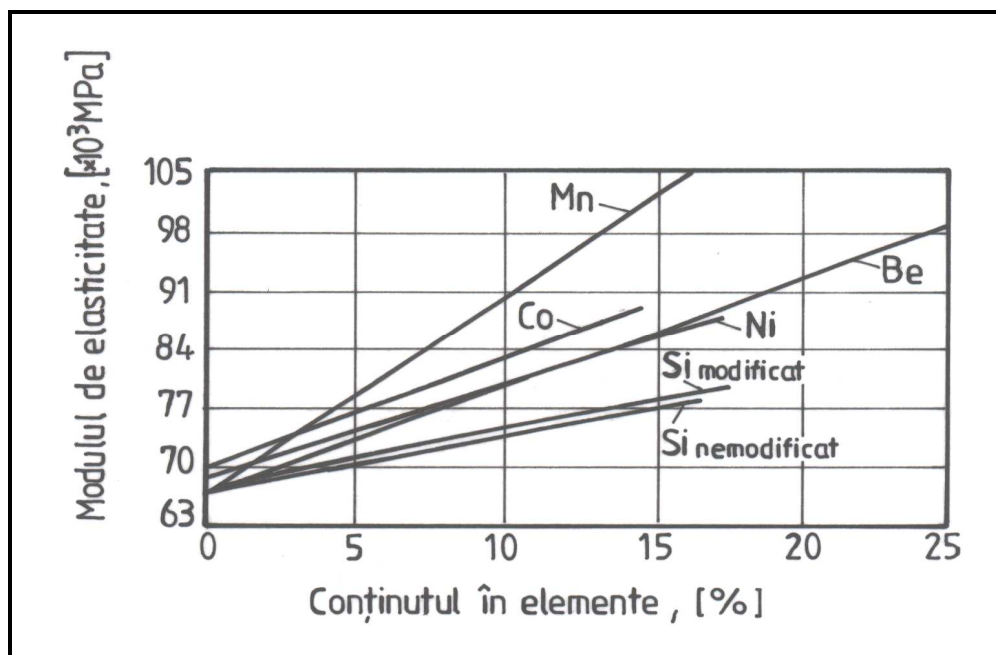


Fig. 15.11. Influența unor elemente de aliere asupra modulului de elasticitate a aluminiului.

15.3.2. Influența elementelor de aliere asupra deformabilității aliajelor speciale de aluminiu

Asupra deformabilității aliajelor speciale cu bază de aluminiu, pe lângă compoziția și structura acestora, influențează și starea în care se află aliajele respective (stare de turnare sau de deformare) cât și temperatura la care se desfășoară procesul de laminare .

În general, elementele de aliere durifică aluminiul și îi micșorează plasticitatea. Elementele de aliere care nu se dizolvă în soluția solidă, în mod

independent de influența lor asupra rezistenței mecanice a aliajului, produc micșorarea acestei proprietăți. Zincul, cuprul și magneziul provoacă micșorarea plasticității, dar în mod diferențiat și anume magneziul în măsură mai mare și zincul în măsură mai mică (fig.15.12 și 15.13).

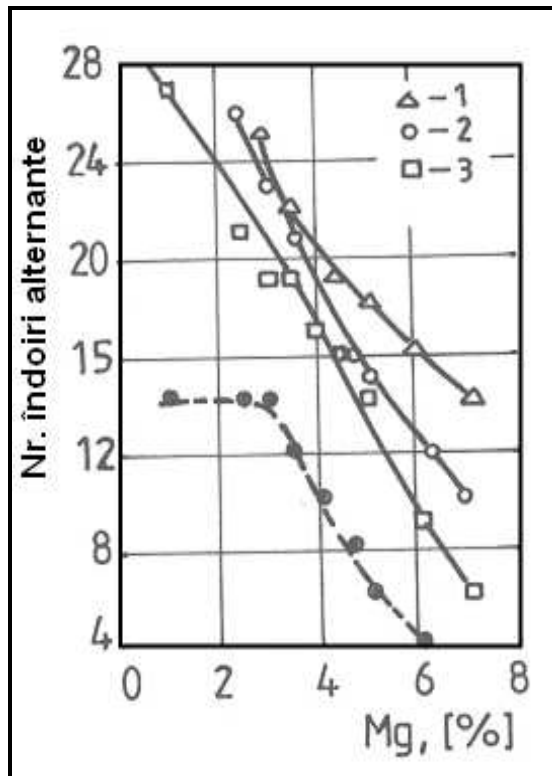


Fig.15.12. Influența conținutului de Mg și Mn asupra numărului de îndoiri alternante a tablelor cu grosimi de 1,6mm din aliaje de aluminiu:
1 - 0,1%Mn; 2 - 0,5%Mn; 3 - 0,9%Mn.
--- stare recoaptă; — stare ecruisată.

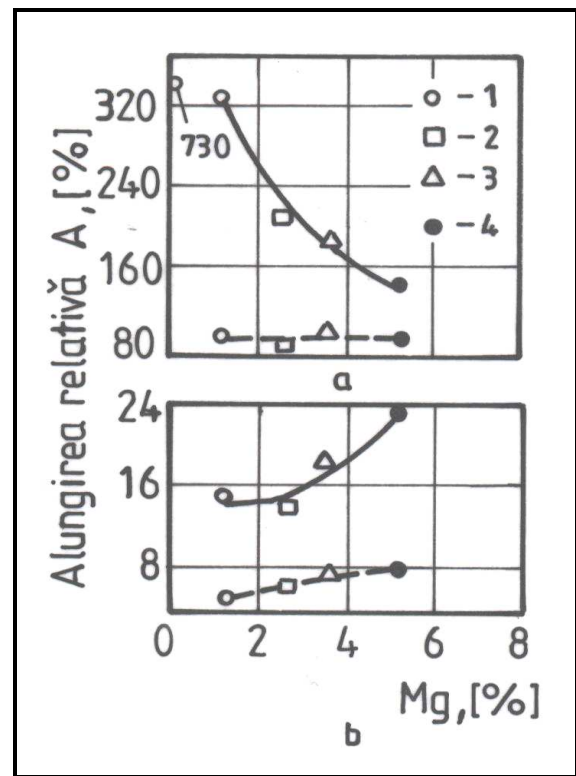


Fig.15.13. Influența conținutului de Mg în diferite aliaje Al-Mg (sârmă cu diametrul de 10 mm) asupra alungirii locale (a) și totale (b): 1 - aliaj 5050; 2 - aliaj 5052; 3 - aliaj 5154; 4 - aliaj 5056.
--- stare recoaptă; — stare ecruisată.

Cu toate că aluminiul și aliajele de aluminiu cu conținut redus de elemente de aliere se ecruesează relativ repede, acestea pot fi încă mult deformate, chiar în stare ecruisată, ceea ce se și practică în mod curent pentru mărirea rezistenței mecanice a produsului finit .

Scăderea numărului de îndoiri alternante, prin care se poate estima plasticitatea la rece a tablelor și sârmelor, direct proporțional cu creșterea rezistenței la rupere a materialului este însă independentă de faptul dacă durificarea a fost cauzată de gradul de aliere, de gradul de ecruisare sau de ambele cauze.

Finisarea granulației aliajelor speciale cu bază de aluminiu, ca rezultat al alierii cu *titan* sau *bor* poate îmbunătăți caracteristicile de plasticitate la oricare tip de aliaj.

În cazul aliajelor de aluminiu speciale, durificabile prin tratament termic, plasticitatea maximă se obține în cazul stării recoapte "O" a materialului, plasticitatea minimă se obține în cazul stării T₆ (călire urmată de îmbătrânire artificială), iar plasticitatea medie se obține în cazul stării T₄ (călire urmată de îmbătrânire naturală).

Aliajele care au fost supuse tratamentului de îmbătrânire naturală (la temperatura ambiantă) pot fi deformate la rece cu scopul măririi perioadei de timp în care aceste aliaje pot fi încă puternic prelucrate prin deformare plastică .

Aluminiul industrial și cel de puritate ridicată poate fi ușor deformat prin forjare, matrițare și laminare într-un interval larg de temperaturi. Alierea, în general, înrăutățește deformabilitatea aluminiului ca urmare a creșterii limitei de curgere și apariției fazelor insolubile care generează neomogenitate structurală în material. Creșterea limitei de curgere mărește corespunzător presiunea de deformare și, ca urmare, se mărește neuniformitatea deformației, care în final poate genera fisurarea materialului .

Elementele de aliere care determină durificarea aliajului ca rezultat al formării fazelor insolubile (Cr, Mn, Ti, V, Zr), micșorează plasticitatea la deformarea la cald într-o măsură mai mică decât elementele de aliere care determină durificarea aliajului prin formarea soluțiilor solide (Cu, Mg, Si, Zn).

Plasticitatea aliajelor speciale de aluminiu crește liniar cu mărirea temperaturii în intervalul 370...455°C și scade rapid odată cu apariția procesului de ardere a aliajului .

În funcție de proprietățile mecanice, privind deformabilitatea, aliajele speciale de aluminiu pot fi grupate astfel:

- aliaje cu plasticitate bună și rezistență la deformare mică, având rezistența la rupere $R_m < 300$ MPa și alungirea relativă $A_5 = 15...22$ %;
- aliaje cu plasticitate și rezistență la deformare medii, respectiv, $R_m = 300...450$ MPa și $A_5 = 10...15$ %
- aliaje cu plasticitate redusă și rezistență la deformare mare, respectiv, $R_m = 450...600$ MPa și $A_5 = 5...10$ %.

15.4. PARAMETRII TEHNOLOGICI DE LAMINARE A ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE ALUMINIU

Parametrii tehnologici pentru prelucrarea prin deformare plastică a aliajelor speciale de aluminiu se stabilesc în funcție de natura aliajului, de destinația produsului și de procedeul de deformare.

Aluminiul și aliajele sale se pot prelucra plastic prin mai multe procedee de deformare plastică:

- laminare pentru obținerea de table, benzi, folii și țevi;
- forjare și matrițare pentru obținerea de piese;
- extrudare pentru obținerea de bare, profiluri și țevi;
- tragere pentru obținerea de bare cu forme simple a secțiunii transversale (rotund pătrat, lat, hexagonal) sau țevi cu secțiune în general rotundă;
- trefilare pentru obținerea de sârme.

Pentru *laminarea la cald a tablelor și benzilor* din aliaje speciale cu bază de aluminiu (fig.15.14) se utilizează ca semifabricate de pornire bramele turnate continuu, semicontinuu sau discontinuu, cu dimensiuni de (200...500) x (1000...1600) x (2500...7000) mm. Aceste aliaje, având un grad înalt de aliere, se supun *recoacerii de omogenizare* cu scopul îndepărtării tensiunilor interne

care au apărut în timpul turnării și răcirii semifabricatelor și a reducerii segregăției (omogenizare chimică) apărută în timpul solidificării. Prin omogenizare cresc substanțial proprietățile plastice ale materialului. Pentru omogenizare semifabricatele se încălzesc până la o temperatură cu 20...40°C mai

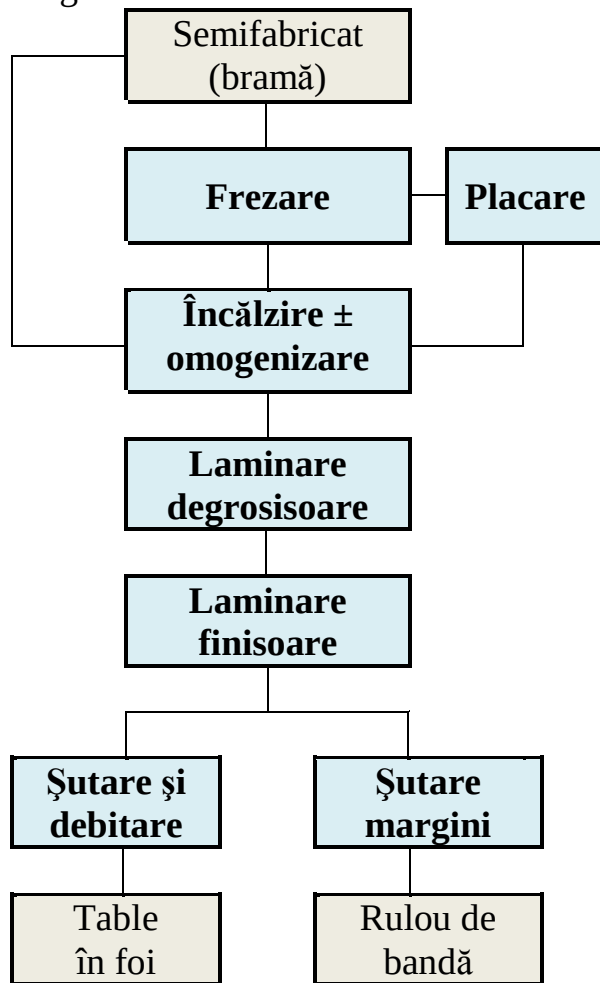


Fig.15.14. Fluxul tehnologic pentru laminarea la cald a aliajelor de aluminiu.

urma acestui proces proprietățile mecanice ale semifabricatului se măresc simțitor (fig.15.15).

În cazul în care procesul de omogenizare se face simultan cu încălzirea pentru laminare se recomandă încălzirea semifabricatelor la o temperatură cu circa 20°C peste temperatura de laminare, 430...460°C, menținerea circa 12...14h urmată de reducerea temperaturii la cea corespunzătoare laminării și egalizare timp de încă 4...6 h. Ridicarea temperaturii de omogenizare conduce la scurtarea timpului de tratament.

Tratamentul termic de omogenizare mai are un efect benefic și anume, în cazul aliajelor de tip duraluminu (Al-Cu-Mg) omogenizate la 490°C cu 36 ore menținere, se produce scăderea temperaturii de recristalizare cu 35...75°C față de cea corespunzătoare aliajelor la care nu s-a aplicat tratamentul de omogenizare.

De asemenea prin omogenizarea acestor aliaje se obțin proprietăți superioare de plasticitate a produselor plate obținute prin laminare. De exemplu, în cazul unui aliaj de tip dural 2024 (AlCu4Mg1) omogenizat la 500±5°C se obțin valori ale alungirii la încercarea prin tracțiune prezentate în tabelul 15.10.

mică decât temperatura de topire a eutecticului cu temperatura minimă din aliaj, urmată de menținere timp de 4...12 h, în funcție de dimensiunile semifabricatului. Prin această încălzire se asigură condiții pentru difuzia elementelor de aliere din zona segregată spre zonele cu concentrație mai redusă în respectivul element de aliere.

Procesul de omogenizare depinde și de dimensiunile granulației semifabricatului în sensul că, cu cât este mai fină granulația, cu atât este mai mare viteza de difuzie, respectiv cu atât este mai intens procesul de omogenizare. În cazul aluminiului și a aliajelor Al-Mn și Al-Mg-Cu-Mn (dar cu concentrații ale elementelor sub 1%) omogenizarea nu este necesară. În cazul aliajelor Al-Cu de tip *duraluminu* și a aliajelor Al-Mg și Al-Zn omogenizarea este obligatorie. Pentru duraluminu se recomandă temperatura de 495 ± 5°C și timpul de menținere de 18...24 h. În

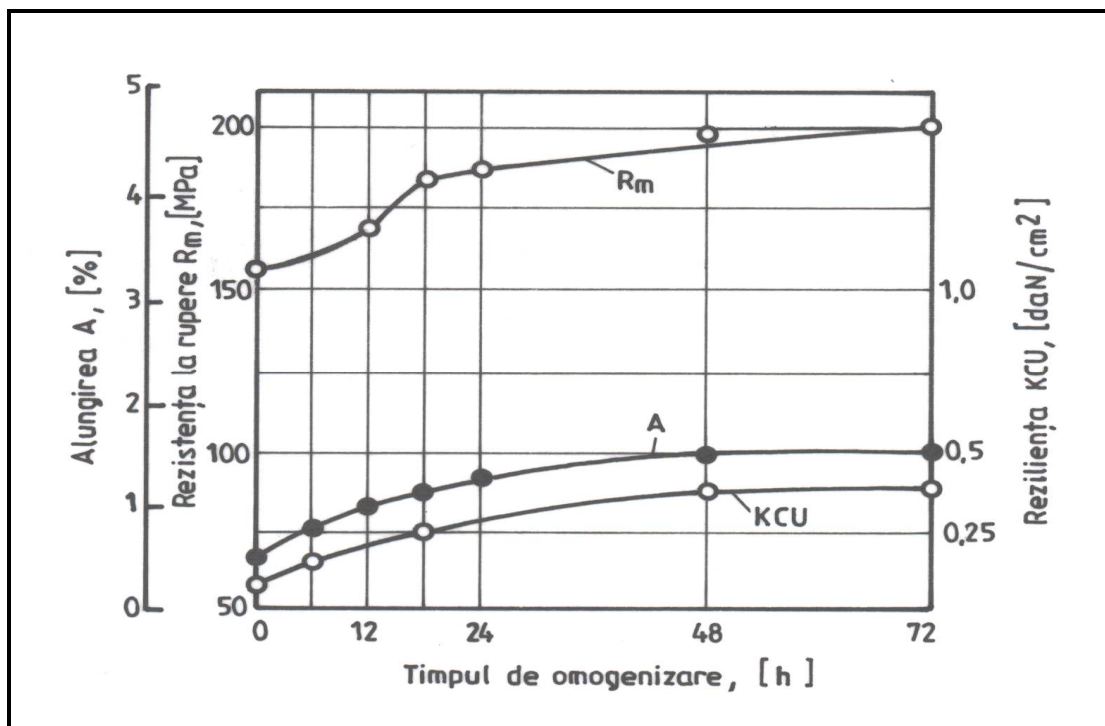


Fig.15.15. Variația proprietăților mecanice ale aliajului 2024 în funcție de durata tratamentului termic de omogenizare.

Tabelul 15.10

Alungirea relativă a aliajului 2024 în starea omogenizată

Nr. crt.	Starea materialului	Alungirea relativă, %	
		Aliaj neomogenizat	Aliaj omogenizat
1	Turnat (semifabricat)	2,6	5...7
2	Laminat la cald	6...8	13...14
3	Laminat la cald și recopt	9...11	18...21

Pentru principalele sisteme de aliaje de aluminiu deformabile condițiile de tratament termic de recoacere de omogenizare sunt prezentate în tabelul 15.11.

Tabelul 15.11

Parametrii tratamentului de recoacere de omogenizare

Sistemul de aliaje		Temperatura, °C	Timpul, h
Al 99,5	(seria 1 000)	550...620	4...12
Al-Cu	(seria 2 000)	485...515	4...12
Al-Mn	(seria 3 000)	600...620	4...12
Al-Mg	(seria 5 000)	445...480	4...12
Al-Zn	(seria 7 000)	445...470	8...24

Pentru efectuarea tratamentului de omogenizare se folosesc, în general, cuptoare electrice de 750...1200 kW cu circulația forțată a aerului cu viteza de 10...15 m/s, care permit o stabilitate a temperaturii de $\pm 3^\circ\text{C}$.

Frezarea suprafețelor semifabricatului, câte 3...10 mm pe fiecare față, se execută cu scopul îndepărtării zonelor exterioare cu segregații apărute în timpul

solidificării, a deferitelor lipituri de zgură și a fisurilor de suprafață. Operația se execută pe mașini specializate care aşchiază simultan toate fețele laterale ale semifabricatului cu o productivitate de circa 8 sleburi/h. Frezarea se execută fără lubrifiere (frezare uscată) în special atunci când semifabricatul urmează a fi placat. Pentru bramele care urmează a fi placate, înainte de frezare acestea se supun tratamentului termic de omogenizare

Placarea aliajelor speciale de aluminiu. Aliajele speciale de aluminiu sunt aliaje complexe care fac parte din grupa aliajelor durificabile prin tratament termic, caracterizate prin concentrații ridicate ale elementelor de aliere, care le asigură proprietăți de rezistență ridicate, dar le reduc foarte mult rezistența la coroziune. Principalele tipuri de astfel de aliaje sunt cele din grupele 2 000 (Al-Cu-Mg-Mn) și 7 000 (Al-Zn-Mn-Cu). Placarea micșorează și tendința de fisurare la marginile benzilor ca urmare a tensiunilor reziduale produse prin neuniformitatea deformației pe lățimea laminatelor.

Materialul de placare (plachetele) este constituit, în general, din aluminiu de puritate tehnică 99,5% sau puritate ridicată 99,9% în funcție de destinația produsului, cu o grosime de minim 4% pentru benzi finite sub 2 mm și minim 2% din grosimea bramei semifabricat de placare pentru benzi finite cu grosime de peste 2 mm. Aliajele Al-Zn-Mg-Cu se plachează cu un aliaj Al-Zn, grosimea plachetelor fiind de 3,25% din grosimea tablei pentru table de până la 3,2mm și de 1,5% pentru table de peste 3,2 mm. Lățimea plachetelor este mai mare decât cea a bramei, cu valoarea grosimii bramei. Lungimea plachetei se adoptă mai mică decât a bramei, având în vedere alungirea specifică mai mare a aluminiului decât a aliajului care urmează a fi placat, la temperatura de deformare.

Metoda după care se efectuează placarea este prezentată în figura 15.16.

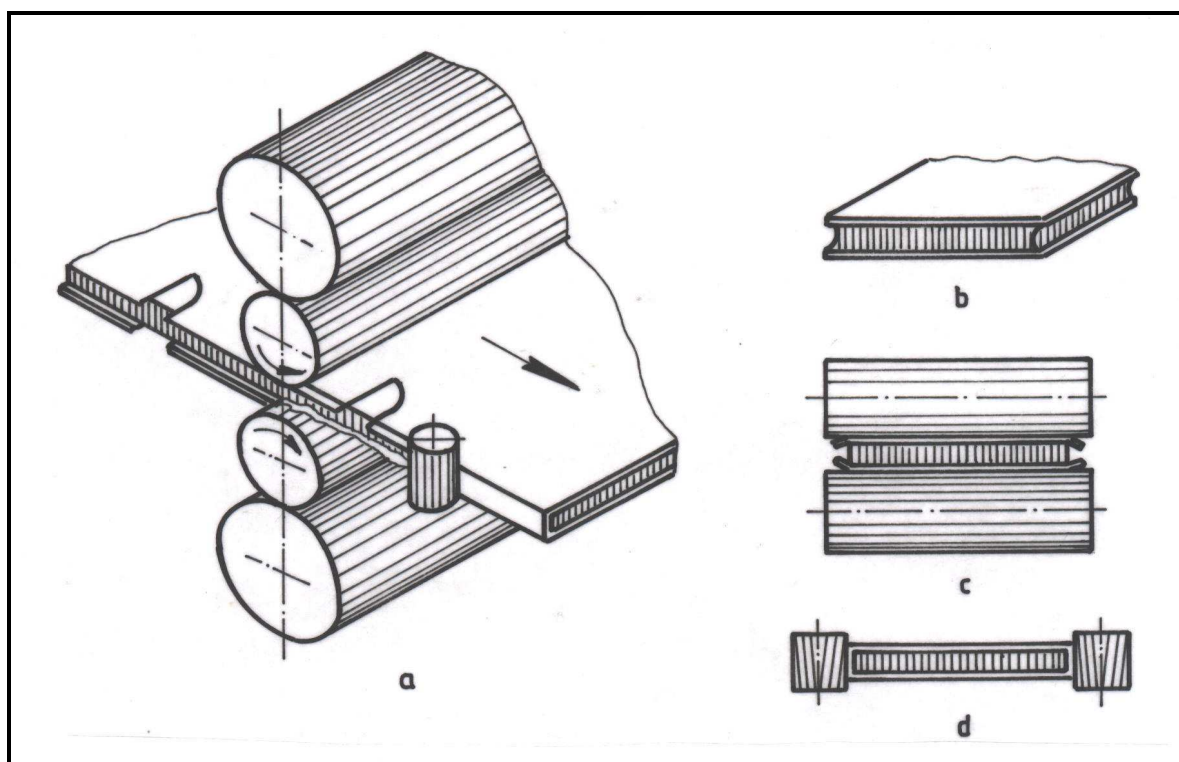


Fig. 15.16. Schema metodei de placare a sleburilor din aliaje speciale de aluminiu:
a - vedere generală a cajei; b - brama cu plachete; c - laminarea cu cilindrii orizontali;
d - refularea cu cilindrii verticali.

Pentru efectuarea placării, respectiv a procesului de sudare între bramă și plachete prin difuzie, se execută în prealabil degresarea suprafețelor bramei și plachetelor ce vor veni în contact, îndoirea cu 90° a marginilor laterale și una din marginile frontale ale plachetelor și menținerea plachetelor pe bramă cu ajutorul unor benzi înguste din oțel. Pachetul astfel format se încălzește în poziție verticală în cuptoare adânci timp de 2...3 h la 410...460°C. După încălzire pachetul se depune pe calea cu role și se îndepărtează benzile de oțel care țineau plachetele. În continuare se execută laminarea.

Formarea unei îmbinări (sudări) a materialelor metalice care se plachează se bazează pe difuzia lor reciprocă. Capacitatea de sudare a celor două materiale metalice este determinată de raportul între duritatea materialului de placare și duritatea materialului bramei. Cu cât acest raport este mai mare cu atât sudabilitatea celor două materiale este mai bună.

Procesul de placare poate fi împărțit convențional în trei stadii:

- formarea suprafețelor de contact, respectiv distrugerea peliculei de oxizi de pe suprafețele în contact (de circa 0,2 μm grosime) ca urmare a deformării și a plasticității reduse a acestor pelicule, cele două metale venind în contact intim;
- formarea îmbinării metalice prin difuzia reciprocă a atomilor celor două materiale metalice în contact;
- desăvârșirea procesului de sudare prin recristalizarea grăunților comuni celor două metale în contact.

Laminarea la cald. În cazul laminării bramelor care urmează a fi placate, prima trecere pe cilindrii orizontali se realizează cu o reducere absolută cel puțin egală cu grosimea plachetei. De asemenea este absolut obligatorie aplicarea primei refulării după cea de a doua trecere pe cilindrii orizontali. În continuare se vor aplica refulări alternative cu trecerile orizontale, până când laminatul va avea grosimea de 50...60 mm.

Primele treceri (7...8 treceri) se vor executa fără lubrifiere pentru a se evita pătrunderea între bramă și plachete a condensului sau a lubrifiantului, putând înrăutăți procesul de sudare.

Reducerile pe treceri vor fi în continuu crescătoare de la prima până la ultima trecere, într-un interval de 5...50% (pentru aluminiu și pentru aliajele moi ale aluminiului $\mu_{\text{med}} = 1,5...1,9$, iar pentru aliajele speciale Al-Cu-Mg de tip duraluminiu sau Al-Zn-Mg-Cu de tip zicral, $\mu_{\text{med}}=1,3...1,6$). Reducerile la primele treceri se pot mări doar după distrugerea structurii de turnare.

În cazul bramelor neplacate regimul de reduceri este practic același, refulările se fac în număr mai mic, având rolul doar de a regla lățimea benzii, iar lubrifierea se efectuează chiar de la prima trecere.

Regimul termic pentru laminarea la cald a aluminiului și aliajelor sale, respectiv temperatura de început și de sfârșit de laminare sunt prezentate în tabelul 15.12.

Laminarea cu lubrifiere este necesară pentru evitarea producerii lipiturilor pe cilindrii de lucru sau pe rolele de transport a laminatelor. Ca agent de ungere și răcire pentru aluminiu și aliajele sale se folosește emulsia formată din concentrat emulsionabil în proporție de 1,0...2,5% în apă dedurificată. Un concentrat emulsionabil frecvent folosit este format din 9,5...10,5% acid oleic,

5,5...6,5% trietanolamină și restul ulei de transformator. Concentrația soluției este cu atât mai redusă în concentrat emulsionabil cu cât aliajul laminat are o plasticitate mai redusă.

Tabelul 15.12

Regimul termic pentru laminarea la cald

Nr. crt.	Simbolul aliajului	Temperatura de început de laminare, °C	Temperatura de sfârșit de laminare, °C
1.	1100, 3003, 3004, 5052	400...500	150
2.	6061, 6063	400...445	370
3.	2014, 2017, 2024, 7075	400...445	315

Laminarea la rece. Cu excepția unei mici cantități de table groase, benzile și tablele finite din aluminiu și aliajele sale se obțin în exclusivitate prin laminarea la rece din următoarele motive:

- benzile cu grosimea mică nu se pot lamina la cald ca urmare a răcirii foarte rapide a materialului (suprafața foarte mare de schimb de căldură);
- calitatea suprafeței laminatelor este superioară în urma laminării la rece;
- prin ecruisare cu grade variabile se obțin benzi cu proprietăți mecanice într-un ecart foarte larg, ceea ce nu este posibil prin laminare la cald, în urma căreia banda este numai în stare moale, recristalizată.

Aluminiul prezintă și la rece o deformabilitate ridicată. Astfel, se pot lamina fără tratamente termice intermediare (fără recoaceri) benzi de 0,5mm dintr-o bandă semifabricat de 6 mm grosime, deci cu aplicarea unei reduceri totale de 91,6%. În mod practic astfel de reduceri mari nu se aplică deoarece este posibil să apară unele fisuri ca urmare a apariției de tensiuni reziduale ce pot distruge materialul. În general reducerea totală maximă pentru laminarea aluminiului este de până la 90%, dar în mod practic nu se depășește 75%, în timp pentru aliaje de tip duraluminiu (6061,2024 și 2014) reducerile totale scad simțitor (fig.15.17).

Reduceri totale cu valori ridicate se pot aplica și în cazul aliajelor din sistemele Al-Mn și Al-Mg.

Pentru cazul aliajelor de tip duraluminiu, la care temperatura de sfârșit de laminare la cald se recomandă a fi de peste 300°C, frecvent laminarea se sfârșește la temperaturi inferioare acestei limite și, în consecință, banda prezintă un anume grad de ecruisare care nu va permite laminarea la rece cu reduceri totale prea mari. În aceste cazuri se recomandă ca banda înainte de a fi laminată la rece să fie supusă unei recoaceri de recristalizare prin încălzire la 400...425°C urmată de răcire înceată (în cuptor cu viteză mai mică de 10°C/h) până la temperatura de 250°C. Sub această temperatură răcirea poate continua în aer.

În urma unui astfel de tratament, aliajul 2024 de tip duraluminiu va avea: $R_m = 190 \text{ MPa}$ și $A = 15...16 \%$.

Laminarea la rece a aluminiului și aliajelor sale se execută pe caje cuarto în 2...4 treceri cu reduceri pe treceri cuprinse între 20...60 % ($\mu_{med} = 1,6...1,8$ pentru aluminiu; 1,2...1,3 pentru aliaje Al-Mn; 1,1...1,2 pentru aliaje Al-Mg și 1,1...1,25 pentru aliaje tip duraluminiu).

Laminarea la rece a benzilor din aluminiu și aliajelor sale se efectuează cu tracțiune în laminat, a cărei valori se pot stabili în funcție de grosimea laminatului înainte (h_0) și după trecere (h_1) pe baza relațiilor lui Emike:

$$\sigma_0 = 43 - 5 h_0, \text{ MPa};$$

$$\sigma_1 = 56,7 - 6 h_1, \text{ MPa}.$$

O condiție de bază pentru obținerea unor benzi cu grosimi cât mai constante pe lungime este ca tensiunile în bandă să se mențină cât mai constante pe tot parcursul laminării. Variații ale tensiunilor cu peste $\pm 1...3$ % produc variația grosimi, dar și urme longitudinale pe suprafața benzii ca urmare a deplasării spirelor în rulou și a patinării cilindrilor pe bandă (urme transversale). Constanța grosimii benzii pe lungime este asigurată și prin menținerea cât mai constantă a vitezei de laminare.

Laminarea la rece se execută cu ungere tehnologică pentru micșorarea valorii coeficientului de frecare și pentru reducerea corespunzătoare a rezistenței la deformare a materialului și a parametrilor de forță și energie ai procesului. În același timp, prin folosirea lubrifianților se asigură și o suprafață de calitate superioară (lucioasă) a benzii. Ca agent de ungere și răcire pentru laminarea la rece a aluminiului și aliajelor sale se folosește în general petrol cu adaos de aditiv pentru asigurarea unui film continuu de lubrifiant pe bandă. Acest lubrifiant nu are însă o capacitate de răcire prea mare comparativ cu cea a lubrifianților sub formă de emulsii de uleiuri în apă.

Laminarea foliilor. Foliile sunt benzi din aluminiu cu grosimi cuprinse între 0,005 și 0,2 mm și lățimi de 500...1500 mm.

Se obțin prin laminarea la rece pe caje cuarto (laminarea din rulou în rulou) folosindu-se ca semifabricat banda laminată la rece și recoaptă cu grosimea de 0,5...0,7 mm și aplicându-se reduceri pe treceri cuprinse între 35 și 65%, până la reducerea totală (fără tratament termic intermediar) de 90...98%.

Pentru folii cu grosimea sub 14 μm laminarea se efectuează prin suprapunerea a două folii (dublare). Pentru evitarea lipirii foliilor suprapuse în timpul laminării, se asigură o ungere bună a suprafețelor care vor veni în contact cu un ulei special.

După laminarea foliilor suprapuse se execută șutarea marginilor acestora și se procedează la separarea celor două folii prin înfășurarea pe două rulouri.

În funcție de destinație foliile pot fi cașerate (placate cu foiță de hârtie sau plastic) colorate sau imprimate cu diferite desene pentru industria alimentară sau cu suprafața oxidată controlat pentru executarea condensatorilor electrolitici.

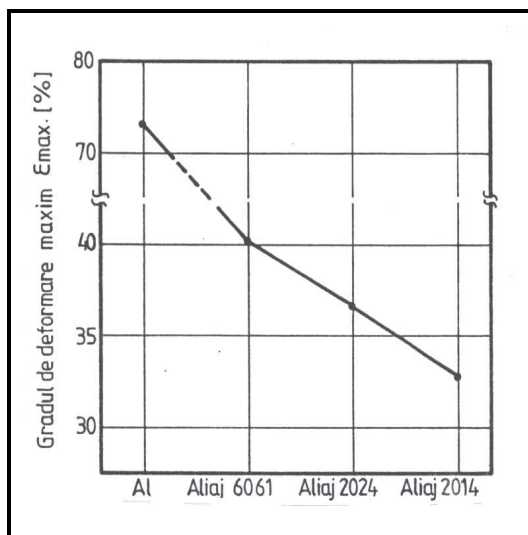


Fig.15.17. Variația limitei de plasticitate a aliajelor speciale 2014, 2024 și 6061 comparativ cu cea a aluminiului la laminarea la rece a probelor în formă de pană.

15.5. PRELUCRAREA TERMOMECHANICĂ A ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE ALUMINIU

Prelucrările termomecanice (PTM) ale aliajelor speciale de aluminiu sunt relativ puțin studiate și aplicate în țara noastră deși este necesar ca acestea să fie mai mult utilizate în practică decât procedeele convenționale.

Avantajele oferite de proprietățile structurale ale aliajelor speciale de aluminiu pot fi valorificate în practică prin două metode.

Prima metodă constă în utilizarea acoperirilor cu vopsele aderente, în locul acoperirilor mecanice, ceea ce conduce la scăderea concentrațiilor efective de tensiuni, la creșterea rezistenței la oboseală, la micșorarea pachetului de table destinat laminării și la simplificarea procedurii în sine de laminare deci, în final, la creșterea rezistenței la propagarea fisurilor sub sarcină și obținerea unor produse fără crăpături.

După cea de a doua metodă, proprietățile pot fi obținute prin mijloace metalurgice. Tehnologiile metalurgice puse la punct pentru finisarea grăunților aliajelor speciale cu bază de aluminiu, cu rezistență medie sau înaltă, sunt de două feluri.

O categorie de procese tehnologice este capabilă să acționeze asupra grăunțului cristalin al anumitor aliaje de aluminiu în timpul primelor faze de prelucrare la temperaturi ridicate prin eliminarea parțială a neomogenităților structurale, prin controlul în timp al compoziției chimice și al ciclurilor de turnare și de omogenizare a acestor aliaje.

După aceste procese care produc distribuții speciale ale proprietăților în soluția solidă, deformarea la cald care urmează conduce spre o structură parțial poligonizată (blocuri în mozaic), deformarea la temperaturi înalte fiind necesară asigurării procesului continuu de recrystalizare.

Cealaltă categorie de procese se aplică standard aliajelor de aluminiu de înaltă rezistență destinate industriei aeronautice. Această categorie de tehnologii implică o *serie de etape de deformări plastice și de tratamente termice* menite să realizeze modificări ale dimensiunilor grăunților prin recrystalizare discontinuă, acestea constituind *prelucrările termomecanice* (PTM). Se aplică două tipuri de prelucrări termomecanice: *intermediare* (PTMI) și *finale* (PTMF).

Dintre acestea, prelucrările termomecanice intermediare (PTMI) au fost utilizate inițial pentru îmbunătățirea prelucrabilității. De câțiva ani PTMI se aplică pe plan mondial pentru îmbunătățirea plasticității, rezilienței și rezistenței la coroziune sub sarcină a aliajelor speciale de aluminiu de înaltă rezistență (în special după direcția grosimii semifabricatului), fără scăderea rezistenței mecanice comparativ cu procesele convenționale. Utilizarea PTMI se bazează pe faptul că poate fi micșorată influența structurii de turnare, printr-o recrystalizare intermediară intervenită pe parcursul schemei de laminare. Efectul pozitiv al acestei recrystalizări constă în apariția grăunților fini și echiacși, datorită separării particulelor de fază secundară la limitele grăunților.

Recrystalizarea se efectuează după omogenizarea parțială a lingourilor turnate, când fazele secundare conținând elemente antirecrystalizante (Mn, Cr, Zr) sunt puse în soluție (fig. 15.18). Când se supune la omogenizare totală, are

loc o precipitare prea fină și dispersă a acestor particule, care împiedică limitele de grăunte să migreze.

O altă variantă de prelucrare termomecanică intermediară (fig. 15.18) implică omogenizarea completă pentru precipitarea particulelor, urmând apoi răcirea lentă cu precipitarea particulelor conținând elementele de aliere care nu au efect antirecristalizant (Zn, Mg, Cu) ca particule grosiere. Lingoul, astfel prelucrat este laminat la cald, recristalizat și omogenizat.

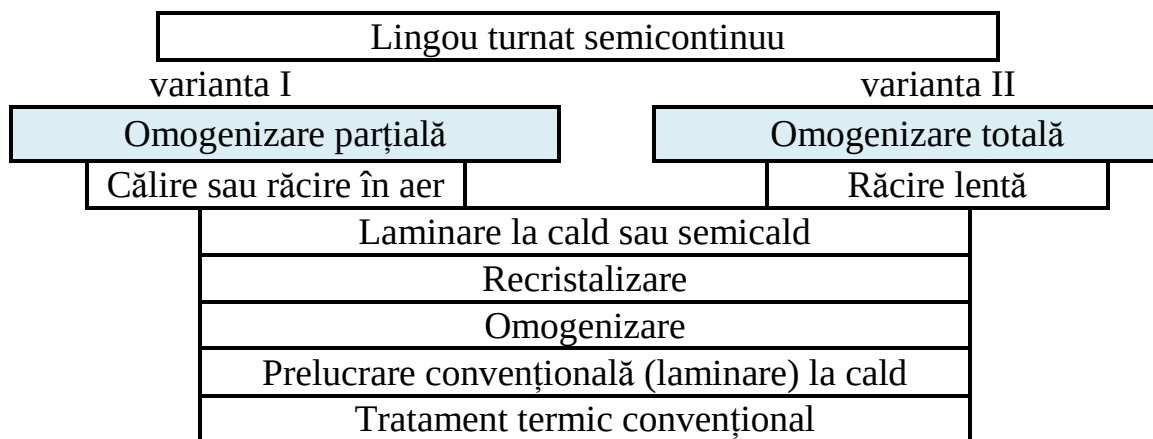


Fig. 15.18. Prezentarea schematică a variantelor de bază de prelucrare termomecanică intermediară (PTMI).

În ceea ce privește prelucrările termomecanice finale (PTMF) ale aliajelor de aluminiu speciale, o serie de lucrări de specialitate arată că deformarea înaintea îmbătrânirii finale se efectuează după o etapă de îmbătrânire artificială sau după etapa de punere în soluție. Proprietățile evaluate au fost în special rezistența și plasticitatea, urmate de reziliență, rezistența la coroziune sub sarcină și rezistența la oboseală. Rezultatele cercetărilor privind PTMF ale aliajelor speciale din sistemul Al-Zn-Mg-Cu indică faptul că pentru a se obține o creștere semnificativă a caracteristicilor de rezistență, în comparație cu prelucrările convenționale, este necesară o îmbătrânire artificială înaintea deformării, iar îmbătrânirea după deformare se recomandă după o deformare la cald. Pe de altă parte, unele cercetări privind aliajele de aluminiu speciale de secțiuni mari arată că PTMF optim constă în îmbătrânirea artificială urmată de laminarea la rece și de o îmbătrânire artificială după laminare.

O variantă presupune laminarea la rece și îmbătrânirea artificială la temperaturi relativ joase, cu scopul de a menține plasticitatea și reziliența și de a se mări rezistența mecanică față de cea obținută prin procedee convenționale.

Cealaltă variantă constă în laminarea la rece și îmbătrânirea artificială la temperaturi relativ ridicate pentru a se obține o combinație optimă între rezistența mecanică și rezistența la coroziune sub sarcină.

Prelucrările termomecanice se aplică în special aliajelor de aluminiu destinate industriei aeronautice. Eforturi considerabile au fost depuse în vederea îmbunătățirii proprietăților de utilizare a aliajelor AlCu4Mg1 (2024) și AlZn5,5MgCu (7075). Unele rezultate sunt utilizabile și pentru aliajele Al-Mg

precum și pentru unele aliaje noi experimentale. În tabelele 15.13 și 15.14 se prezintă unele aliaje speciale din sistemul Al-Cu-Mg (seria 2000) și, respectiv, din sistemul Al-Zn-Mg-Cu (seria 7000), tipurile de prelucrări termomecanice aplicate și proprietățile evaluate.

Tabelul 15.13

Aliaje ale sistemului Al-Cu-Mg supuse PTM și proprietăți evaluate

Simbolul	Tipurile de PTM	Proprietăți evaluate
Aliaje uzuale 2014	K/LR/LC; LR/LC; IA/LR; IA/LR/RR; IA/LC; IA/LR/A	Rezistența mecanică și plasticitatea
2024	IN/LC; IN/LC/IA	Rezistența mecanică, plasticitatea, reziliența, rezistența la coroziune sub sarcină.
2024, 2014, 2017, 2618	K/LR/A	Rezistența mecanică și fluajul
Aliaje noi 2048 X2048	K/LR; K/LC; K/SR; K/LC/IA K/SR/A; K/SC/A; IN/LR. IN/LR/A; IN/LC/A; IA/LC; IA/LC/A	Rezistența, plasticitatea, reziliența, rezistența la coroziune sub sarcină, fluajul, rezistența la propagarea fisurilor la oboseală.
Aliaje laborator Al - 2,8 Cu Al - Cu	IA/LR/RR IN/LR/A; IA/LR/A; K/PH; K/RR/A	Rezistența mecanică, plasticitatea, fluajul
2210	K/LR/A; IA/LR/A	Rezistența mecanică și plasticitatea

Legenda: K-călire; L-laminare; R-rece; C-cald; S-întindere; F-forjare; IN-îmbătrânire naturală; IA-îmbătrânire artificială; A-îmbătrânire artificială după deformare; RR-recoacere de recristalizare.

Tabelul 15.14

Aliaje ale sistemului Al-Zn-Mg-Cu supuse PTM și proprietăți evaluate

Simbolul	Tipuri de PTM	Proprietăți evaluate
7049	IA/LC/A; IA/LC/A/LC/A; IA/LC/A/IA/IA/LC/LR/A	Rezistența mecanică, plasticitatea, rezistența la coroziune sub sarcină
7075	IA/D/A; IA/D/A/IA; II/LR/II/LC; IA/LC; IA/FR/A	Rezistența mecanică, plasticitatea, rezistența la coroziune sub sarcină, fluajul
7475	IA/LR; IA/LC; IA/LR; IA/LR/A	Rezistența mecanică, reziliența, rezistența mecanică, plasticitatea
A15,6Zn2,5Mg1,5Cu	IA/LR; IA/LR/A	Rezistența mecanică, plasticitatea
A15,3Zn1,7Mg1,8CuZr	IA/LC; IA/LC/A	Rezistența mecanică, rezistența la exfoliere, fluajul

Legenda: K-călire; L-laminare; R-rece; C-cald; S-întindere; F-forjare; II-îmbătrânire la temperaturi mari, restul indicativelor au aceeași semnificație ca în tabelul 15.13.

În figura 15.19 se prezintă operațiile de PTMI pentru obținerea semifabricatelor laminate la cald din aliajul AlZn5,5MgCu (7075). În aceeași figură se prezintă, de asemenea, ca alternativă a unei prelucrări convenționale cu îmbătrânire izotermă, o variantă de prelucrare termomecanică finală PTMF bazată pe o deformare plastică prin laminare la rece, realizată între două operații de îmbătrânire artificială. Această prelucrare termomecanică finală, la care se fac unele referiri în literatura de specialitate, determină o stare de supradurificare a aliajului asociată cu scăderea limitată a valorilor plasticității.

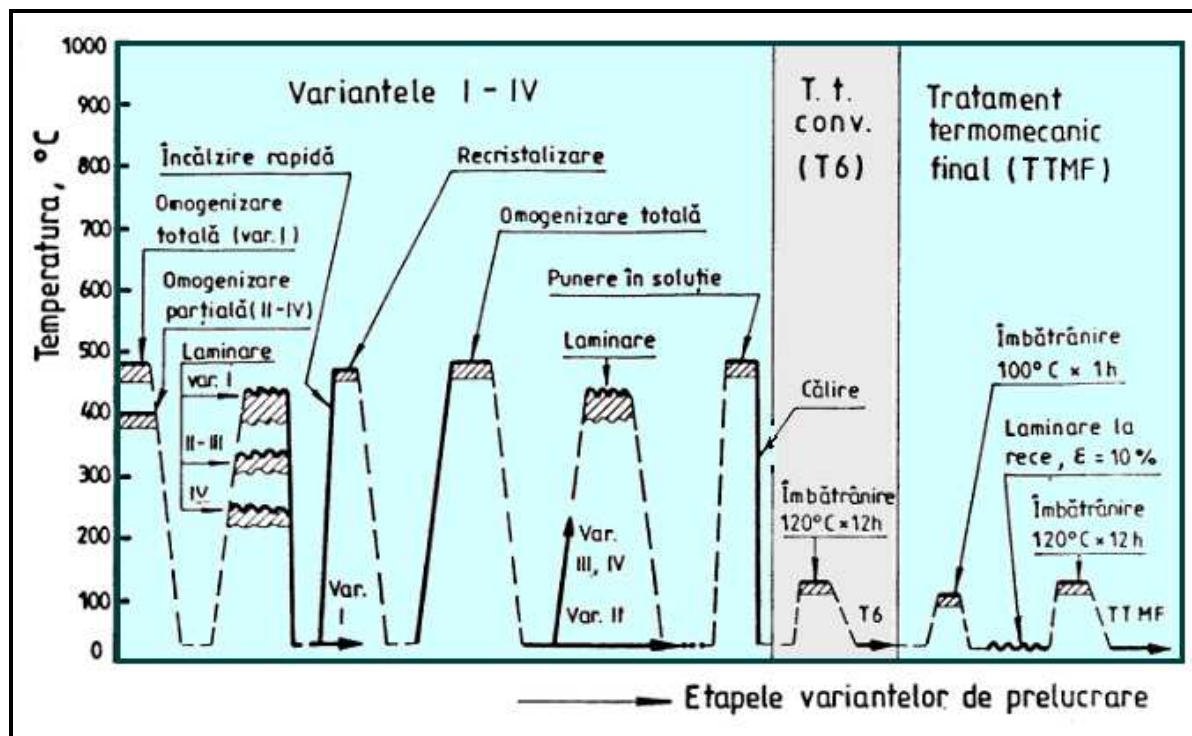


Fig. 15.19. Schema operațiilor de PTMI, urmate de tratamente termice convenționale pentru starea T6 sau de operații PTMF.

Așa cum rezultă din schema prezentată în figura 15.19 se pot utiliza două tipuri diferite de PTMI: primul tip cuprinde recristalizarea intermediară urmată de laminarea la cald, iar în cel de-al doilea tip procesul de recristalizare reprezintă dimpotrivă, faza finală a etapei de prelucrare a materialului. Este necesar să se sublinieze că etapa de recristalizare, care este în centrul atenției PTMI, acționează numai asupra aliajului parțial omogenizat (în care cea mai mare parte a elementelor antirecristalizante este încă în soluție) laminat la semicald. După recristalizare, realizată cu încălzire rapidă și la temperaturi ridicate semifabricatul se supune unei omogenizări puternic stimulate de domeniul de temperaturi corespunzător precipitării elementelor antirecristalizante. Prin acest tratament se realizează și completa dizolvare a fazelor eutectice și o distribuție uniformă în soluția solidă, o precipitare fină și densă a particulelor antirecristalizante, scopul acestora fiind "congelarea" structurii obținute împiedicând în următoarele operații migrarea limitelor de grăunte.

În tabelul 15.15 sunt prezentate caracteristicile de rezistență și plasticitate ale semifabricatelor care se obțin conform celor patru variante de prelucrare din figura 15.19 și supuse în final tratamentului convențional de tip T6 (călire și

îmbătrânire artificială) și, respectiv, variantei de prelucrare termomecanică finală (v. figura 15.19).

Tabelul 15.15

Proprietățile mecanice ale semifabricatelor laminate la cald din aliajul AlZn5,5MgCu (7075) în starea T6 și, respectiv, prelucrate prin PTMF.

Variante de prelucrare	În starea T6				După PTMF			
	R _m MPa	R _{p0,2} MPa	A ₅ %	Z %	R _m MPa	R _{p0,2} MPa	A ₅ %	Z %
I	632	566	8,4	17,5	674	641	4,7	13,7
II	625	564	12,2	38,8	666	638	7,7	32,2
III	626	571	10,6	33,7	670	635	7,0	27,7
IV	635	575	11,4	35,6	665	632	7,9	35,1

Din tabelul 15.15 se remarcă faptul că în starea T6 (călire 480°C x 2h și îmbătrânire artificială la 120°C x 12 ore) semifabricatele laminate la cald obținute prin PTMI au valori ale rezistenței mecanice (R_m, R_{p0,2}) de același ordin de mărime cu ale semifabricatelor obținute prin prelucrare convențională, fiind caracterizate, în raport cu acestea din urmă, de valori ale alungirii la rupere și, mai ales, de valori ale stricțiunii sensibil mai ridicate, deci de o plasticitate mai ridicată.

Îmbunătățiri semnificative ale caracteristicilor mecanice de rezistență se obțin la semifabricatele laminate la cald sau prelucrate prin PTMI în cazul în care, în final, se supun PTMF (călire la 480°C x 2 ore, îmbătrânire artificială la 100°C x 1 oră, laminare la rece cu $\epsilon = 10\%$ și îmbătrânire artificială la 120°C x 12 ore). Condițiile cele mai avantajoase se obțin în varianta III de PTMI urmată de PTMF când la o valoare acceptabilă a alungii, A₅ = 7 %, proprietățile de rezistență mecanică obținute au crescut la valori foarte ridicate comparabile cu cele ale unor oțeluri R_m = 670 MPa și, respectiv, R_{p0,2} = 635 MPa.

Trebuie precizat că proprietățile fundamentale ale aliajelor speciale cu bază de aluminiu sunt strict dependente de întregul ciclu de prelucrări termomecanice la care sunt supuse aceste aliaje. Condițiile de prelucrare termomecanică, 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 PTMI și PTMF pot micșora puternic caracteristicile tipice.

În domeniul metalurgiei aliajelor speciale cu bază de aluminiu, având în vedere caracterul complex al problemelor de rezolvat, eforturile vor trebui dirijate în direcția dezvoltării și industrializării unor noi aliaje speciale cu bază de aluminiu din seria 2000 (Al-Cu-Mg), seria 7000 (Al-Zn-Mg-Cu) sau chiar din seria 8000 (Al-Li-Cu-Mg), în direcția îmbunătățirii complexului de proprietăți ale acestor aliaje și în direcția punerii la punct a unor noi procedee de PTMI și PTMF care să conducă la îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență la oboseală, păstrând un bun compromis între rezistența mecanică, rezistența la coroziune și tenacitate.

Capitolul 16

LAMINAREA ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE CU BAZĂ DE MAGNEZIU

Aliajele speciale cu bază de magneziu devin din ce în ce mai mult aplicate pe scară industrială datorită proprietăților lor mecanice, fizice și tehnologice deosebite în condiții speciale (la temperaturi înalte, la temperaturi foarte joase, în reactoare nucleare etc.). Aliajele de magneziu se caracterizează prin greutate specifică mică, căldură specifică mare, capacitate mare de absorbție a energiei mecanice (a vibrațiilor de exemplu). Comparativ cu aliajele de aluminiu, aliajele cu bază de magneziu au conductibilitatea termică mai redusă și contracții mai importante la solidificare.

La proiectarea subansamblurilor din aliaje cu bază de magneziu trebuie să se ia în seamă anizotropia proprietăților mecanice ale produselor laminate, astfel încât direcția de acțiune a tensiunilor maxime să coincidă cu direcția în care proprietățile mecanice sunt maxime.

Direcția pentru care se obțin cele mai bune proprietăți mecanice este direcția de curgere a materialului metalic în timpul deformării, adică cel mai adesea pe lungimea semifabricatului deformat.

În cazul în care se assemblează piese din aliaje de magneziu cu piese din alte materiale metalice, trebuie avută în vedere probabilitatea coroziunii în locurile de contact; de asemenea, unele aliaje de magneziu suferă fenomenul de coroziune sub sarcină.

Magneziul și aliajele sale nu sunt rezistente la coroziune; prezintă o oarecare stabilitate la coroziune numai în atmosferă uscată.

Rezistența mică la coroziune în aer și în diferite medii impune măsuri speciale de protecție ca vopsirea, lăcuirea sau tratarea cu bicromat de potasiu.

La încălzire magneziul și aliajele de magneziu se oxidează ușor, iar la temperaturi de peste 600°C se aprinde cu explozie. Aceasta presupune o atenție specială atât la încălzirea pentru laminare și la laminarea la cald a magneziului și aliajelor cu bază de magneziu, cât și la prelucrarea prin așchiere a magneziului și a aliajelor sale, șpanul putându-se aprinde ușor.

Oxidarea ușoară a magneziului și aliajelor de magneziu în stare topită impune ca topirea și turnarea acestora să se facă în atmosferă inertă sau sub zgură.

Caracteristicile mecanice scăzute ale magneziului elementar exclud folosirea acestuia ca material de construcții. Este utilizat ca element de aliere și ca dezoxidant pentru un număr mare de aliaje, la elaborarea fontelor nodulare, în pirotehnie și ca element de bază la elaborarea aliajelor de magneziu.

16.1. PROPRIETĂȚI FIZICO-MECANICE ȘI TEHNOLOGICE ALE METALULUI DE BAZĂ

Magneziul aparține subgrupeii II A a sistemului periodic al elementelor, și are *greutatea specifică* mică, $1,75 \text{ g/cm}^3$, fapt care determină folosirea acestuia în diferite domenii ale tehnicii, în principal în aviație.

Temperatura de topire a magneziului este de 651°C , iar *sistemul de cristalizare* este hexagonal compact cu parametrii $a = 3,2030\text{\AA}$, $c = 5,2002\text{\AA}$ și raportul $c/a = 1,623$. Magneziul nu prezintă transformări alotropice

Din punct de vedere elastic magneziul este practic izotrop. Modulul de elasticitate la 300 K este $E = 45\,000 \text{ MPa}$, iar modulul de elasticitate transversal are valoarea $G = 16\,500 \text{ MPa}$.

Coeficientul mediu de *dilatare liniară* a magneziului policristalin la temperatura de $20\ldots 100^\circ\text{C}$ are valoarea $\alpha = 25,8 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, *conductivitatea termică* pentru Mg 99,98 și temperatură cuprinsă între $50\ldots 400^\circ\text{C}$ are valoarea $K=1,545 \text{ W/cm} \cdot \text{grd}$, iar *căldura masică* la temperatura de 300 K are valoarea $C=0,25 \text{ cal/g} \cdot \text{grd}$. *Rezistivitatea electrică* la 20°C este de $4,46 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

Principalele proprietăți mecanice și proprietățile fizice ale magneziului sunt prezentate în tabelul 16.1.

Tabelul 16.1

Caracteristici mecanice și fizice ale magneziului

Nr. crt.	Caracteristica	Unitatea de măsură	Valoarea
1.	Rezistența la rupere la tracțiune (stare turnată)	MPa	110
2.	Limita de elasticitate (stare turnată)	MPa	20
3.	Alungirea la rupere (stare turnată)	%	8
4.	Modulul de elasticitate E (stare turnată)	MPa	45 000
5.	Duritatea (stare turnată)	HB	30
6.	Rezistența la rupere (stare ecruisată)	MPa	200
7.	Limita de curgere la tracțiune (stare ecruisată)	MPa	90
8.	Alungirea la rupere (stare ecruisată)	%	11,5
9.	Duritatea (stare ecruisată)	HB	40
10.	Rezistivitatea (0°C)	Ohm·m	$4,60 \cdot 10^{-3}$
11.	Conductibilitatea termică (0°C)	J/mK	159,0
12.	Căldura specifică (20°C)	(cal/cm·grd·s) J/kg·k (cal/g·grd)	(0,380) 1029,9 (0,246)
13.	Temperatura de fierbere	$^\circ\text{C}$	1107
14.	Temperatura de topire	$^\circ\text{C}$	651
15.	Densitatea (20°C)	$\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$	1,75
16.	Parametrul rețelei (20°C)	Å	$a=3,2030$ $c=5,2002$
17.	Structura cristalină	-	h.c.
18.	Configurația electronică	-	[Ne] $3s^2$
19.	Volumul atomic (20°C)	$\text{cm}^3/\text{atom} \cdot \text{g}$	14,00
20.	Masa atomică	-	24,312
21.	Numărul atomic	-	12

În ceea ce privește proprietățile tehnologice, *plasticitatea* magneziului este redusă (alungirea la rupere este cuprinsă între 3 și 12%) ca urmare a sistemului HC în care cristalizează. *Rezistența la deformare*, exprimată prin valorile proprietăților mecanice este relativ scăzută și depinde de starea structurală (tabelul 16.2)

Tabelul 16.2

Caracteristici mecanice ale magneziului în funcție de starea structurală

Caracteristica	Stare turnată	Stare ecruisată	Stare recoaptă
Rezistența la rupere R_m , MPa	80...130	200...250	180
Duritatea, HB	25...30	50	40
Alungirea specifică A_5 , %	3...6	8...10	15...17

Proprietățile mecanice scăzute exclud folosirea magneziului nealiat pentru construcții de piese. Sub formă de produse plate are utilizări, însă puține, ca de exemplu pentru bateriile electrice destinate transportului marin când electrolitul este chiar apa de mare.

Aliajele de magneziu au însă o largă utilizare datorită greutateii specifice mici, a căldurii specifice mari și a capacității mari de absorbție a energiei mecanice (vibrații).

Din aliajele de magneziu se produc piese forjate și matrițate, produse plate laminate precum și bare și sârme obținute prin tragere.

16.2. PRINCIPALELE PROPRIETĂȚI ALE ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE MAGNEZIU DESTINATE LAMINĂRII

Aliajele magneziului se împart în aliaje prelucrabile prin deformare plastică și aliaje pentru turnare în piese. Cele mai multe dintre aliajele cu bază de magneziu pot fi durificate prin tratament termic (călire și îmbătrânire)

Aliajele de magneziu deformabile se pot împărți în funcție de concentrația principalelor elemente de aliere și de efectul acestora în următoarele grupe:

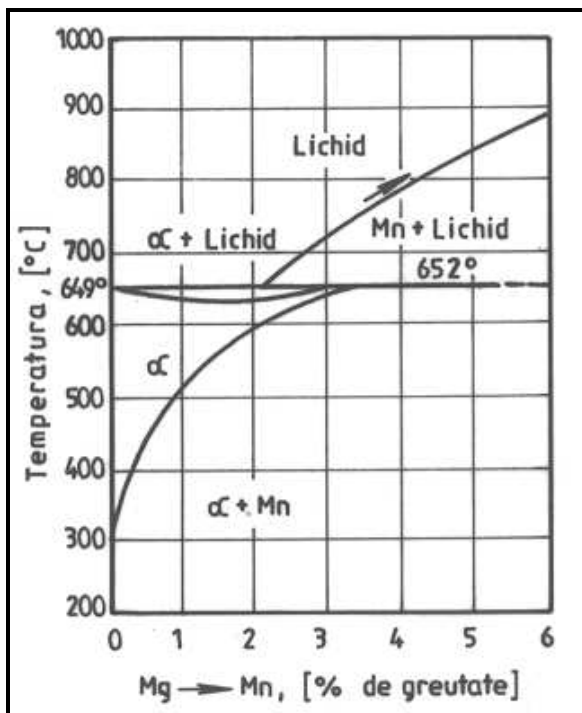
- aliaje cu rezistență mecanică mică ($R_m = 200...230$ MPa, $A_5 = 5...8$ %) cu 1,3...2,5%Mn; aceste aliaje (sistemul Mg-Mn) prezintă cea mai ridicată rezistență la coroziune dintre toate aliajele de magneziu;

- aliaje cu rezistență mecanică medie ($R_m = 250...260$ MPa, $A_5 = 7...10$ %) cu 0,4...0,8%Al și 1,0...2,2%Mn (adaos de 0,1...0,3%Ce)- sistemul Mg-Mn-Al;

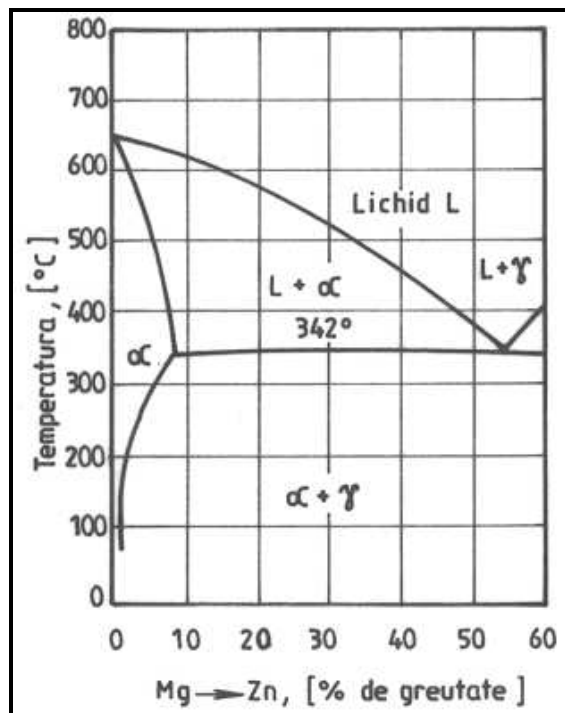
- aliaje cu rezistență mecanică mare ($R_m = 280...330$ MPa, $A_5 = 9...14$ %) cu 3...9,2 % Al, 0,2...5,0 %Zn și 0,15...0,5 % Mn, (cu adaos de 0,3...0,9%Zr);

- aliaje refractare cu 1,2...2,5 % Mn și diferite adausuri de Nd, Ni sau Th care pot lucra până la temperaturi de 250...350°C.

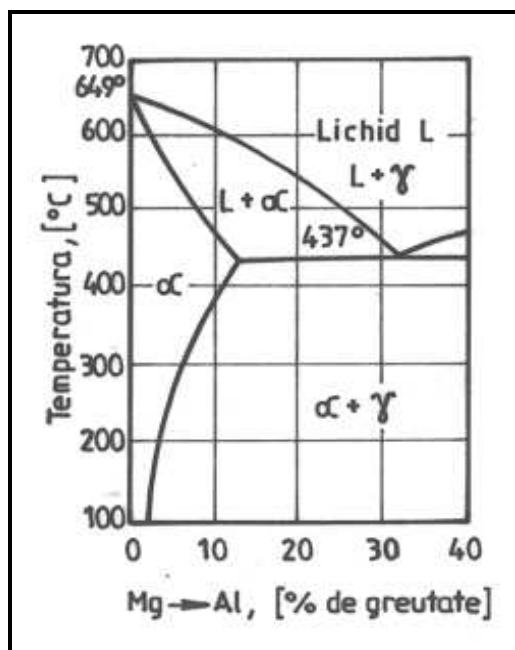
Rezultă că principalele elemente de aliere ale magneziului sunt Al, Zn și Mn pentru care, în figura 16.1, se prezintă diagramele de echilibru binare din care rezultă că au domenii de solubilitate variabile în funcție de temperatură și, ca urmare, aliajele cu bază de magneziu și cu aceste elemente de aliere pot fi durificabile prin tratamente termice.



a



b



c

Fig.16.1. Diagramele binare ale unor sisteme de aliaje cu bază de magneziu:
a - sistemul de aliaje Mg-Mn;
b - sistemul de aliaje Mg-Zn;
c - sistemul de aliaje Mg-Al.

16.3. INFLUENȚA ELEMENTELOR DE ALIERE ÎN ALIAJELE SPECIALE CU BAZĂ DE MAGNEZIU

Manganul îmbunătățește rezistența la coroziune a magneziului și ajută la obținerea unor granulații fine. Concentrația manganului este limitată la maximum 2,5% deoarece numai până la această valoare plasticitatea aliajelor de magneziu practic nu este înrăutățită.

Aluminiul formează cu magneziul compusul Al_3Mg_4 și până la concentrații de 5...7 % conduce la creșterea proprietăților de rezistență și de plasticitate ale aliajelor de magneziu. La peste 8 % concentrație a aluminiului în

aliajele speciale de magneziu, plasticitatea acestora scade simțitor și, ca atare, procesul de laminare la cald se îngreunează.

Zincul formează cu magneziul compusul $MgZn_2$ și până la concentrații de 5...6 % asigură creșterea atât a proprietăților de rezistență cât și a celor de plasticitate ale aliajelor de magneziu. Concentrații ale zincului mai mari de 3...4% produc scăderea bruscă a plasticității aliajului.

În afara acestor elemente de bază, pentru alierea magneziului se mai introduc, cu diferite concentrații și alte elemente prezentate în continuare.

Argintul în concentrație de 2...2,5 % produce creșterea rezistenței aliajelor Mg-Al-Mn până la 450 MPa și alungirii până la 5 %, deci suficientă pentru a se prelucra la cald cu ușurință.

Zirconiul în concentrație de 0,6...0,9 % asigură finisarea granulației aliajelor și creșterea proprietăților de rezistență până la 320 MPa și o alungire de până la 8%.

Beriliul în concentrații foarte mici, de 0,01...0,03 %, formează o peliculă de oxid la suprafața magneziului topit protejându-l de ardere în timpul turnării semifabricatelor sau pieselor.

Thoriul și calciul, dar și pământurile rare cum sunt Ce, Y etc. (fig.16.2) în concentrații de 1,5...4 % și, respectiv, de 0,1...0,3 % măresc refractaritatea aliajelor de magneziu fără a afecta plasticitatea. De asemenea, la temperatura ambiantă, rezistența aliajelor cu Th ajunge la 400 MPa.

Litiul, în concentrații de circa 10...15%, conduce la micșorarea greutateii specifice a aliajelor până la valoarea de $1,34 \text{ kg/dm}^3$ și asigură o alungire de 25...30 %, la o rezistență la rupere de 150 MPa la temperatura ambiantă, care însă crește atunci când se ating valori negative ale temperaturii (fig.16.3).

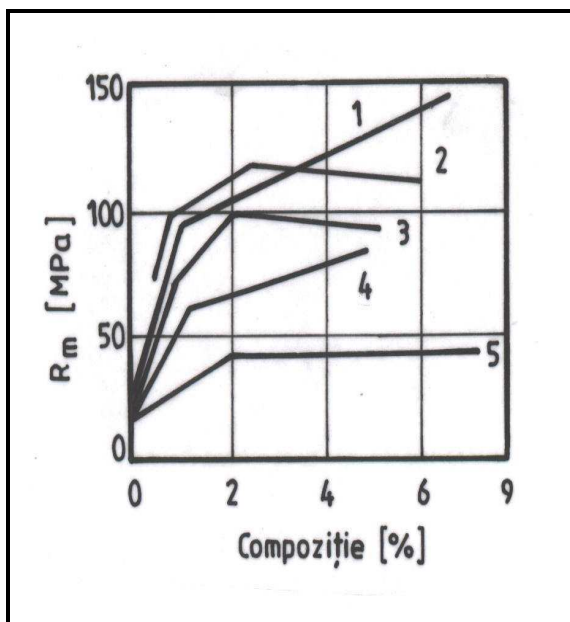


Fig. 16.2. Influența adaosurilor de metale rare asupra rezistenței magneziului la temperatura de 315°C:
1 - neodim; 2, 3 - mișmetal;
4 - ceriu; 5 - lantan.

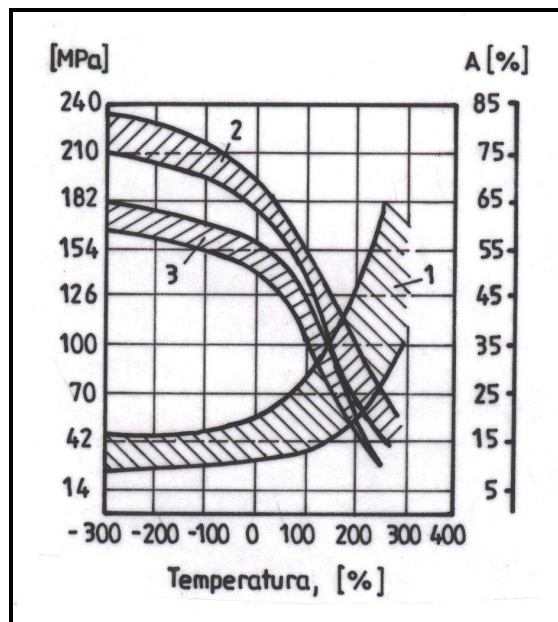


Fig. 16.3. Influența temperaturii asupra proprietăților aliajului Mg-Li cu conținut de 13...15%Li:
1 - alungirea; 2 - rezistența la rupere;
3 - limita de curgere.

16.4 PARAMETRII TEHNOLOGICI DE LAMINARE A ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE MAGNEZIU

16.4.1. Deformabilitatea aliajelor speciale de magneziu

Comportarea la deformarea plastică a aliajelor speciale de magneziu depinde atât de domeniul de temperaturi în care se efectuează procesarea, cât și de natura principalelor elemente de aliere (Al, Zn, Mg, Zr).

Aliajele deformabile cu utilizare largă în industrie (tabelul 16.3) fac parte din sistemele următoare:

- Mg-Al-Zn având 3,0...9,0 % Al, 0,2...1,5 % Zn și 0,15...0,50 % Mn;
- Mg-Mn având 1,5...2,5 % Mg și 0,15...0,35 % Ce;
- Mg-Zn având 4,0...5,5 % Zn și 0,3...0,9 % Zr.

Caracteristicile de deformabilitate ale acestor aliaje la temperaturi de până la 500°C sunt date în diagramele din figura 16.4. Din studiul acestor diagrame rezultă următoarele:

- plasticitatea aliajelor din sistemul Mg-Al-Zn depinde în mare măsură de concentrația aluminiului; astfel în cazul aliajelor cu 3...4 % Al și 0,2...0,8 % Zn se constată influența importantă a vitezei de deformare asupra valorii indicilor de plasticitate. Dacă în cazul deformării dinamice (la un ciocan de forjă) gradul maxim de reducere realizat este de până la 30%, în intervalul de temperatură de 350...425°C, la deformarea statică (la presă) valoarea deformăției este de peste 2,5 ori mai mare, ajungând până la 80% în intervalul de temperatură de 350...450°C;

- prin creșterea concentrației aluminiului în aliaj la 5...7 % și a zincului la 0,5...1,5% se constată o importantă micșorare a plasticității; astfel la deformarea statică, în intervalul de temperaturi de 250...400°C, gradul maxim de deformare este de 40...60%, iar în cazul deformării dinamice gradul de deformare nu depășește 20...30% într-un interval de temperaturi mult îngust (325...375°C);

- în ceea ce privește rezistența la deformare a aliajelor din sistemul ternar Mg-Al-Zn se constată o scădere practic liniară a acesteia (exprimată prin rezistența la rupere prin tracțiune) în intervalul de temperaturi 200...450°C de la valori de 280...320 MPa la 40...50 MPa. S-a stabilit, de asemenea, că atât la magneziu cât și la aliajele cu 5...7% Al, până la 200°C deformăția este considerată la rece, iar pentru aliaje de la 250°C și pentru magneziu de la 300°C începe procesul de dedurificare, valorile rezistenței la deformare scăzând simțitor; acest fapt se datorează și intrării în acțiune, la temperaturi de 212°C, a unui nou sistem de alunecare pe fețele laterale ale prisme hexagonale;

- creșterea în continuare a conținutului de aluminiu până la circa 9%, micșorează și mai mult plasticitatea aliajelor, deformarea acestora putându-se executa numai în condiții statice și într-un interval de temperaturi cuprins între 340...420°C, pentru care gradul maxim de deformare nu depășește 20...25%;

- plasticitatea aliajelor din sistemul Mg-Mn este foarte mare (gradul maxim de deformare atinge valori de 70...80%) într-un interval relativ larg de temperaturi (300...500°C) indiferent de viteza de deformare a procesului de deformare. În acest sens se recomandă ca procesele de deformare la cald să se

desfășoare într-un interval de temperaturi cuprins între 350...480°C. Încălzirea peste 480°C nu este indicată deoarece există pericolul apariției fenomenului de supraîncălzire, iar temperatura de sfârșit de deformare nu trebuie coborâtă sub 350°C pentru a se asigura aliajului o rezistență la deformare relativ redusă;

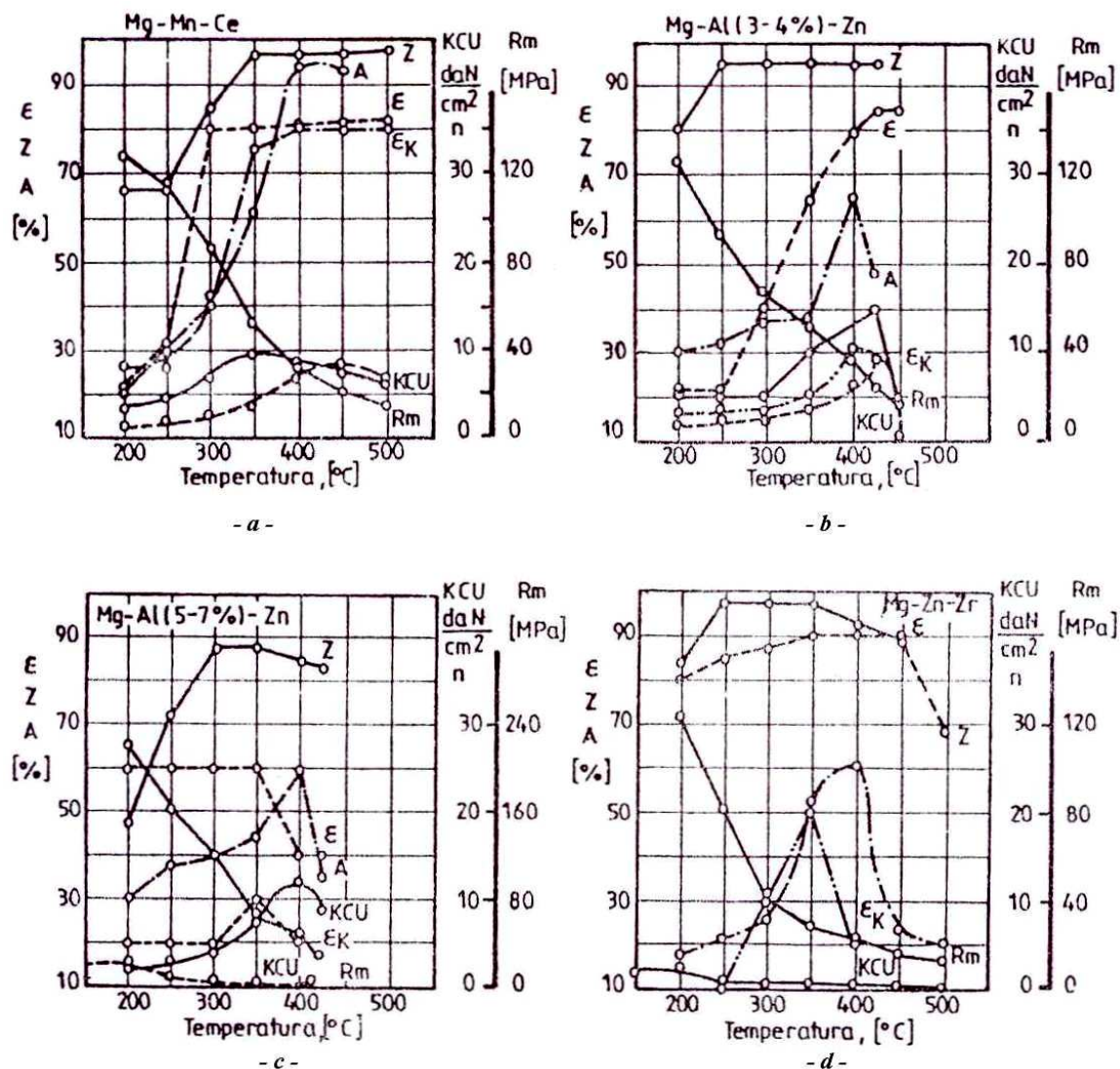


Fig. 16.4. Caracteristici de deformabilitate în funcție de temperatură ale aliajelor:
a - Mg-Mn-Ce; b - Mg-Al(3...4%)-Zn; c - Mg-Al(5...7%)-Zn; d - Mg-Zn-Zr.

- aliajele Mg-Mn, la temperaturi de 300°C, deformate cu grade de reducere mai mari de 10% au tendința mare spre ecruisare. Rezistența la deformare la temperatura menționată atinge valori de 240 MPa. De asemenea, creșterea inclusiv a vitezei de deformare face ca procesul de deformare să corespundă deformării la rece. Creșterea temperaturii la 350°C face ca rezistența la deformare să scadă de aproximativ 1,5 ori, ajungând la 155 MPa, ecruisarea dispărând complet;

- adăusul de Ce în aliajele Mg-Mn schimbă mult comportarea la deformare a acestora; astfel deformarea aliajelor la temperatura de 300°C nu depinde de valoarea reducerii aplicate și nu se constată apariția ecruisării; creșterea în continuare a temperaturii până la 450°C nu schimbă practic

Tabelul 16.3

Compoziția chimică și proprietățile mecanice ale unor aliaje cu bază de magneziu

Nr. crt.	Tipul aliajului	Compoziția chimică, % (conținutul în elemente de aliere restul magneziu)				Proprietăți mecanice		
		Al	Zn	Mn	Alte elemente	R _c MPa	R _m MPa	A ₅ %
1.	Aliaje cu rezistență mică	-	-	1,3 ... 2,5	Max 0,02 Be	120	200	8
2.	Aliaje deformabile	-	-	1,3...2,2	0,15...0,35 Ce	150	250	7
3.		0,4...0,8	-	1,0...1,8	0,08...0,3 Ca	230	260	10
4.		3,8...5,0	0,8...1,5	-	-	180	280	12
5.		7,8...9,2	0,2...0,8	0,15...0,5	-	220	300	14
6.	Aliaje refractare	-	5...6	-	0,3...0,9 Zr	280	330	9
7.		-	-	1,5...2,5	2,5...4,0 Nd	140	280	10
8.	Aliaje pentru turnare	-	-	1,2...2,0	0,1...0,25 Ni	-	-	-
9.		2,3...3,5	0,5...1,5	0,15...0,5	2,5...3,5 Th	55	180	8
10.		7,5...9	0,2...0,8	0,15...0,5	-	120	240	3
11.		-	0,1...0,7	-	0,4...1,0 Zr	120	240	5
12.		-	-	-	2,2...2,8 Nd	90	200	6
					0,5...1,0 Zr			
					0,5...4,0 Th			

comportarea acestor aliaje în timpul deformării; datorită tendinței de ecruisare relativ slabe a acestor aliaje, temperatura de sfârșit de deformare poate fi de până la 280...300°C, această concluzie fiind valabilă și pentru cazul aliajelor Mg-Mn fără adăugare de Ce;

- aliajele din sistemul ternar Mg-Zn-Zr sunt de asemenea sensibile la variația vitezei de deformare; astfel, la deformarea statică, plasticitatea acestor aliaje este foarte mare, atingând chiar 90% într-un interval larg al temperaturilor de deformare (200...450°C), în timp ce la deformarea dinamică plasticitatea scade de peste 2 ori, fiind de maxim 30...40% într-un interval de temperatură de 250...400°C;

- rezistența la deformare a aliajelor Mg-Zn-Zr în funcție de temperatură și gradul de deformare diferă ca mod de variație, față de celelalte tipuri de aliaje; astfel, la 300°C procesul de ecruisare conduce la creșterea continuă a rezistenței la deformare în funcție de deformația aplicată, în timp ce la 350°C și grade de reducere de peste 20% apare procesul de dedurificare și valoarea absolută a rezistenței la deformare nu depășește 120 MPa (față de circa 200 MPa la 300°C); micșorarea în continuare a rezistenței la deformare pe măsură ce gradul de reducere crește este consecința efectului termic al deformației, în special la viteze de deformație mari.

În ceea ce privește intervalul de temperaturi recomandat pentru desfășurarea proceselor de deformare la cald se va avea în vedere că temperatura superioară a intervalului nu va depăși 410°C, datorită tendinței aliajului la supraîncălzire, iar temperatura de sfârșit de deformare nu va coborî sub 320°C la deformarea dinamică și respectiv 280°C la deformarea statică, pentru a se asigura totuși caracteristici de deformabilitate corespunzătoare aliajului.

16.4.2. Regimul termomecanic de laminare

Temperatura de laminare. Din studiul deformabilității aliajelor speciale de magneziu rezultă că laminarea acestor aliaje, la temperaturi de 250°C sau mai coborâte nu este recomandată ca urmare a apariției și intensificării procesului de ecruisare, creșterea valorilor rezistenței la deformare și reducerea plasticității.

Durificarea aliajelor de magneziu crește pe măsură ce viteza de deformație este mai mare.

Micșorarea rezistenței la deformare și creșterea plasticității are loc, în funcție de compoziția aliajelor, de la 300...325°C în sus, când fenomenul de ecruisare practic nu mai apare și în special când deformarea are loc cu viteze mici de deformare (deformare statică).

Gradul total de reducere aplicat produce modificări structurale în aliajele de magneziu și, ca efect, variația proprietăților mecanice ale acestora. Se constată că anizotropia maximă cât și scăderea proprietăților mecanice ale produselor deformate apar la grade totale de deformare din intervalul 50...70 %.

La grade de deformare de minimum 95% se obțin mult mai uniforme proprietățile mecanice pe direcție longitudinală și transversală, respectiv anizotropia acestora se reduce la minimum, iar nivelul absolut al acestor proprietăți crește.

În ceea ce privește *valoarea gradului critic de deformare*, aceasta nu depășește, pentru majoritatea aliajelor de magneziu 10...15%. Spre deosebire de aliajele de aluminiu, la procesul de recrystalizare a aliajelor de magneziu, are influență însemnată și viteza de deformare. Astfel, la viteze mici de deformare procesul de recrystalizare are loc începând cu temperatura de 350°C pe când la viteze ridicate de deformare recrystalizarea se produce la temperaturi mult mai înalte. Pentru obținerea unor structuri omogene de recrystalizare la aliajele de magneziu, se recomandă ca gradul de reducere pe fiecare etapă (trecere) de deformare să fie mai mare de 15%.

Viteza de deformare. Din studiul diagramelor de plasticitate a aliajelor de magneziu rezultă că gradul maxim de deformare, prin care se apreciază plasticitatea aliajelor, scade odată cu creșterea concentrației elementelor de aliere și, în același timp, depinde și de valoarea vitezei de deformare. Astfel, se poate admite că pentru majoritatea aliajelor industriale de magneziu, gradul maxim de deformare în condiții dinamice nu depășește 30...50%, în timp ce la deformarea statică același parametru atinge valori de 70...90%. De asemenea, rezistența la deformare variază mult în funcție de viteza de deformare, atingând valori de 1,5...2 ori mai mari în cazul deformării dinamice comparativ cu deformarea statică.

Viteza de încălzire și răcire a aliajelor deformate. Valoarea ridicată a conductivității termice a aliajelor de magneziu permite încălzirea lor în vederea deformării cu viteză mare. Se recomandă ca timpul de încălzire al semifabricatelor să fie de circa 1,5...2 min pentru fiecare milimetru de grosime sau de diametru a acestora, indiferent dacă sunt în stare de turnare (lingouri) sau de deformare.

Durata de menținere a semifabricatelor în cuptoare la temperatura de încălzire pentru laminare trebuie să fie riguros reglementată având în vedere că depășirea valorilor optime conduce la înrăutățirea proprietăților mecanice a produselor deformate, în special ca urmare a tendinței de supraîncălzire a acestor aliaje. *Răcirea* după laminare a aliajelor de magneziu se realizează în aer.

Aliajele speciale din sistemul Mg-Mn cu eventuale adausuri de Ce au plasticitatea mare, atât la deformarea la cald cât și la deformarea la rece și, ca atare, pot fi prelucrate prin orice procedeu de deformare plastică (laminare, extrudare, forjare).

Aliajele speciale cu bază de magneziu din sistemul Mg-Al-Zn-Mn au valorile rezistenței la deformare mult mai mari și parametrii de plasticitate mai mici, aceștia din urmă micșorându-se continuu pe măsură ce crește concentrația aluminiului în aliaj.

Aceste aliaje vor trebui deformate prin procedee care pot asigura schema mecanică a deformăției cu valori ridicate ale presiunii hidrostatice, la care eventualele tensiuni de întindere să aibă valori cât mai mici și, de asemenea, cu valori reduse ale vitezei de deformare, cum este cazul extruziunii sau matrițării închise.

Aliajele speciale Mg-Zn-Zr fac parte din grupa celor cu plasticitate redusă și, ca atare, prelucrarea lor se va asigura tot prin scheme mecanice ale deformării caracteristice extruziunii sau matrițării închise.

LAMINAREA ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE CU BAZĂ DE TITAN

Titanul și aliajele cu bază de titan au masa specifică mică, rezistența mecanică specifică mare, atât la cald cât și la rece, rezistența la fluaj bună, proprietăți refractare ridicate, rezistența la coroziune mare, având coeficientul de dilatare termică mic (circa jumătate din cel al oțelurilor inoxidabile) și conductivitatea, de asemenea, mică.

Aliajele de titan se întrebuintează în primul rând pentru rezistența lor specifică mare și pentru comportarea lor bună la coroziune. Sunt utilizate în *construcțiile aeronautice* pentru realizarea învelișului avioanelor, pentru realizarea fuzelajelor avioanelor precum și pentru confecționarea componentelor destinate motoarelor cu reacție (paletele și bridele compresoarelor, conducte etc), în *tehnica rachetelor* pentru realizarea corpurilor motoarelor pentru a doua și a treia treaptă și a buteliilor pentru stocarea gazelor lichefiate și comprimate, în *industria chimică* pentru echipamente care lucrează în atmosferă de clor umedă și în medii de soluții apoase și acide de clor și pentru schimbătoare de căldură care lucrează în acid sulfuric, în *construcțiile navale* pentru confecționarea elicelor propulsoare, pentru învelișul navelor marine și submarine cu propulsie atomică și pentru torpile și în *energetica nucleară* pentru realizarea de echipamente necesare tratamentului combustibilului nuclear. Aliajele de titan sunt foarte plastice la temperaturi scăzute, motiv pentru care sunt utilizate în tehnica frigului.

Unele proprietăți specifice ale titanului, ca de exemplu, *afinitatea* mare pentru elementele interstițiale oxigen, hidrogen, azot și carbon face ca prelucrarea acestuia să se efectueze după metode specifice care să preîntâmpine contaminarea cu asemenea elemente, care constau în desfășurarea operațiilor tehnologice în incinte vidate sau cu atmosfere de protecție de argon. Oxidarea titanului are ca rezultat formarea unui strat de oxid deosebit de aderent și fragil, care conduce la scăderea prelucrabilității titanului și aliajelor sale. Cu celelalte elemente interstițiale, titanul formează compuși chimici deosebit de stabili, care împreună cu oxizii superficiali determină scăderea accentuată a plasticității și tenacității titanului pur și a aliajelor sale.

La utilizarea titanului și aliajelor de titan trebuie să se țină seama și de anumite inconveniente cum sunt *prelucrabilitatea prin așchiere* scăzută, situată între cea a oțelurilor de scule și cea a superaliajelor de nichel sau cobalt și tendința de deteriorare a pieselor supuse la frecare prin alunecare (oboseală cu frecare) datorită coeficientului de frecare mare și conductivității termice scăzute.

17.1. PROPRIETĂȚI FIZICO-MECANICE ȘI TEHNOLOGICE ALE METALULUI DE BAZĂ

Titanul este situat în subgrupa IV B a sistemului periodic al elementelor fiind considerat, la fel ca și omologii săi superiori zirconiu și hafniu, metal greu fuzibil datorită temperaturii sale de topire foarte ridicate (1725°C).

Greutatea specifică a titanului, 4,5 g/cm³, ocupă un loc mijlociu între greutatea specifică ale celor două metale principale folosite în industrie, fierul (7,86 g/cm³) și aluminiul (2,70 g/cm³), de aceea titanul este considerat metal semiușor. Principalele proprietăți fizice ale titanului sunt arătate în tabelul 17.1.

Tabelul 17.1

Proprietățile fizice ale titanului

Proprietatea	Unitatea de măsură	Valoarea
Numărul atomic	-	40
Masa atomică	-	47,90
Volumul atomic	cm ³ /atom g	10,6
Stări de oxidare	-	+2, +3, +4
Configurație electronică	-	[Ar] 3d ² 4s ²
Densitatea (20°C)	kg/dm ³	4,5
Transformări polimorfice	-	α↔β
Temperatura de transformare polimorfică	°C	882
Rețeaua cristalină a fazei α	-	h.c.
Parametrul rețelei α (25°C)	Å	a = 2,9504 c = 4,6833 c/a = 1,587
Rețeaua cristalină a fazei β	-	c . v . c .
Parametrul rețelei β (900°C)	Å	a = 3,3065
Temperatura de topire	°C	1725 ± 10
Temperatura de fierbere	°C	3625
Căldura specifică (20°C)	J/kg K (cal/g·grd)	473,10 (0,113)
Coeficientul de conductibilitate termică (25°C)	W/mK (cal/cm·grd·s)	171,6 (0,41)
Coeficientul de dilatare termică liniară (25°C)	grd ⁻¹	8,5·10 ⁻⁶
Rezistivitatea electrică (0°C)	Ohm·m	43,5·10 ⁻⁸
Secțiunea eficace de absorbție a neutronilor termici	barni	5,8±0,4

Caracteristicile mecanice ale titanului tehnic depind în mare măsură de natura și conținutul impurităților și, implicit, de procesul de obținere. Titanul foarte pur posedă plasticitate remarcabilă, alungirea putând atinge valoarea de 60%, însă rezistența mecanică este relativ mică, 220...260 MPa. La cantități chiar foarte mici de impurități de impurități existente în titanul tehnic plasticitatea se micșorează, alungirea scăzând la 25...30%, în schimb se mărește substanțial rezistența mecanică până la valori de 540...640 MPa. În tabelul 17.2 se prezintă comparativ caracteristicile mecanice ale titanului pur și ale titanului tehnic.

Proprietățile mecanice ale titanului

Denumirea proprietăților mecanice	U.M.	Titan pur obținut prin iodurare din TiI ₄		Titan tehnic obținut prin magnezio-termie	
		Recapt în vid la 750°C	Retopit în vid și turnat	Retopit în vid, turnat și recapt	Sinterizat în vid
Modul elasticitate E	MPa	78400	112000	105000	117600
Rezistența la rupere	MPa	224	258	560...820	560
Limita de curgere	MPa	122	137	500...770	450
Alungirea, A ₅	%	55	62...70	12...25	7...25
Stricțiunea, Z	%	60	85...88	35...60	25...30
Reziliența, KCU	N/cm ²	200	250	50...70	50
Duritatea, HB		95	105	115...185	185

Titanul este un element *activ chimic*, în seria electrochimică a metalelor ocupând un loc între beriliu și magneziu și ar fi trebuit să se corodeze puternic în mediile electrolitice. Totuși, în prezența oxigenului, pe suprafața metalului se formează o peliculă superficială de protecție și titanul se pasivează, manifestând o excepțională stabilitate la coroziune, mai bună chiar decât a oțelurilor inoxidabile.

Datorită proprietăților anticorozive pe care le are, titanul se folosește în construcții navale, pentru conducte de abur de înaltă presiune, pentru utilaje care lucrează la temperaturi mari în procese chimice și, de asemenea, în construcții aerospațiale. Proprietățile chimice ale titanului, comparativ cu ale unor aliaje sunt prezentate în tabelul 17.3.

Tabelul 17.3.

Proprietățile chimice ale titanului și ale altor materiale metalice

Denumirea proprietăților	Titan	Aliaj de aluminiu 2024	Oțel inoxidabil 18-8
Temperatura de topire, °C	1725	520...640	1235...1420
Masa specifică, g / cm ³	4,5	2,79	7,7
Structura cristalină	T<882°C - HC(α) 882°C <T<T _{topire} - CVC(β) 1,75 (Ti ⁺⁺)	CFC	CFC
Potențialul de electrod la 25°C		1,67 (Al ⁺⁺⁺)	0,44 (Fe ⁺⁺)
Conductibilitate termică, cal / cm*s*°C	0,0367	0,2957	0,0395
Coeficient de dilatare liniară α*10 ⁻⁶	9,0	23,9	16,3
Căldura specifică, cal/g*°C	0,13	-	0,12
Rezistivitatea, μΩ / cm ³	61	-	70

Prin recrystalizarea titanului tehnic deformat la rece, în intervalul de temperaturi care corespunde fazei α (circa 700°C) se formează o structură poliedrică cu grăunți fini. Dacă gradul de reducere a fost mai mare de 85%, nu se modifică textura de recrystalizare, însă la grade de reducere mai mici, de circa 50...60%, textura de recrystalizare se deosebește de textura de deformare.

17.2. PRINCIPALELE PROPRIETĂȚI ALE ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE TITAN DESTINATE LAMINĂRII

Aliajele deformabile cu baza de titan au structura formata din fază α , fază β și fază $\alpha+\beta$ (fig. 17.1...17.3).

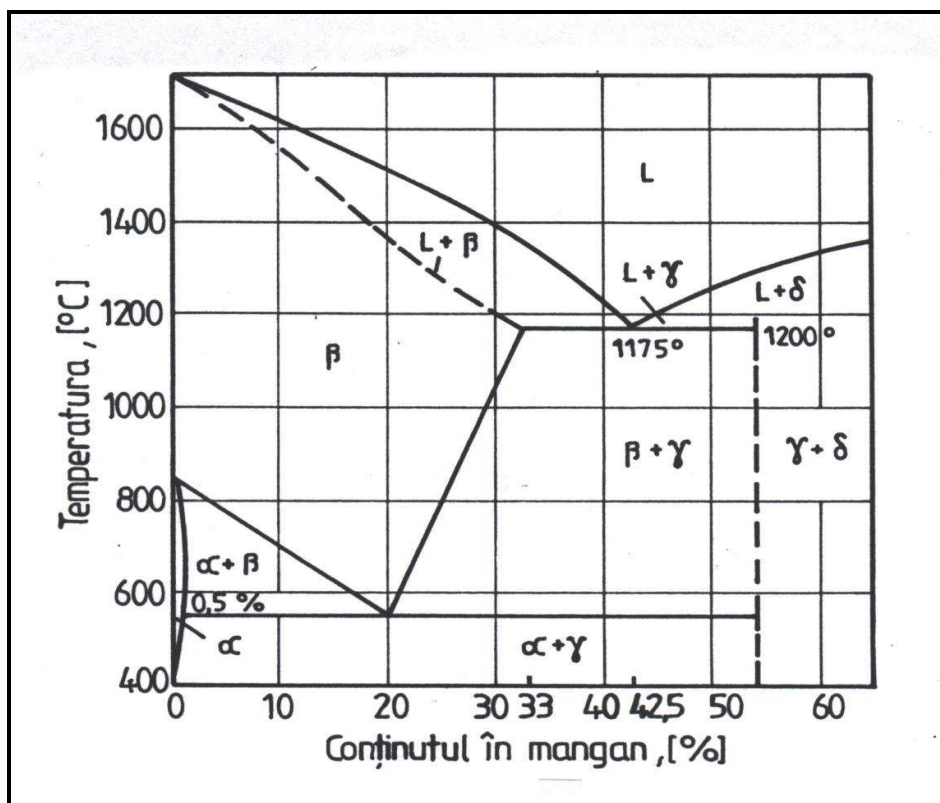


Fig. 17.1. Diagrama de echilibru a aliajelor binare titan-mangan.

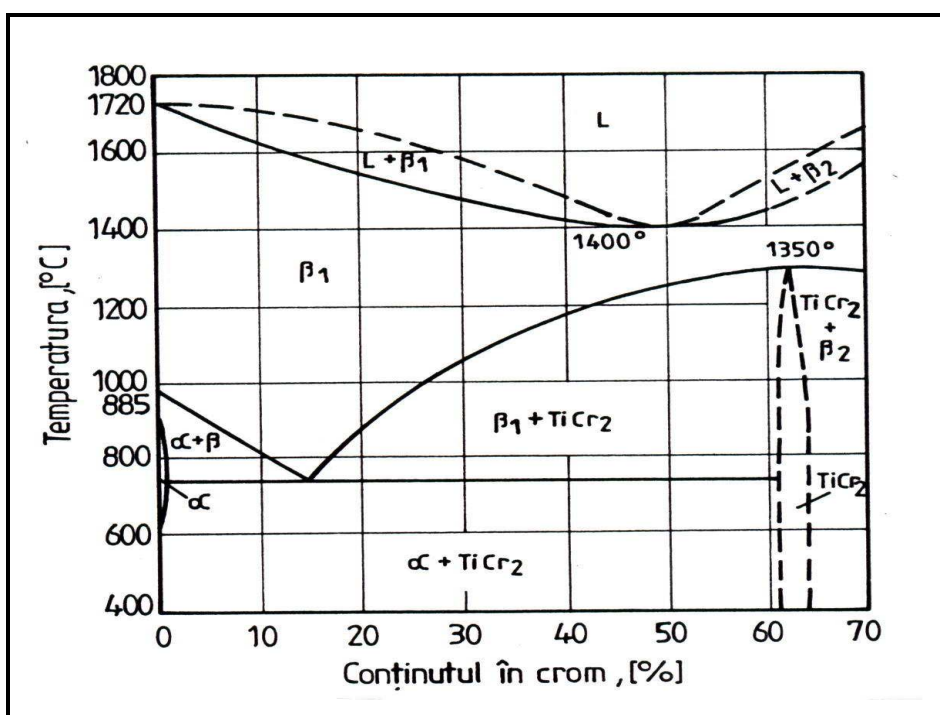


Fig. 17.2. Diagrama de echilibru a aliajelor binare titan-crom.

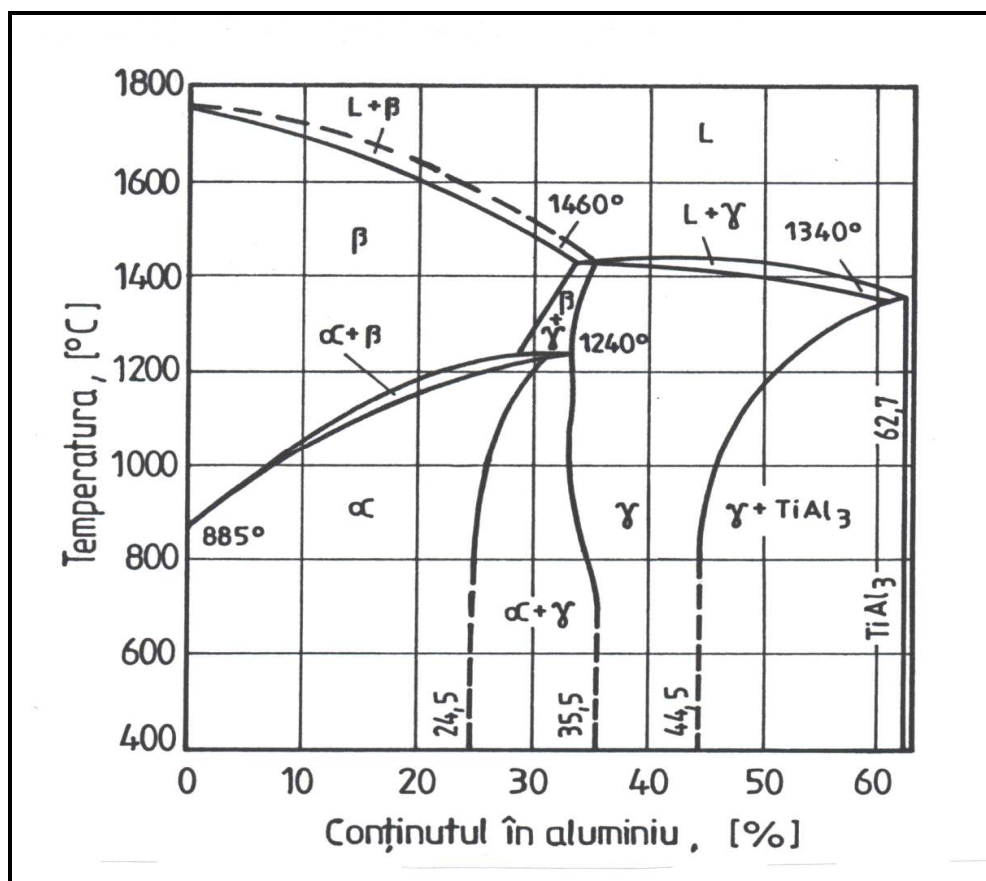


Fig. 17.3. Diagrama de echilibru a aliajelor binare titan-aluminiu.

Faza α este soluție solidă de substituție cu bază de titan, rezultată în urma dizolvării în titan a diferitelor elemente de aliere, până la 2,5%Cu sau 6%Al. Faza β este de asemenea soluție solidă de substituție cu bază de titan, stabilizată la temperatura ordinară de diferite elemente de aliere (Cu, Fe, Mo, V, Cu etc).

Aliajele de titan utilizate în practică se pot clasifica având la bază mai multe criterii: modul de prelucrare, proprietățile (în special rezistența mecanică), structura și domeniile de utilizare.

a) După modul de prelucrare, aliajele de titan se împart în două mari categorii: aliaje *deformabile* și aliaje *pentru turnătorii*. Spre deosebire de alte metale, în cazul aliajelor pe bază de titan nu există deosebiri esențiale între compozițiile chimice ale celor două tipuri de materiale.

b) După proprietăți, se clasifică în aliaje cu plasticitate mare și *rezistență medie*, suficient de plastice și cu *rezistență mecanică mare*, cu rezistență foarte mare la *coroziune*, cu proprietăți mecanice deosebite la *temperaturi sub 0°C*, aliaje *superplastice*, aliaje *supraconductoare*, aliaje *amorfe*, aliaje cu *memoria formei* etc.

Principalele aliaje deformabile de titan se clasifică în următoarele grupe în funcție de rezistența lor mecanică și de utilizări la temperatura ambiantă:

- aliaje cu *rezistență mecanică mică* (sub 600 MPa), având conținutul scăzut de elemente de aliere (Ti-1,5Al-1Mn); sunt destinate realizării de piese cu configurații complexe, care nu lucrează sub sarcini mari; în această grupă poate intra și titanul tehnic pur;

- aliaje cu *rezistență mecanică medie* (600...1000 MPa), sunt mediu aliate (3...6%Al, ca element principal de aliere, Mn, V și alte elemente) și au plasticitatea tehnologică satisfăcătoare; sunt destinate realizării de piese forjate și matrițate fără aplicarea de tratamente termice; din această categorie face parte aliajul Ti-4Al-4Mn cel mai utilizat aliaj pentru forjare matrițare și aliajele Ti-5Al și Ti-6Al-4V cu rezistență mecanică mare (tabelul 17.4) refractaritate mare și o bună sudabilitate;

Tabelul 17.4

Caracteristici mecanice ale aliajelor de titan; comparație

Caracteristica de material	Aliaj de titan (6Al-4V)	Aliaj de aluminiu (7075)	Oțel inoxidabil (A 321)
Rezistența mecanică specifică (R_m / γ),			
- În stare recoaptă	80	33	29
- După tratament termic (*-ecruisat prin laminare)	117	81	52*
Temperatura maximă în exploatare, °C	427	204	871

- aliaje de *întărită rezistență mecanică* (peste 1000 MPa) care, pe lângă aluminiu, se aliază și cu 1...7%Mo; un aliaj reprezentativ pentru această grupă și care posedă și plasticitate satisfăcătoare este aliajul Ti-1Al-3Mo-1V;

- aliaje *refractare* folosite frecvent la compresoarele motoarelor cu reacție, unde reperele lucrează la temperaturi de peste 400°C; din această grupă se poate exemplifica aliajul cu 6,5%Al-3%Mo-1%Zr-0,25%Si cu rezistență mecanică mare, stabilitatea termică bună și plasticitate satisfăcătoare la deformarea la cald.

c) După domeniile de utilizare, aceste materiale metalice pot fi grupate în următoarele categorii: aliaje pentru construcții sudate, aliaje pentru construcția de autovehicule, aviație, tehnica spațială, industria chimică, navală, în criogenie și cu domenii speciale.

d) După structură, aliajele se grupează în trei categorii:

- aliaje cu structură α - elementele de aliere se dizolvă în $Ti\alpha$;
- aliaje cu structură β - elementele de aliere determină stabilitatea acestei structuri la temperatura mediului ambiant;
- aliaje cu structură $\alpha+\beta$ - bifazice, care la rândul lor se împart în aliaje bifazice tipice, aliaje pseudo α și aliaje pseudo β .

Aliajele pseudo α sunt aliaje α care conțin în structură cantități mici de fază β , circa 3...10%, îmbunătățind caracteristicile mecanice și tehnologice ale aliajelor α , cele pseudo β fiind aliaje β care conțin în structură cantități mici de fază α care îndeplinește rolul de durificator în procesele de călire și îmbătrânire.

Proprietățile mecanice ale aliajelor de titan sunt direct legate de structura lor. Astfel, aliajele monofazice sunt ductile și sudabile, în timp ce aliajele bifazice sunt sudabile, dar cu ductilitate mai scăzută. Aliajele de titan α au plasticitatea mică, dar pot fi prelucrate prin deformare plastică, au temperaturi de tranziție scăzute și rezistență la oxidare bună. Aliajele de titan β au cea mai mare plasticitate, dar cea mai mică rezistență, pe care o păstrează până la 540°C.

Rezistența la temperaturi mari a aliajelor de titan este asociată cu aliajele α și pseudo α . Totuși, când rezistența la fluaj nu este un factor în aplicațiile la temperaturi ridicate, rezistența la tracțiune a aliajelor β au avantaj distinct (fig.17.4 a). În figura 17.4 b se remarcă faptul că până la temperatura de 425°C aliajele β au rezistența mai mare decât oțelurile de scule, iar aliajele α sau pseudo α nu se compară cu aceste oțeluri din punctul de vedere al rezistenței specifice.

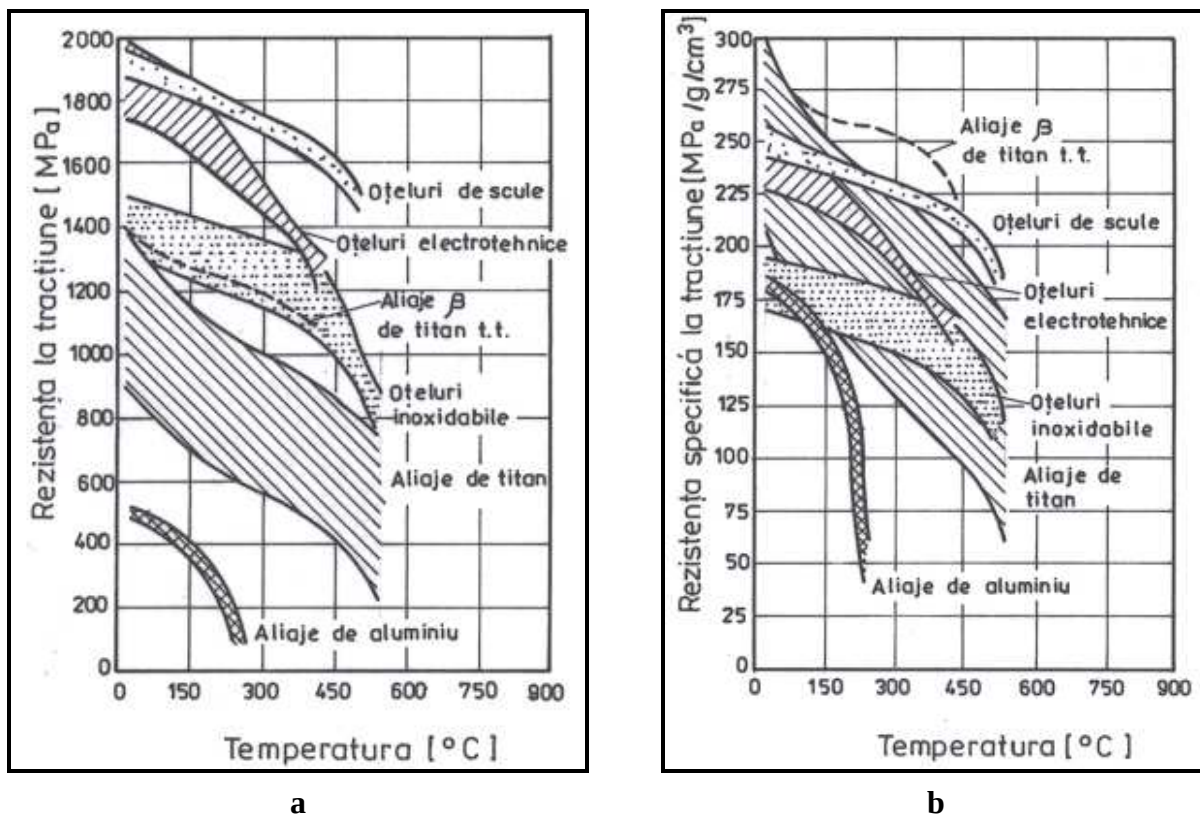


Fig. 17.4. Compararea rezistenței la tracțiune de scurtă durată (a) și a raportului rezistență la tracțiune/densitate (b) pentru aliajele de titan, trei clase de oțeluri și aliaje dure de aluminiu. Nu sunt incluse datele pentru aliaje recoapte cu alungire mai mică de 10% sau pentru aliaje tratate termic cu alungire mai mică de 5%.

Aliajele bifazice ($\alpha+\beta$) sunt mai rezistente decât aliajele monofazice α și pot fi durificate în continuare prin tratamente termice. Se pot deforma plastic ușor și au rezistența mare la fluaj până la temperatura de 450°C.

Ca urmare a structurii HC a $Ti\alpha$ sistemele de alunecare sunt reduse și, ca atare, deformarea la temperaturi sub 882°C se efectuează cu dificultate în timp ce la temperaturi ridicate, sistemele de alunecare corespunzătoare $Ti\beta$ (CVC) sunt în număr mult mai mare și, corespunzător, deformabilitatea materialului crește.

Creșterea temperaturii cât mai aproape de 882°C, dar fără a depăși această valoare, conduce la continua creștere a plasticității titanului și a aliajelor sale.

Având în vedere aceste caracteristici structurale ale titanului se recomandă ca deformarea să se efectueze pe cât posibil în intervalul de temperatură de 1200...800°C sau 600...500°C pentru produse cu grosime mai mică.

În ceea ce privește *proprietățile tehnologice* ale aliajelor de titan, acestea pot fi prelucrate prin toate procedeele cunoscute de deformare la cald și la rece.

Astfel, laminarea se utilizează pentru obținerea tablelor, benzilor și țevelor la cald sau la rece, forjarea liberă se utilizează ca procedeu intermediar pentru producerea semifabricatelor în vederea distrugerii structurii de turnare, matrițarea pentru producerea de piese destinate construcțiilor aerospațiale, extrudarea pentru obținerea profilurilor, sârmelor și țevelor, iar tragerea se utilizează pentru obținerea barelor, țevelor și sârmei la rece.

În cazul forjării și matrițării se recomandă aplicarea de grade de deformare unitare mari, dar cu grade de reducere totale mici, pentru a se ține sub control procesul de recrystalizare. De asemenea, trebuie avut în vedere că la deformarea cu viteze mari, titanul și aliajele sale nu au timpul necesar pentru recrystalizare și ca atare plasticitatea scade. În consecință se va ridica *limita superioară* a intervalului optim de temperatură pentru deformare prin forjare cu 20...100°C în funcție de tipul de aliaj. În ceea ce privește *limita inferioară* a temperaturii de deformare la cald, aceasta nu trebuie să fie sub 700°C, practic pentru toate tipurile de aliaje. În general această temperatură variază între 800 și 850°C.

Particularitatea aliajelor de titan de a avea o viteză redusă de recrystalizate a condus la realizarea unor tehnologii de *prelucrare termomecanică*, prin care se ameliorează foarte mult caracteristicile mecanice fără a fi necesare tratamente termice ulterioare.

În ceea ce privește procesul de recrystalizare al unor aliaje de titan, s-a

Tabelul 17.5 constatat că *gradul critic* de deformare se situează între 8...12%,

Gradul critic de deformare ($D_0=20\mu\text{m}$)			
Aliajul	T înc, °C	ε_{cr} , %	D_{cr}/D_0
Ti pur	815	8	7
Ti-0,08%C	650	10	5
Ti-0,05%N	600	12	4
Ti-0,144W	815	12	6

fiind influențat de condițiile de deformare și încălzire, de structura inițială și de cantitatea și natura elementelor de aliere.

În tabelul 17.5 se prezintă ε_{cr} și mărimea grăuntelui recrystalizat pentru unele aliaje de titan aflate în stare laminată.

Plasticitatea titanului și a aliajelor sale scade rapid în prezența unui strat superficial oxidat, apărând fisuri, care pot constitui concentratori de tensiune, care la rândul lor pot distruge piesa prin dezvoltarea fisurilor marginale spre interiorul acesteia. Fisurile se formează cu precădere la extrudare sau tragere când lubrifiantul nu este corespunzător, fiind prea vâscos, generând astfel tensiuni de întindere mari. Pentru evitarea formării stratului oxidat, fragil, de la suprafața aliajelor de titan, se recomandă ca încălzirea semifabricatelor înaintea prelucrării prin deformare să se facă în cuptoare cu atmosferă neutră de argon sau în vid.

17.3. INFLUENȚA ELEMENTELOR DE ALIERE ÎN ALIAJELE SPECIALE CU BAZĂ DE TITAN

În afara elementelor de aliere obișnuite pentru titan, respectiv Al, Mn, Mo, V, Si, Cr se întâlnesc și aliaje care conțin 2...4%Co, în scopul îmbunătățirii proprietăților mecanice fără micșorarea proprietăților de plasticitate. Cobaltul în

structură conduce la stabilizarea fazei β fiind deci un element beta-stabilizator, borul în proporție de 1,5...2% influențează favorabil proprietățile mecanice ale aliajelor de titan, wolframul în proporție de 0,35...4,8% conferă aliajelor rezistență la rupere în jurul valorii de 1000 MPa și limită de curgere cuprinsă între 300 și 950 MPa, cât și o sudabilitate bună.

Influența oxigenului, azotului și carbonului, ca impurități, este foarte mare în aliajele de titan micșorându-le plasticitatea și, în schimb, le mărește rezistența la rupere și mai ales duritatea. Un procent de circa 0,05%O₂ mărește rezistența la rupere cu 60 MPa, un procent de circa 0,05%N₂ mărește rezistența la rupere cu 125 MPa, iar un procent de 0,05%C mărește rezistența la rupere cu 35 MPa.

Acțiunea însumată a celor trei elemente asupra proprietăților mecanice este foarte mare, chiar la cantități foarte mici ale acestora, dar prezența lor conduce la diminuarea altor proprietăți și în mod deosebit a plasticității, refractarității și stabilității, de aceea conținutul lor se limitează la max 0,1%N₂, 0,2%C și 0,2%O₂.

17.4. PARAMETRII TEHNOLOGICI DE DEFORMARE A ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE TITAN

17.4.1. Încălzirea aliajelor speciale de titan în vederea deformării

Deformarea la cald a aliajelor speciale de titan comparativ cu deformarea oțelurilor sau a aliajelor de Ni, Al, Cu etc. este diferită, în special ca urmare a acțiunii chimice mari pe care o are titanul față de anumite gaze la *temperaturi ridicate* și a sensibilității mari la apariția diferențelor mari de temperatură în secțiunile de dimensiuni mari.

Așa cum s-a arătat, ca urmare a dizolvării gazelor (oxigen, hidrogen și azot) în titan sau în aliajele sale, în timpul încălzirii scade plasticitatea acestora. În mod special o acțiune deosebit de nefavorabilă în acest sens o are hidrogenul care la o concentrație de peste 0,015 % produce scăderea puternică a plasticității titanului și aliajelor sale.

În afară de aceasta, încălzirea aliajelor speciale de titan la temperaturi înalte conduce la intensificarea proceselor de recristalizare și, ca urmare, are loc creșterea pronunțată a granulației care, de asemenea, micșorează plasticitatea și înrăutățește calitatea produselor deformate.

O importanță deosebită o are nu numai temperatura de încălzire ci și *viteza* cu care se realizează încălzirea, *timpul* de menținere la încălzire sau reîncălzire și *atmosfera* cuptorului. În primul rând trebuie avut în vedere că conductibilitatea termică a titanului și a aliajelor sale la temperaturi relativ scăzute este foarte mică. La temperatura ambiantă de exemplu, conductibilitatea termică a titanului este doar de 3% din cea a cuprului și de circa 3,8 ori mai mică decât cea a oțelurilor nealiate. Cu creșterea temperaturii, conductibilitatea termică a aliajelor de titan se mărește și se apropie de valoarea corespunzătoare oțelului. Aceasta are repercusiuni asupra vitezei de încălzire a aliajelor de titan la diferite temperaturi. Astfel, de exemplu, pentru un semifabricat cu grosimea de 200 mm dintr-un aliaj cu 4,0 ..6,2%Al și 2,0..3,0%Cr timpul de încălzire până

la 400°C este de circa 200 minute, iar pentru încălzirea în continuare la 1100°C sunt necesare doar 100 de minute. Deci, încălzirea aliajelor de titan în intervalul temperaturilor joase se efectuează într-un timp mult mai lung decât în cazul încălzirii aceluiasi semifabricat în intervalul temperaturilor ridicate (fig.17.5).

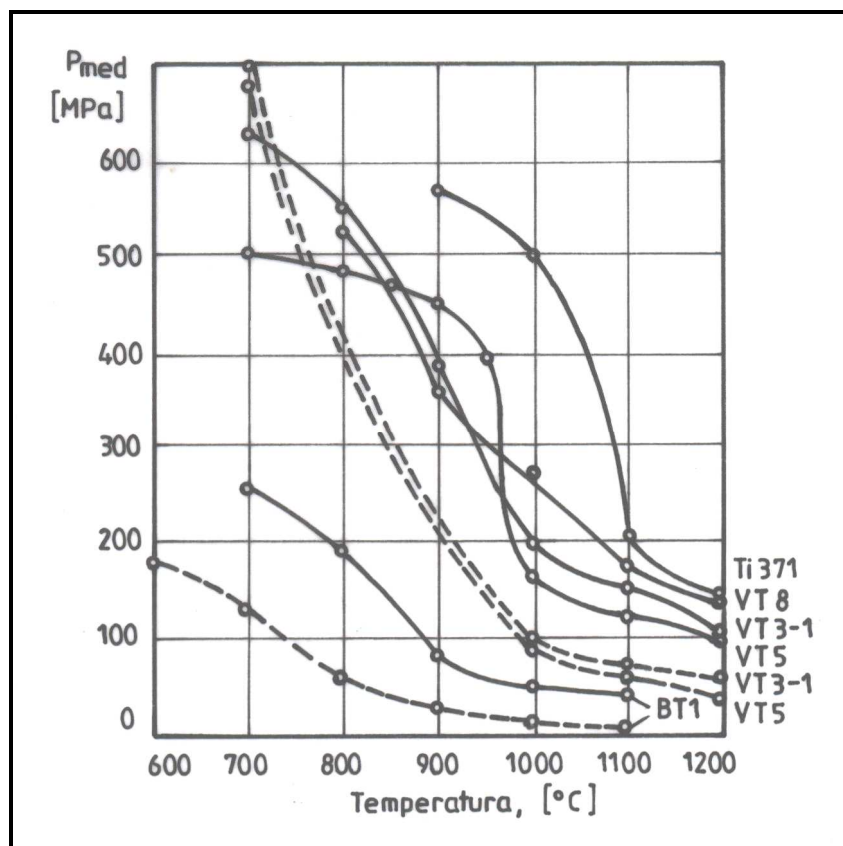


Fig. 17.5. Variația presiunii medii de deformare în funcție de temperatură la refularea cu reducerea de 40% pentru diferite aliaje de titan:
 --- în stare deformată prin forjare la ciocan; — deformată la presă.

Conductibilitatea termică relativ scăzută a aliajelor de titan conduce la apariția unui *gradient de temperatură* între centrul și suprafața semifabricatelor cu valori foarte mari. În figura 17.6 se observă că, încălzindu-se la 1100°C, semifabricate din același aliaj menționat mai sus, însă cu grosimi diferite, gradientul de temperatură între centru și suprafața materialului crește foarte intens, în special în perioada de începere a încălzirii, ajungând la peste 100°C după circa 10 minute de încălzire, scăzând însă repede odată cu creșterea duratei de încălzire.

În acest sens, se poate admite că pentru încălzirea uniformă a semifabricatelor destinate deformării la cald în cuptoare obișnuite sunt necesare circa 30 s menținere pentru fiecare milimetru de grosime a semifabricatului.

Mărimea gradientului de temperatură dintre centrul și suprafața semifabricatelor supuse încălzirii depinde și de *temperatura finală* de încălzire și *gradul de aliere* a titanului. Astfel, odată cu creșterea grosimii semifabricatului, a temperaturii de încălzire și a gradului de aliere a titanului, se mărește și gradientul de temperatură dintre centru și suprafața semifabricatului supus încălzirii existând pericolul apariției fisurilor datorită tensiunilor termice.

În tabelul 17.6 se prezintă valorile gradientului de temperatură pentru semifabricate cu grosimi de 100...200 mm din titan tehnic și, respectiv, din aliajul VT3 încălzite la temperaturi cuprinse în intervalul 400...1000°C.

Tabelul 17.6

Gradientul de temperatură la încălzire pentru titan și pentru aliajul VT3

T, °C	Δt , °C	
	Titan tehnic	Aliaj VT3
400	10...30	15...35
600	35...70	60...110
800	60...140	100...190
1000	85...190	115...280
Compoziția aliajului: Al=4,0...6,2%; Cr=2...3%.		

Pentru evitarea apariției fisurilor datorate tensiunilor termice (care pot degenera în crăpături în timpul deformării) în cazul încălzirii semifabricatelor groase la temperaturi ridicate, se recomandă încălzi-rea în trepte, respectiv o preîn-călzire a semifabricatelor cu viteză mai mică până la temperatura de 800...850°C.

În afară de temperatură și de timpul de încălzire, la încălzirea semifabricatelor din titan și aliajele sale trebuie să se țină seamă și de atmosfera cuptoarelor, având în vedere marea afinitate față de gaze a titanului. Din figura 17.7 rezultă că în cazul unui aliaj cu 4-5,5%Al, încălzit la 1100-1150°C, timp de 4 ore într-un cuptor cu atmosferă reducătoare sau oxidantă, comparativ cu încălzirea în cuptor electric, cantitatea de hidrogen dizolvată în aliaj este de 0,0175%, 0,012% și, respectiv, 0,008%. Deci, condiții bune de încălzire a aliajelor de titan în vederea deformării, se pot asigura în cuptoare electrice cu atmosferă protectoare de argon sau heliu, în special atunci când prin deformare trebuie asigurate precizia dimensională ridicată și calitatea superioară a suprafeței produsului deformat.

În cazul încălzirii în trepte, cu preîncălzire până la 800...850°C

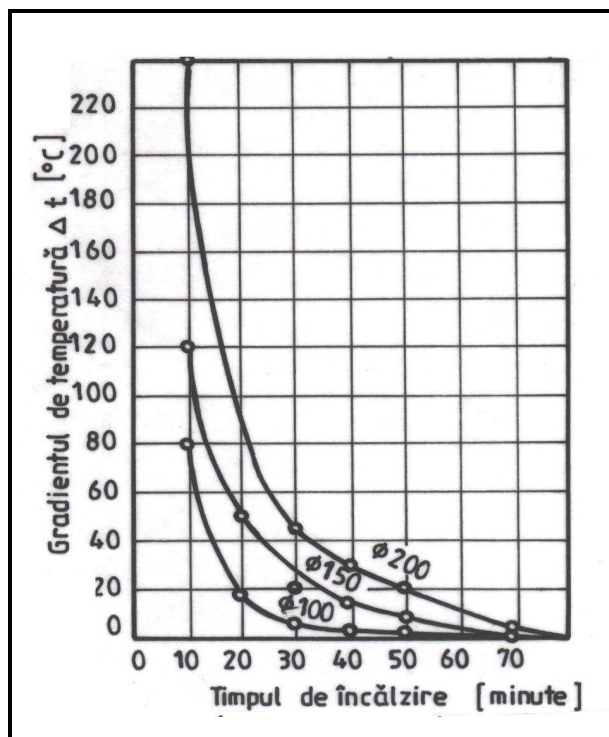


Fig. 17.6. Variația gradientului de temperatură pe secțiunea semifabricatelor din aliajul VT3 încălzit la 1100°C în funcție de timpul de încălzire.

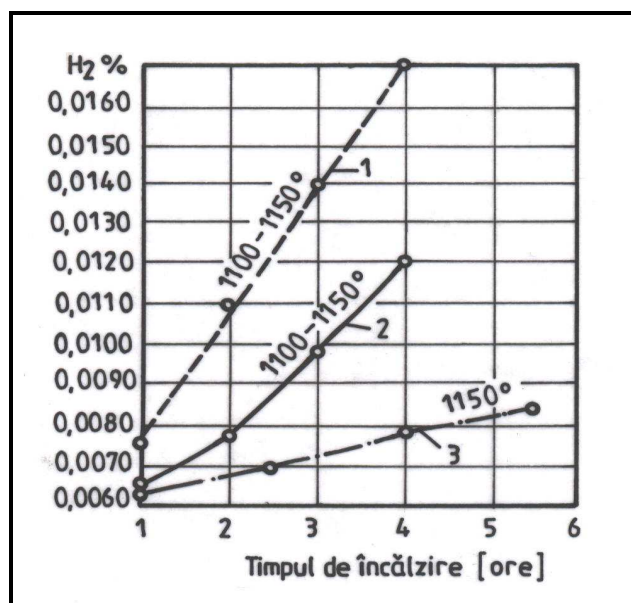


Fig.17.7. Variația rezilienței aliajului VT5 încălzit la 1100...1150°C în funcție de timpul de încălzire și tipul cuptorului:
1 - cuptor cu atmosferă reducătoare; 2 - cuptor cu atmosferă oxidantă; 3 - cuptor electric.

semifabricatele practic nu vor dizolva hidrogen în această perioadă, indiferent de durata în care are loc preîncălzirea. La încălzirea în a doua etapă, până la temperaturi ridicate, dizolvarea hidrogenului în aliaj are loc chiar și în cuptoarele electrice de încălzire, dacă acestea nu sunt etanșe, conținutul de hidrogen crescând practic liniar cu timpul de încălzire până la 0,015...0,016 % pentru temperatura de 1200°C. Prezența hidrogenului în structura aliajelor de titan și creșterea concentrației sale, pe măsură ce durata de încălzire este mai mare, conduce la reducerea caracteristicilor de plasticitate a aliajelor și în special a rezilienței (fig.17.8).

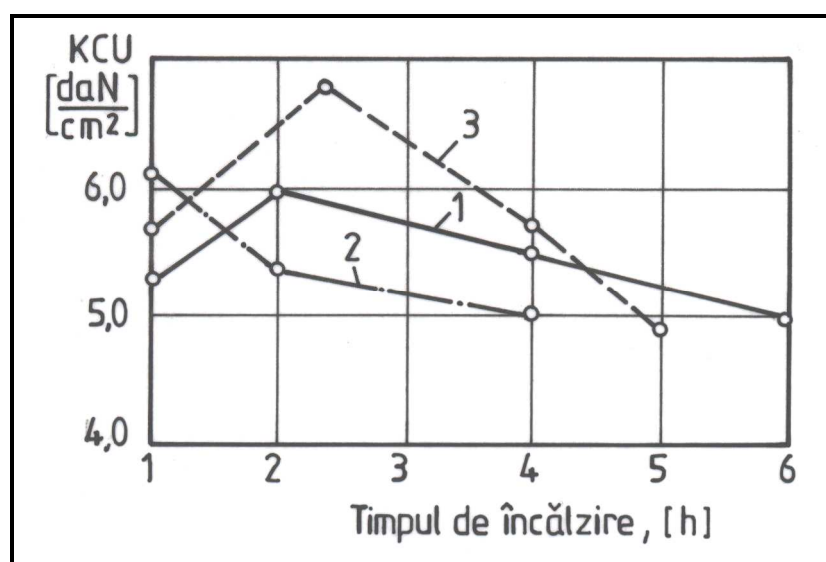


Fig. 17.8. Variația rezilienței aliajului VT5 în stare deformată în funcție de tipul de încălzire în diferite cuptoare:
1 - cuptor cu atmosferă reducătoare; 2 - cuptor cu atmosferă oxidantă; 3 - cuptor electric.

În ceea ce privește procesul de oxidare a semifabricatelor din titan și aliajelor sale în timpul încălzirii, s-a constatat că, în timp ce hidrogenul se dizolvă în toată masa semifabricatului, oxidarea are loc numai la suprafață, într-un strat cu grosimea relativ mică. Stratul oxidat poate fi ușor îndepărtat prin prelucrare mecanică, decapare sau prin alte metode.

Deci, aliajele speciale ale titanului, în măsură mult mai mare decât alte aliaje, sunt sensibile la condițiile de încălzire. Această sensibilitate este intensă în special în cazul aliajelor cu structură de deformare, structura de turnare practic nu își modifică proprietățile în funcție de condițiile de încălzire.

17.4.2. Parametrii tehnologici de deformare

Pentru *aprecierea deformabilității* aliajelor speciale de titan se prezintă rezultatele încercărilor de tracțiune, comprimare și reziliență, aplicate unor probe din aceste aliaje atât în stare turnată cât și în diferite stări de deformare prealabilă. Încercările menționate s-au desfășurat într-un interval de temperaturi cuprins între 600 și 1200°C, luându-se în studiu atât titanul tehnic pur VT-1 cât și șase mărci de aliaje speciale de titan VT3, VT3-1, VA4, VT5, VT6 și VT8 (conform GOST).

Compoziția chimică a aliajelor considerate se găsește în tabelul 17.7 care prezintă principalele mărci de aliaje speciale de titan și compoziția chimică a acestora.

Tabelul 17.7.

Mărci de aliaje speciale cu bază de titan și compoziția lor chimică		
Tipul de structură	Marca aliajului (după GOST; ASTM)	Compoziția chimică medie %
α	VT 1 - 00	Titan tehnic
	VT 1 - 0	Titan tehnic
	VT 5	5 Al
	VT 5 - 1	5 Al; 2,5 Sn.
	Ti-7Al-12Zr	7 Al; 12 Zr.
	Ti-5Al-5Sn-5Zr	5 Al; 5 Sn; 5 Zr.
β	VT 15	2,3...3,6Al; 6,8...8,0Mo; 9,5...11,0Cr; 1Zr.
	Ti-30Mo-5Zr	30 Mo; 5 Zr.
	Ti-10Mo-20Nb	10 Mo; 20 Nb.
$\alpha + \beta$	VT 3	5,5 Al; 2,5 Cr.
	VT 3 - 1	6 Al; 2,5 Mo; 0,2 Cr; 0,3 Si; 0,5 Fe.
	VT 6	6 Al; 4,5 V.
	VT 8	6,5 Al; 4,5V.
	VT 14	4,5 Al; 3 Mo; 1 V.
	VT 22	5 Al; 5 Mo; 5 V; 1 Fe; 1 Cr.
	VT 23	5 Al; 2 Mo; 4,5 V; 0,7 Fe; 1 Cr.
	Ti-7Al-4Mo	7 Al; 4 Mo.
	Ti-Mo-V-Pd	0...4 Mo; 0...5 V; 0...2 Pd.
	Ti-Al-Mn-Nb	2...5 Al; 0,2...1,5 Mn; 4...10 Nb.
Pseudo α	VT 20	6 Al; 2 Zr; 1 Mo; 1 W.
	VT 4 - 1	4 Al; 1,5 Mn.
	Ti-Al-Y	4,3...6,2 Al; 0,005...0,25 Y.
	Ti-Cr-Fe	0,6 Cr; 0,4 Fe.
	Ti-Al-Sn	4...6,2 Al; 0,005...0,25 Sn.
Pseudo β	VT 19	2,5...3,5 Al; 5...6 Mo; 3...4 Y; 5...6 Cr; 1Zr.
	Ti-Mo-Cr	2,3...3,6 Al; 6,8...8,2 Mo; 9,5...11,0 Cr.
	Ti-Nb-W	3,0...4,5 Nb; 3,0...4,5 W.
	Ti-Ta-Mo	0,4...2,0 Ta; 1,2...6,0 Mo.
	Ti-Cr-Mo-V	15...16 Cr; 2...3 Mo; 2...3 V.

Pentru aliajele speciale de titan luate în studiu, în diagramele din figurile 17.9...17.15 se reprezintă curbele de deformabilitate la cald. Din examinarea diagramelor de deformabilitate prezentate rezultă următoarele:

- prin aliere, plasticitatea aliajelor scade, iar gradul de aliere influențează cu atât mai mult cu cât este mai joasă temperatura de deformare;
- scăderea plasticității, odată cu micșorarea temperaturii, este mai pronunțată la aliajele cu structură inițială de turnare decât la cele cu structură de deformare;
- dacă se ia în considerare și condițiile în care au fost elaborate aliajele (în cuptoare electrice cu arc sau cu inducție), trebuie menționat că prezența carbonului (provenit din electrozi sau căptușeala cuptorului) în aliaj dă naștere la carburi de titan fragile, care se dispun sub forma de pelicule sau cuiburi în jurul

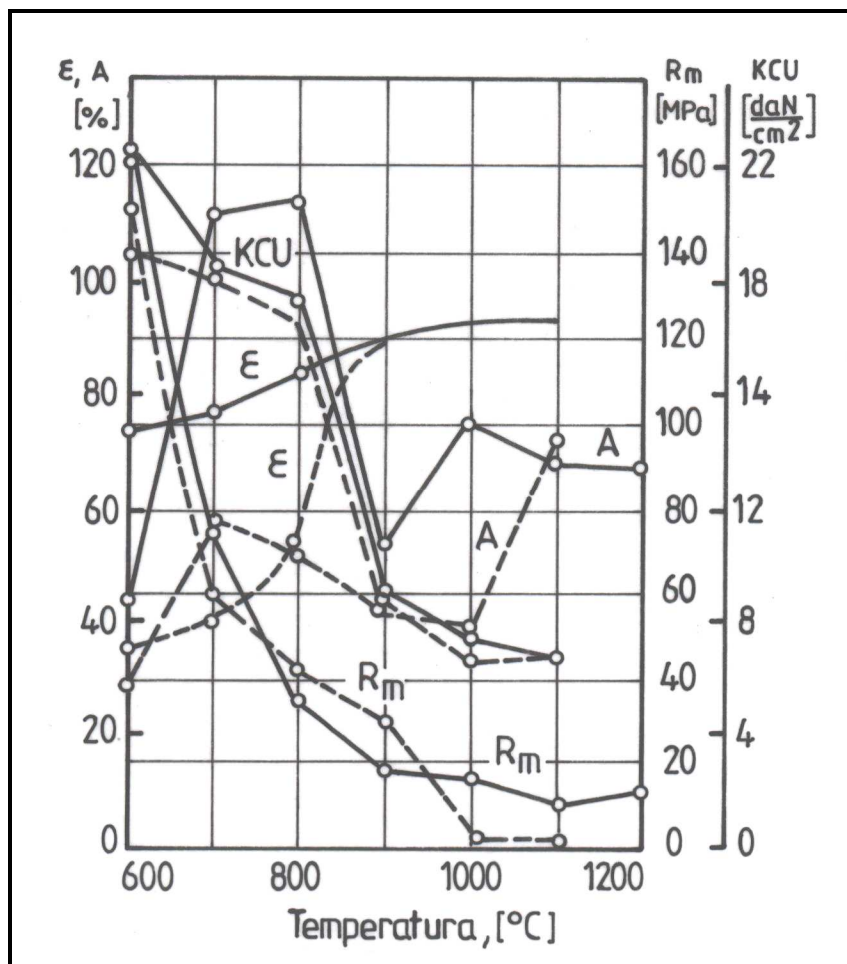


Fig. 17.9. Diagramme de deformabilitate la cald a aliajului VT1:
 --- în stare turnată; — în stare deformată.

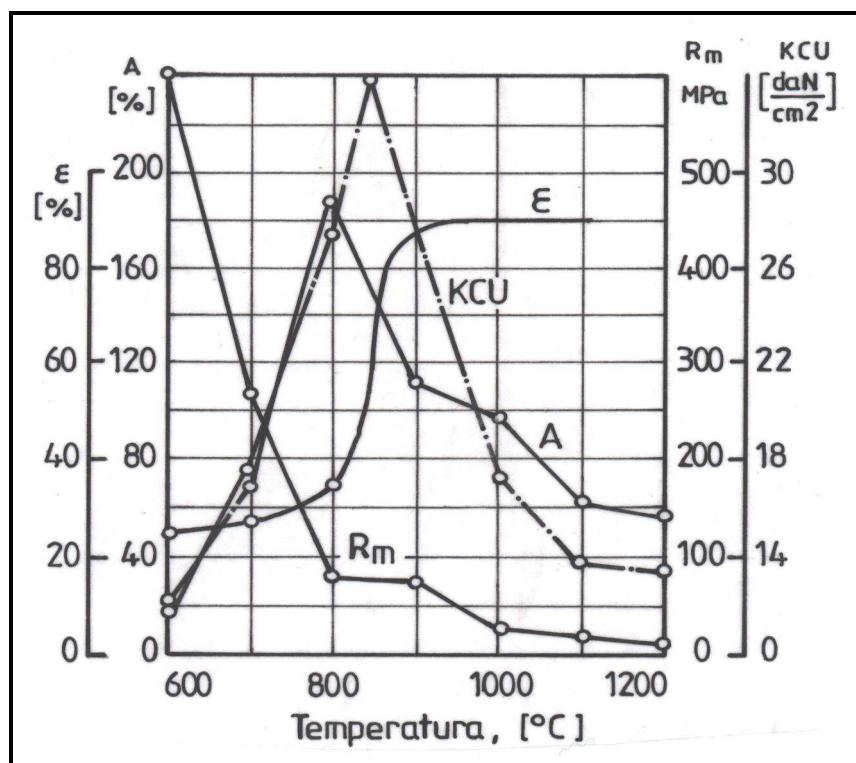


Fig. 17.10. Diagramme de deformabilitate la cald pentru aliajul VT3 în stare deformată.

grăunților și plasticitatea va scădea brusc, în special la structura de turnare și, în consecință, va fi necesară creșterea temperaturii pentru atingerea maximumului de plasticitate; pentru structura de turnare concentrații ale carbonului de peste 0,4% produc efectul menționat, în timp ce structura de deformare, la aceeași concentrație de carbon, este practic insensibilă;

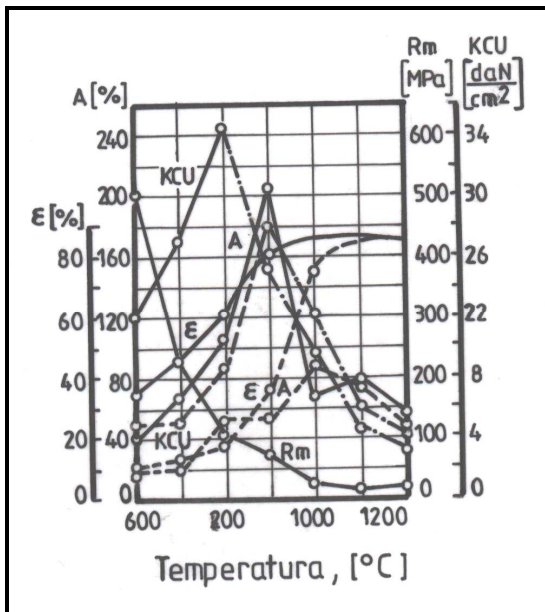


Fig. 17.11. Diagrammele de deformabilitate la cald pentru aliajul VT3-1: --- turnat; — deformat.

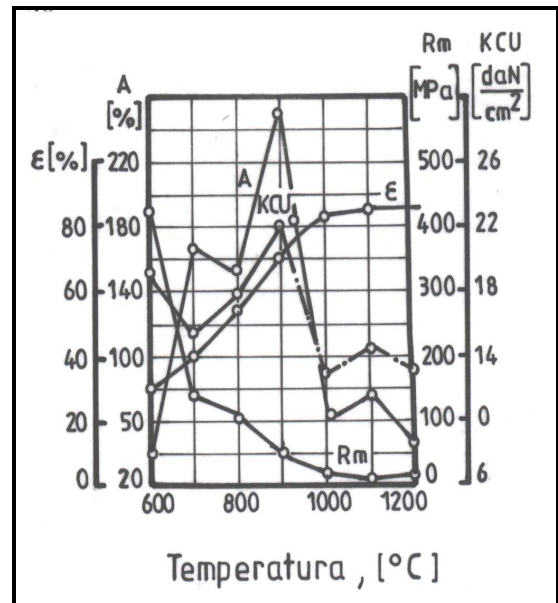


Fig. 17.12. Diagrammele de deformabilitate la cald pentru aliajul VT4 în stare deformată.

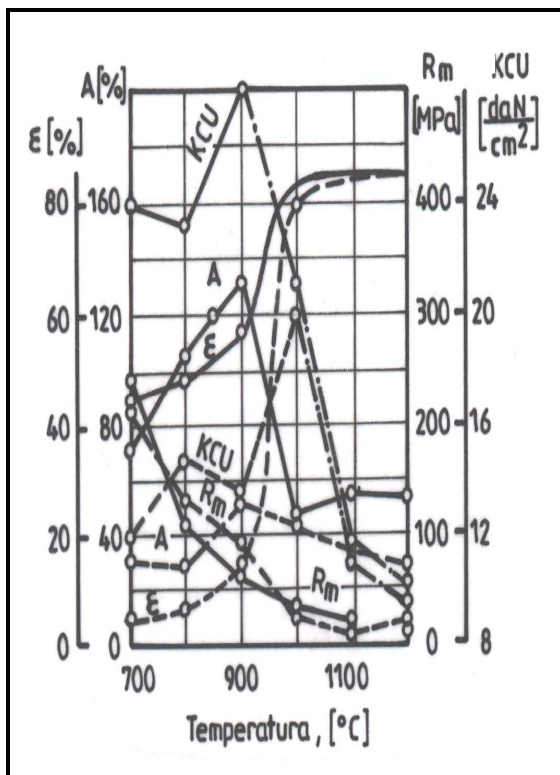


Fig. 17.13. Diagrammele de deformabilitate la cald pentru aliajul VT5 : --- turnat; — deformat.

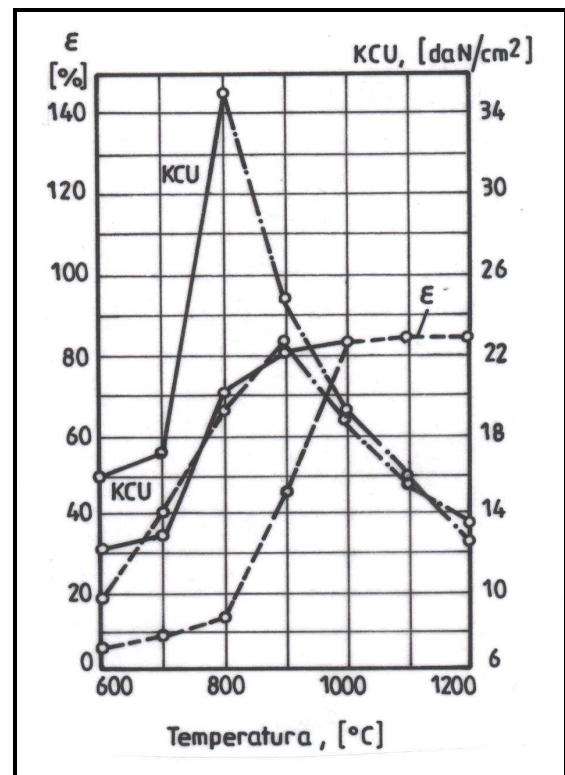


Fig. 17.14. Diagrammele de deformabilitate la cald pentru aliajul VT6 : --- turnat; — deformat.

- scăderea plasticității aliajelor ca urmare a prezenței carbonului în compoziție este mai intensă, decât scăderea plasticității ca urmare a alierii titanului (în special în starea turnată);

- la reducerea plasticității titanului și aliajelor sale pe lângă prezența carbonului și a elementelor de aliere o influență puternică o au și incluziunile gazoase (în special oxigenul);

- în lipsa unor elemente dăunătoare, plasticitatea aliajelor în stare turnată, la temperaturi superioare valorii de 900...1000°C, este apropiată de cea obținută la aceleași aliaje cu structură de deformare.

Asupra plasticității titanului și aliajelor sale o influență deosebită o au și viteza de deformare și gradul de deformare aplicate în timpul procesului de prelucrare plastică prin presiune la cald.

Din cercetările efectuate privind deformarea aliajului de titan VT2 prin forjare la presă (viteza de deformare $v = 0,003 \text{ m/s}$) și la ciocan ($v = 9 \text{ m/s}$) a reieșit că aliajul în stare turnată nu poate fi deformat mai mult de 45% prin forjarea la ciocan, în timp ce prin deformarea la presă s-a ajuns la o reducere de 60% (fig.17.16).

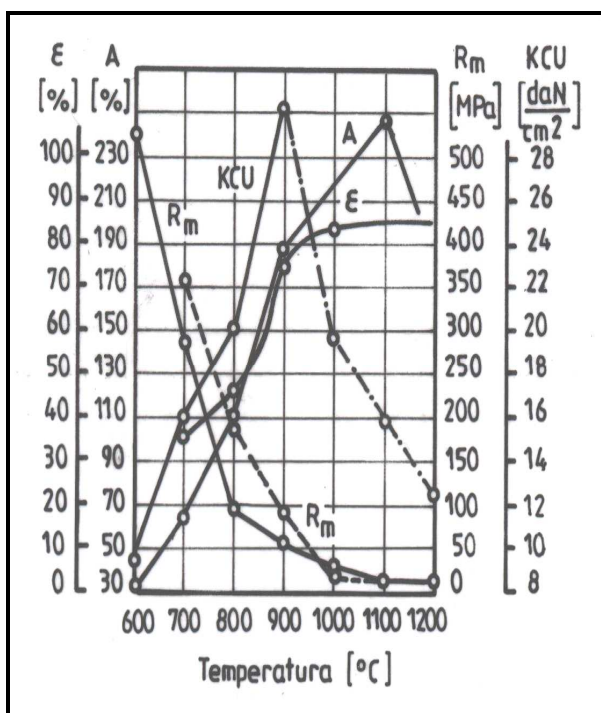


Fig. 17.15. Diagramele de deformabilitate la cald pentru aliajul VT8:

--- în stare turnată; — în stare deformată.

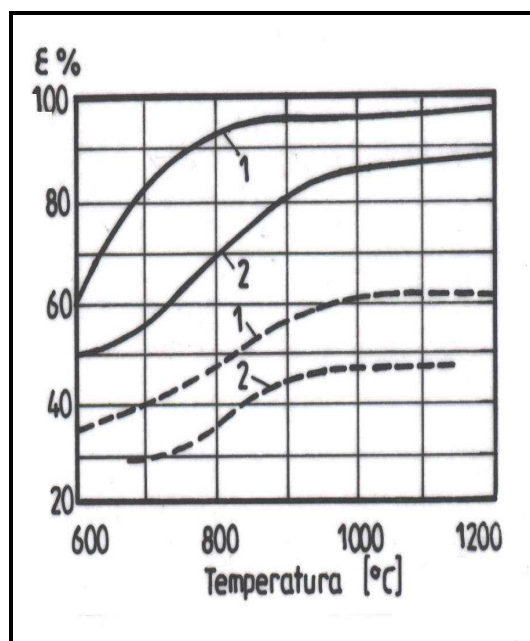


Fig. 17.16. Gradul de deformare admis la deformarea la cald în funcție de temperatură pentru aliajul VT2:

1 - deformare la presă; 2 - la ciocan;

--- stare turnată; — stare deformată.

Pentru aliajele luate în studiu și menționate mai sus, gradul maxim de reducere care se poate aplica la deformarea prin forjare la ciocane este redat, în funcție de temperatură, în diagrama din figura 17.17, din care rezultă că plasticitatea acestor aliaje se apropie de cea a titanului (atât în stare turnată cât și în stare deformată) pentru temperaturi superioare valorii de 1000°C.

Din curbele prezentate în figura 17.17 rezultă și un alt fapt interesant și anume: caracterul variației $\epsilon = f(t^\circ)$ este similar pentru aliajele din aceeași grupă

structurală (aliaje α sau aliaje $\alpha+\beta$), dar diferă de la o grupă structurală la alta (aliajele VT5 și Ti 371 (Ti-2,7Al-13Sn) și respectiv aliajele VT3, VT6, VT8).

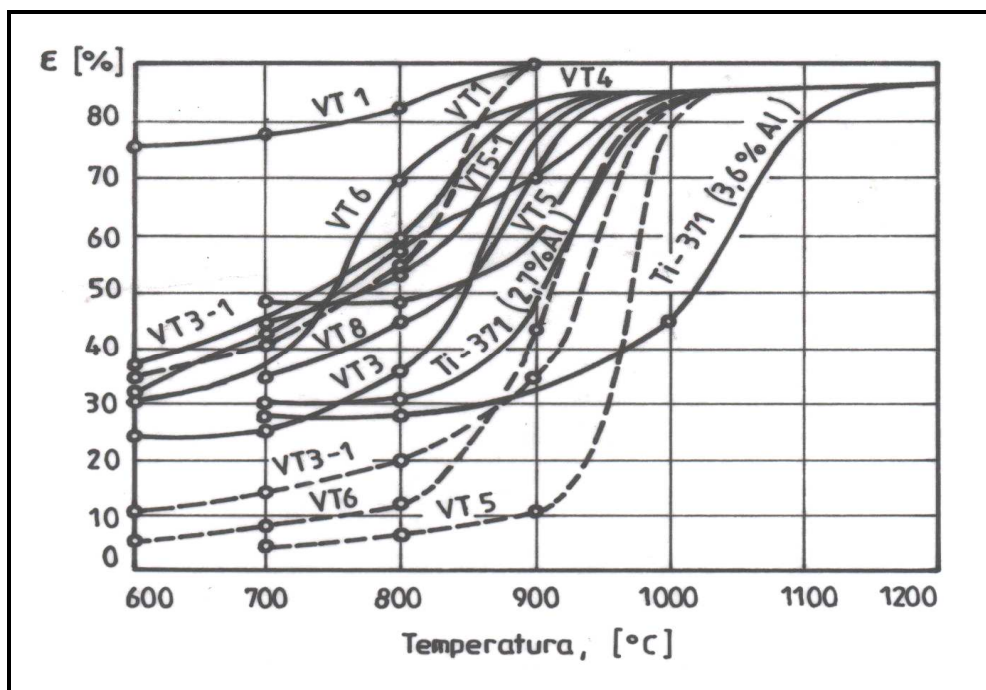


Fig. 17.17. Gradul de deformare la cald în funcție de temperatură pentru diferite aliaje speciale cu bază de titan:
--- în stare turnată; — în stare deformată.

Astfel, se constată că pentru aliajele α scăderea plasticității ca urmare a reducerii temperaturii, este mai puțin intensă în comparație cu cea corespunzătoare aliajelor bifazice $\alpha+\beta$. Acest fenomen se explică prin intervalul mai mare de temperatură al transformării $\alpha \rightarrow \beta$ la aliajele bifazice față de cel pentru aliajele α .

În ceea ce privește cel de al doilea parametru ce caracterizează deformabilitatea materialelor metalice, respectiv rezistența la deformare, se cunoaște că depinde, ca și plasticitatea, în primul rând de temperatura, viteză și gradul de deformare. Exprimându-se rezistența la deformare în cazul aliajelor luate în studiu, prin presiunea de deformare la forjare (v. fig.17.5) se constată următoarele:

- creșterea bruscă a presiunii ca urmare a măririi gradului de deformare și reducerii temperaturii, se explică prin aceea că odată cu scăderea temperaturii de deformare, proprietățile de rezistență ale aliajelor cresc și apar efecte, atât ale deformării la cald, cât și la rece, care asigură durificarea mult mai intensă a aliajelor, pe măsură ce crește gradul de deformare; dedurificarea la temperaturi joase nu poate avea loc în timpul deformării și, ca atare, are loc creșterea presiunii de deformare;

- scăderea presiunii de deformare odată cu măririi gradului de deformare, sau reducerea foarte bruscă a acesteia la deformarea dinamică (la ciocan) în intervalul de temperatură 700...900°C, se datorează apariției intense a efectului termic al deformației, care conduce la creșterea temperaturii semifabricatului supus deformării și implicit la reducerea presiunii de deformare, indiferent de

creșterea gradului de deformare; prin creșterea însă în continuare a gradului de deformare, începe desfășurarea intensă a procesului de ecruisare, care conduce la o nouă mărire a presiunii de deformare.

Creșterea presiunii de deformare prin forjare la ciocan, la temperaturi de 1000...1200°C și grade de deformare de peste 60...70%, trebuie explicată pe seama creșterii suprafeței de contact dintre corpul deformat și scule și reducerea corespunzătoare a înălțimii semifabricatului, care conduc la intensificarea răcirii acestuia și înrăutățirea condițiilor de deformare.

După cum rezultă din diagramele prezentate anterior în figura 17.6 la deformarea prin șoc, cum este cazul forjării la ciocane, aliajele de titan necesită o presiune de deformare de câteva ori mai mare decât în cazul deformării statice realizată la prese ce lucrează cu viteze mici de deformare.

Aceasta se explică prin aceea că, la deformarea la cald cu viteze mari, ecruisarea materialului este foarte puternică cu toate că temperatura de deformare este ridicată; luând naștere în același timp și o deformație elastică deosebit de importantă.

În aceste condiții pentru realizarea deformării va fi necesară o presiune de deformare și respectiv o forță de deformare mult mai mare.

Simultan cu aceste procese are loc și procesul de recrystalizare care, în cazul deformării în condiții dinamice nu reușește să asigure deplina dedurificare a materialului, în timp ce la deformarea statică recrystalizarea este practic completă și se asigură astfel atât scăderea rezistenței la deformare cât și creșterea plasticității materialului.

De asemenea se constată că la deformarea structurii de turnare (la ciocan sau la presă) este necesară o presiune de deformare ceva mai mare decât în cazul structurii obținute după o deformare prealabilă la cald. În același timp creșterea vitezei de deformare conduce și la mărirea neuniformității structurale a materialului deformat.

Creșterea puternică a presiunii de deformare se constată în special la alierea titanului cu aluminiu și staniu. Astfel, aliajele de tip VT5 și Ti371 prezintă o rezistență la deformare mult mai mare decât a aliajelor de tip $\alpha+\beta$.

Presiunea de deformare crește și datorită măririi gradului de deformare, în special când temperatura de deformare scade, respectiv spre sfârșitul procesului de deformare, ca urmare a creșterii suprafeței de schimb de căldură a produsului deformat. Pe acest considerent se recomandă ca la temperaturi de deformare ridicate (1000...1100°C) când rezistența la deformare a materialului nu este prea mare, să se aplice reduceri cât mai mari.

<http://marcel.suciu.eu/>

ECazym
MSuciu