

LAMINAREA MATERIALELOR METALICE SPECIALE

Partea a IV-a:

BAZELE LAMINĂRII ALIAJELOR SPECIALE ALE UNOR METALE NEFEROASE GRELE

Capitolul 12	Laminarea aliajelor neferoase speciale cu bază de cupru.....	149
12.1	Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice ale metalului de bază.....	149
12.2	Principalele proprietăți ale aliajelor speciale cu bază de cupru destinate laminării.....	155
12.3	Influența elementelor de aliere în aliajele speciale cu bază de cupru.....	159
12.4	Parametrii tehnologici de laminare a aliajelor speciale cu bază de cupru.....	165
Capitolul 13	Laminarea aliajelor neferoase speciale cu bază de nichel.....	179
13.1	Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice ale metalului de bază.....	179
13.2	Elemente de aliere și impurități în aliajele speciale cu bază de nichel....	182
13.3	Parametrii tehnologici de laminare a aliajelor speciale cu bază de nichel	185
Capitolul 14	Laminarea zincului și aliajelor cu bază de zinc.....	189
14.1	Proprietăți fizico-mecanice și tehnologice ale zincului.....	189
14.2	Elemente de aliere și impurități în aliajele cu bază de zinc.....	190
14.3	Parametrii tehnologici de laminare a zincului și aliajelor de zinc.....	191

Partea a IV-a: **BAZELE LAMINĂRII ALIAJELOR SPECIALE ALE UNOR METALE NEFEROASE GRELE**

Capitolul 12

LAMINAREA ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE CU BAZĂ DE CUPRU

Aliajele speciale cu bază de cupru posedă proprietăți fizico-chimice și mecanice deosebite, ceea ce determină utilizarea lor în cele mai variate domenii industriale. În funcție de proprietățile pe care le au și de domeniile de utilizare, aliajele cu bază de cupru pot fi refractare, criogenice, cu conductibilitate electrică sau termică mare, anticorozive, cu proprietăți mecanice ridicate sau pot fi aliaje pentru industria electrotehnică, navală, chimică, alimentară, construcții de mașini etc. Ținând seama de modul de prelucrare ulterioară, aliajele de cupru pot fi deformabile sau pentru turnătorie.

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

Pe plan mondial se cunosc mai multe varietăți comerciale de cupru care se pot clasifica, după procedeele de obținere sau de rafinare, în cupru de convertizor sau *cupru brut* cu 97,5...98 %Cu, cupru *rafinat termic* cu 99,0...99,75 %Cu și cupru *rafinat electrolitic* cu 99,75...99,95 %Cu, după gradul de puritate în funcție de conținutul în impurități și de natura lor, după forma de livrare în table, bare sau țevi și după starea de livrare - recopt sau ecruisat. Categoriile distincte sunt cuprul *cu conductibilitate electrică mare*, rafinat și elaborat în condiții speciale cu conținut minim de oxigen sau de alte impurități și cuprul *cu adaosuri speciale*, în cantități sub 1%, introduse la elaborare sau la dezoxidare, ca de exemplu cupru fosforat, cupru argintifer, cupru arseniat, cupru telurat etc.

Cuprul aparține grupei I B din sistemul periodic al elementelor și este un metal mai greu decât fierul. Greutatea specifică a cuprului, la 20 °C și la puritatea de 99,999 %, este de 8,9592 kg/dm³.

Sistemul de cristalizare al cuprului este cub cu fețe centrate (*c.f.c*). Până la temperatura de topire, care este 1083 °C, cuprul nu prezintă transformări alotropice. Parametrul de rețea se determină, în funcție de temperatură, cu relația:

$$a = 3,61293 + 5,81 \cdot 10^{-5} T + 3,7 \cdot 10^{-8} T^2 - 5,2 \cdot 10^{-11} T^3 \quad (12.1)$$

conform căreia, cu creșterea temperaturii, parametrul de rețea crește până la valoarea de 3,63958 Å, valoare pe care o atinge la temperatura de 1000 °C.

Creșterea gradului de ecruisare produce reducerea densității cu 0,17% pentru gradul de deformare la rece de 80 %. Coeficientul de dilatare liniară α are valoarea de $16,6 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$ la temperatura de 300°C, conductibilitatea termică

la 20 °C este 0,24 cm·grad / W, iar căldura masică C la temperatura de 20 °C, în stare ecruisată, are valoarea de 5,844 cal / atg la puritatea de 99,9 %, și de 5,835 cal / atg la puritatea de 99,999%, iar în starea recoaptă, valoarea căldurii masice a cuprului este de 5,823 cal / atg.

Rezistivitatea electrică variază în funcție de temperatură după relația:

$$\rho = (7,6 \cdot 10^{-3} T - 0,55) \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm} \quad (12.2)$$

Rezistivitatea electrică a cuprului pur, la 20 °C, este $\rho = 1,673 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$, iar a cuprului tehnic pur este $\rho = 1,682 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}$.

Cuprul posedă proprietăți de plasticitate foarte bune, de conductibilitate termică și electrică bune precum și de rezistență mare la coroziune, proprietăți care îl fac deosebit de apreciat în tehnică. Principalele proprietăți mecanice și fizice ale cuprului sunt prezentate în tabelul 12.1.

Tabelul 12.1

Proprietăți mecanice și fizice ale cuprului

Nr. crt.	Proprietatea	Unitatea de măsură	Valoarea
1.	Rezistența la rupere (laminat la cald)	MPa	250...270
2.	Rezistența la rupere (laminat la rece)	MPa	400...430
3.	Alungirea la rupere (laminat la cald)	%	40...50
4.	Alungirea la rupere (laminat la rece)	%	1...2
5.	Coeficientul de dilatare termică	grd ⁻¹	16,47·10 ⁻⁶
6.	Conductibilitatea electrică (20°C)	Ohm ⁻¹ m ⁻¹	0,6329·10 ⁸
7.	Conductibilitatea termică (20°C)	W/mK	386
		(cal/cm grds)	(0,923)
8.	Căldura latentă de topire	J/kg	211,18·10 ³
		(cal/g)	(50,44)
9.	Căldura specifică (25°C)	J/kg K	384
		(cal/g·grd)	(0,0919)
10.	Parametrul rețelei (20°C)	Å	3,61
11.	Rețeaua cristalină	-	c . f . c .
12.	Temperatura de fierbere	°C	2325
13.	Temperatura de topire	°C	1083
14.	Densitatea (20°C)	kg/dm ³	8,94
15.	Volumul atomic	cm ³ · mol ⁻¹	7,11
16.	Stări de oxidare	-	+1, +2, +3
17.	Configurația electronică	-	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹
18.	Greutatea atomică	-	65,57
19.	Numărul atomic	-	29

Aceste proprietăți depind foarte mult de *puritatea* cuprului. Gradul de puritate influențează puternic conductibilitatea electrică și termică a cuprului.

Influența impurităților asupra rezistivității electrice a cuprului este prezentată în figura 12.1, iar în figura 12.2 se prezintă influența procesului de laminare la rece asupra conductibilității electrice a cuprului.

Se observă că din punctul de vedere al conductibilității electrice, cele mai dăunătoare impurități din cupru sunt fosforul, siliciul, arseniul și aluminiul, iar cele mai puțin dăunătoare sunt argintul, cadmiul și zincul.

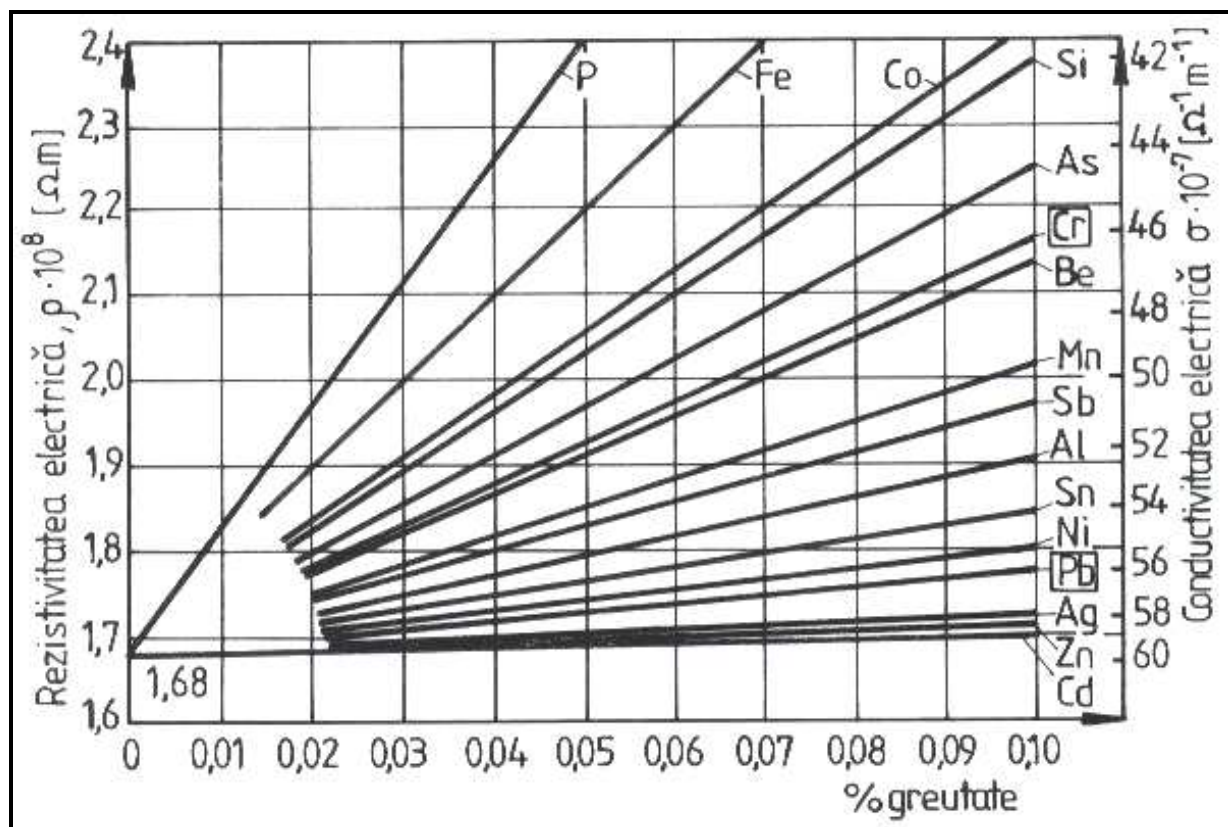


Fig.12.1. Influența impurităților asupra rezistivității electrice a cuprului.

Din punct de vedere magnetic, cuprul este un metal *diamagnetic*, susceptibilitatea magnetică a cuprului depinzând atât de elementele de aliere și de elementele însoțitoare ale cuprului, cât și de atmosfera în care are loc tratamentul termic de recoacere a cuprului (oxidantă sau reducătoare).

Proprietățile mecanice ale cuprului depind, de asemenea, foarte mult de gradul de puritate a acestuia, de natura impurităților prezente, în special oxigenul, de starea materialului metalic (turnat, laminat, recopt), de temperatura de încercare etc. Din cauza structurii cristaline cubice cu fețe centrate (*c.f.c.*), care prezintă multe planuri de mare densitate atomică, cuprul este un metal plastic, foarte maleabil și ductil, atât la cald cât și la rece. Datorită acestor proprietăți, prin laminare se pot obține folii de cupru cu grosimi de circa 2...3 microni.

În tabelul 12.3 se prezintă unele

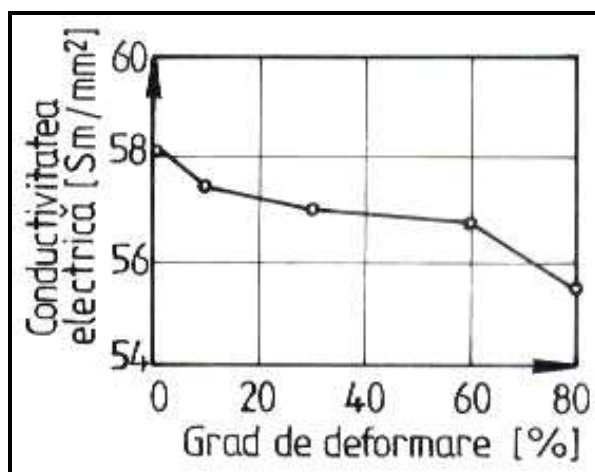


Fig.12.2. Influența deformării plastice la rece asupra conductibilității electrice a cuprului.

caracteristici tehnologice și mecanice ale cuprului de puritate tehnică.

Tabelul 12.3

Caracteristici tehnologice și mecanice ale cuprului tehnic

Nr. crt.	Denumirea	Unitatea de măsură	Valoarea
1.	Temperatura de turnare	°C	1150...1250
2.	Contrația la solidificare	%	2,1
3.	Temperatura de laminare la cald	°C	900...1050
4.	Temperatura de recristalizare	°C	220
5.	Temperatura de recoacere	°C	400...700
6.	Modulul de elasticitate, E;G	MPa	131000
	Longitudinal		49300
	Transversal		
7.	Stricțiunea, Z.	%	70...80
	Recopt		30...35
	Ecruiat		
8.	Limita de elasticitate, R _e .	MPa	25...30
	Recopt		100...140
	Ecruiat		
9.	Limita de curgere, R _c .	MPa	70...100
	Recopt		350...380
	Ecruiat		
10.	Rezistența la rupere, R _m .	MPa	170...220
	Recopt		420...450
	Ecruiat		
11.	Duritatea	HB	35...40
	Recopt		95...110
	Ecruiat		
12.	Alungirea la rupere, A ₁₀ .	%	35...50
	Recopt		5...6
	Ecruiat		

Impuritățile care sunt prezente în cupru, datorită condițiilor de elaborare și prelucrare, se pot grupa în impurități *foarte solubile*: Ag, Au, Zn, Al, Ga, Si, Ge, Fe, Co, Ni, Mn, Sn și Pt, în impurități *puțin solubile*: Mg, Ti, Zr, Cd, In, Be, Cr, As și Sb, în impurități practic *insolubile* în cuprul solid și care formează eutectice ușor fuzibile: plumb, bismut și taliiu și în impurități care formează cu cuprul compuși chimici *fragili*: oxigen, sulf, fosfor, seleniu și telur. Pentru două sortimente reprezentative de cupru utilizate în industria electronică și anume pentru *Cu-OFE* (cupru rafinat electrolitic, fără oxigen) și *Cu-PHCE* (cupru cu conductibilitate mare, cu conținut de fosfor), limitele maxime admisibile ale impurităților, conform standardului românesc SR ISO 431:1995, sunt 0,001 % pentru fiecare din elementele oxigen, sulf, seleniu, telur, bismut și plumb, 0,0001 % pentru fiecare din elementele cadmiu, mercur și zinc și 0,0003% pentru fosfor, cu condiția ca suma elementelor Ag, As, Bi, Mn, Se, Sn și Tl să nu depășească 0,004 %; pentru nichel, mangan și fier nu sunt precizate limite.

Asupra valorilor modului de elasticitate al cuprului o influență mare o are stibiul și zincul. Limita de elasticitate a cuprului variază cu temperatura (fiind de circa 1...5 MPa la temperatura de 100°C) și cu gradul de puritate. Astfel, la temperatura de 20°C, limita de elasticitate este de 4,28 MPa pentru puritatea de 99,999 % și, respectiv, de 14,8 MPa pentru puritatea de 99,97 %. Rezistența la rupere a cuprului în stare recoaptă la temperatura ambiantă este 220 MPa, alungirea corespunzătoare este de 50 %, iar stricțiunea la rupere este de 70 %.

Variațiile acestor proprietăți în funcție de gradul de reducere la laminarea la rece sunt prezentate în diagramele din figura 12.3.

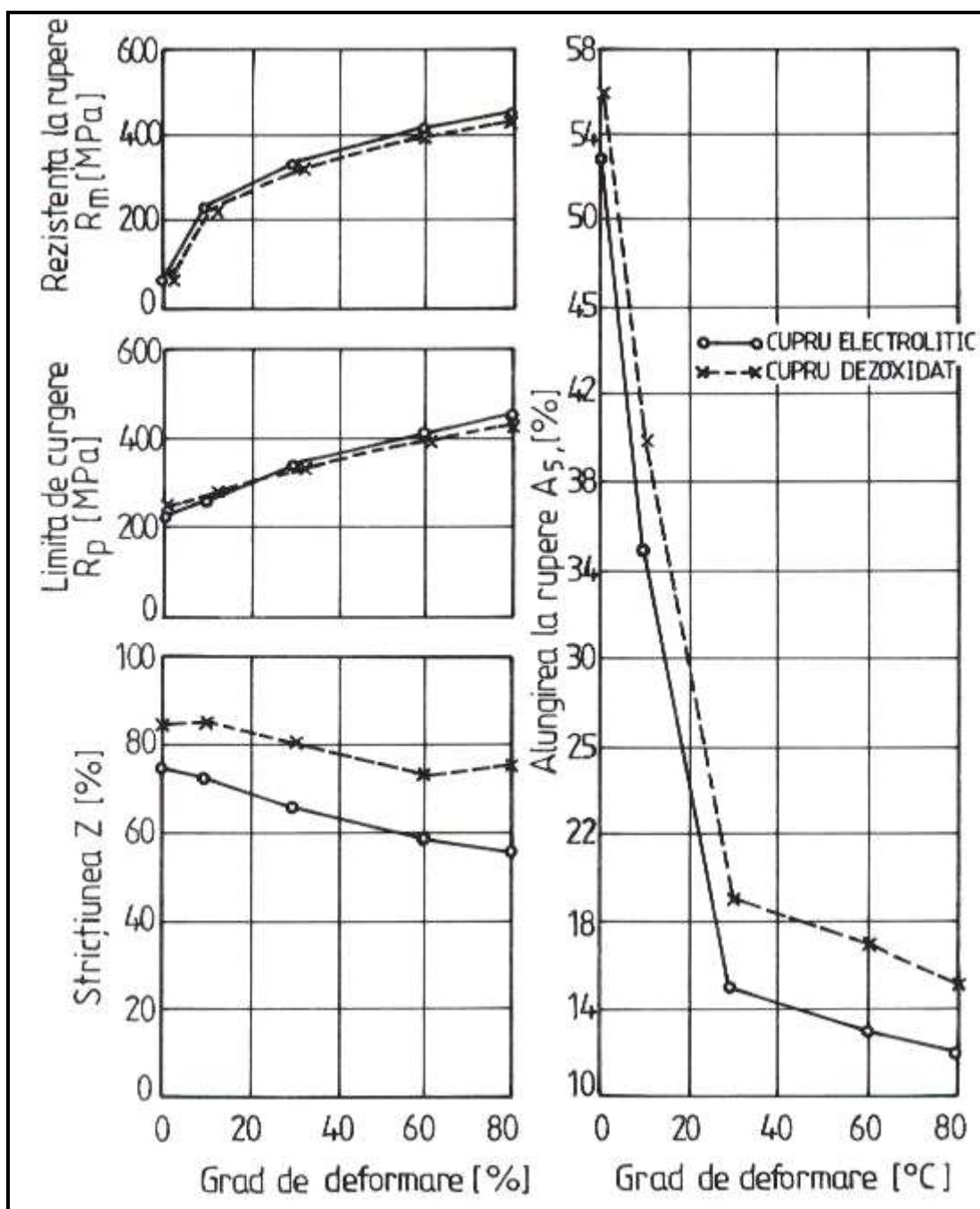


Fig. 12.3. Influența procesului de laminare la rece asupra caracteristicilor mecanice ale cuprului *Cu-ETP* rafinat electrolitic, cu conținut de oxigen și cuprului *Cu-OFE* rafinat electrolitic, fără oxigen, dezoxidat cu fosfor.

Duritatea cuprului în funcție de gradul de reducere aplicat prin laminarea la rece este prezentată în tabelul 12.4.

Tabelul 12.4.

Duritatea cuprului în funcție de reducerea prin laminare la rece

Gradul de reducere, %	0	3	10	40	80	95
Duritatea Vickers, HV	41	80	90	100	110	115

Asupra valorii durității cuprului o influență care nu poate fi neglijată o are și *mărimea granulației*. Astfel pentru cuprul industrial cu puritatea de 99,98%, la mărimea medie a grăunților structurii de 30 μm , duritatea este de 41 HV, în timp ce la granulația corespunzătoare unui diametru mediu de 150 μm duritatea corespunzătoare este 35 HV.

Dintre impurități, asupra valorilor proprietăților mecanice ale cuprului influențează în cea mai mare măsură oxigenul, fosforul și stibiul, chiar la valori mici ale concentrației acestora. Influența acestor elemente asupra unor proprietăți mecanice ale cuprului se prezintă în tabelul 12.5.

Tabelul 12.5.

Influența unor impurități asupra proprietăților mecanice ale cuprului

Elementul	Domeniul de variație a elementului, [%]	Domeniul de variație a proprietăților		
		R_m [MPa]	A_{10} [%]	Z [%]
Oxigen	0,016...0,360	223...251	53...55*	77...39
Fosfor	0,030...0,950	220...272	59...66*	80...86*
Stibiu	0,004...0,470	218...230	66...48	74...66

* influență neglijabilă

Plasticitatea la cald și la rece a cuprului este foarte mare, atingând valori ale reducerilor maxime de până la 90 %. Se recomandă totuși ca la laminarea la rece să nu se depășească valoarea gradului de reducere de 70 % pentru a se putea folosi integral și eficient plasticitatea materialului metalic. Textura de laminare a cuprului este dată de orientările (110) [112] sau (112) [111].

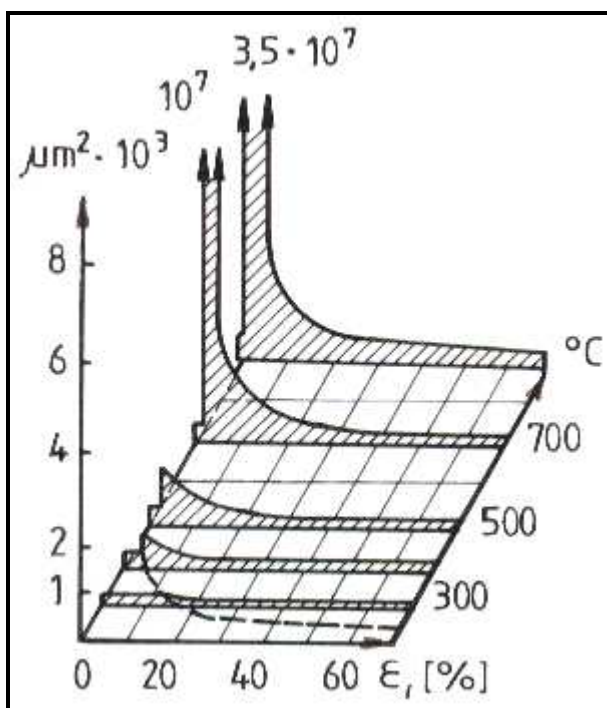


Fig. 12.4. Diagrama de recristalizare a cuprului Cu-OFE rafinat electrolitic.

De asemenea, în cazul laminării la cald se va căuta să se mențină temperatura semifabricatului în timpul laminării, prin încălzirea sculelor, astfel ca temperatura de deformare să se plaseze în intervalul de 650...930°C.

Elementele însoțitoare solubile nu afectează plasticitatea cuprului, în schimb măresc rezistența mecanică și duritatea acestuia. Plasticitatea cuprului este sensibil înrăutățită la concentrații ale oxigenului de peste 0,1 %.

Temperatura de recristalizare a cuprului este de 220°C, dar depinde însă de gradul de ecruisare a materialului (fig.12.4). Pentru recoacere, cuprul se încălzește la temperaturi de circa 400...700 °C.

În ceea ce privește *rezistența la coroziune*, cuprul, ca și aliajele acestuia, este rezistent la coroziunea atmosferică, în apă, inclusiv sărată, în soluții alcaline cu excepția celor amoniacale și în unele substanțe organice. Cuprul nu rezistă la acțiunea compușilor sulfului.

Tipurile de coroziune întâlnite la cupru și la aliajele sale sunt coroziunea prin puncte (pitting) și coroziunea sezonieră, aceasta din urmă reprezentând corodarea intercristalină apărută în atmosfere corosive, când materialul metalic prezintă tensiuni interne rămase de la laminarea la rece sau ca urmare a aplicării unor forțe exterioare (coroziune sub sarcină).

12.2. PRINCIPALELE PROPRIETĂȚI ALE ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE CUPRU DESTINATE LAMINĂRII

Sub denumirea de *aliaje speciale* sau complexe cu bază de cupru sunt cuprinse toate aliajele având ca bază sistemul cupru-zinc, denumite *alame*, sau cupru-staniu, denumite *bronzuri*, dar în care, în cazul alamelor speciale, sunt adăugate în mod intenționat și alte elemente de aliere, în scopul îmbunătățirii anumitor caracteristici fizico-chimice și mecanice, iar în cazul bronzurilor speciale s-a înlocuit staniul cu alte elemente, diferite de zinc sau nichel.

Alamele binare, conțin ca element de aliere zincul în concentrație de peste 25%, alte elemente găsindu-se în aliaj numai sub formă de impurități. Aliajele cupru-zinc cu mai puțin de 25 % zinc se numesc, în general, tombacuri. Alamele binare cupru-zinc utilizate în tehnică conțin până la 45 % zinc și, în funcție de concentrația zincului și de starea materialului (turnat, recopt, laminat la cald sau la rece), pot avea diferite structuri. Din diagrama de echilibru a sistemului de aliaje cupru-zinc, prezentată în figura 12.5, se remarcă faptul că alamele binare pot fi *monofazice* (alame α , alame β) sau *bifazice* (alame $\alpha+\beta$).

Faza α , fiind o fază plastică se laminează ușor la rece, însă la temperaturi cuprinse între 350...700°C, devine fragilă din cauza incluziunilor de plumb și bismut care, găsindu-se sub formă de eutectice ușor fuzibile, se topesc. Spre deosebire de faza α , faza β este o fază dură care la temperaturi mici, în domeniul în care există starea ordonată β' , se laminează foarte greu, dar la temperaturi mai mari decât temperatura de ordine-dezordine (454...468°C), trecând în starea dezordonată β , devine plastică la 800°C laminându-se foarte ușor. Prezența fazei β în faza α determină scăderea rapidă proprietăților de plasticitate și creșterea rezistenței la deformare care atinge un maximum când aliajul este format numai din faza β . Prezența fazei β în structura alamelor micșorează plasticitatea la rece și, din această cauză, alamele $\alpha+\beta$ se prelucrează plastic în special la cald.

Conform diagramei de echilibru, alamele monofazice α există de la temperatura ambiantă și până la temperatura de topire, iar alamele bifazice $\alpha+\beta$ cu concentrații de 37...46 % zinc, de asemenea există, de la temperatura ambiantă și până la temperatura de 903°C.

Alamele speciale sunt aliaje multicomponente cu bază de cupru realizate tot pe baza sistemului cupru-zinc, la care se mai introduc unul sau mai multe elemente de aliere ca: Si, Al, Sn, Pb, Fe, Mn, Ni, Cr, Co, Zr, B, Ti, V etc. cu

scopul îmbunătățirii diferitelor proprietăți ale alamelor binare. În general, elementele de aliere se găsesc în alame dizolvate în soluția solidă α , micșorând solubilitatea zincului în cupru și favorizând formarea fazei β . Excepții de la această situație produc Ni, Co și Ag care au efect opus. Fiind aliaje ternare și cuaternare sau chiar mai complexe, transformările structurale în alamele speciale se pot determina numai pe baza diagramelor de echilibru termic a sistemelor cu mulți componenți, îndeosebi pe baza diagramelor ternare Cu-Zn-Si, Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Sn, Cu-Zn-Pb, Cu-Zn-Fe, Cu-Zn-Mn și Cu-Zn-Ni.

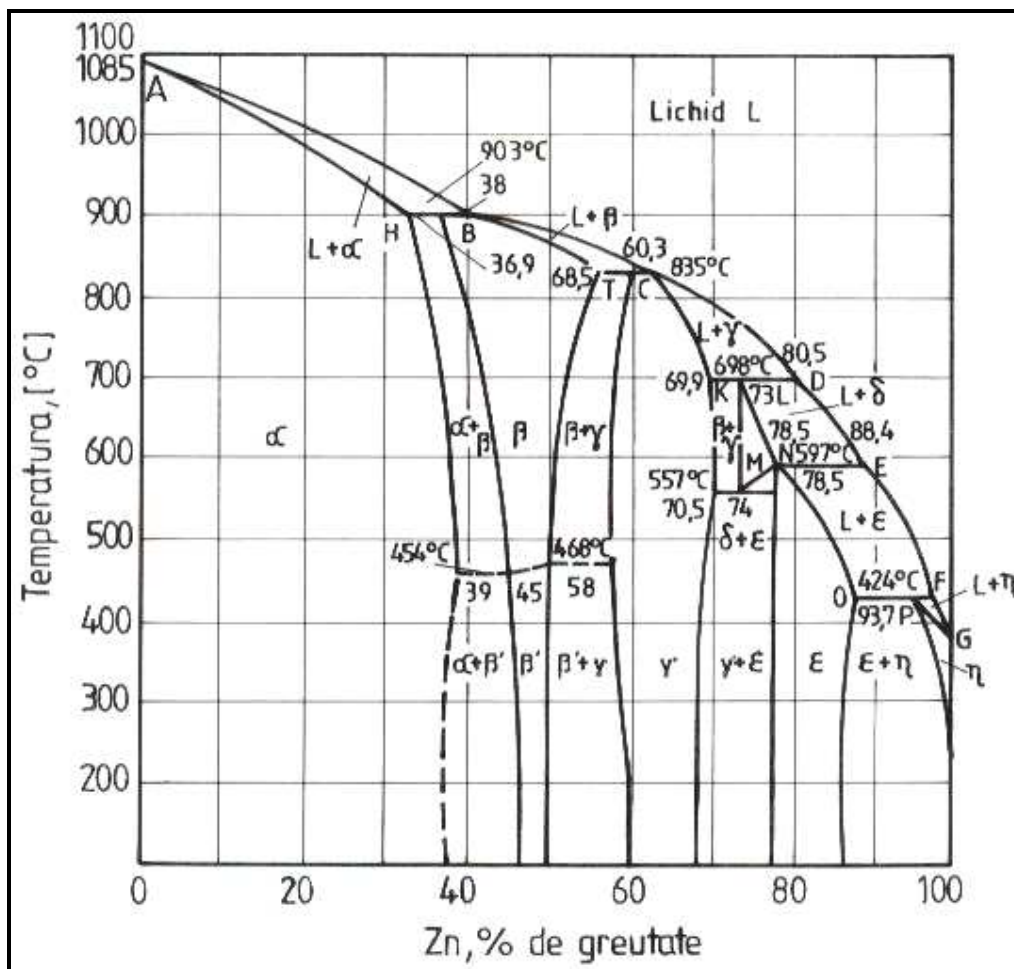


Fig. 12.5. Diagrama de echilibru a sistemului de aliaje cupru-zinc.

Deoarece conținutul în elemente de aliere este relativ mic, max 5...10 %, structura alamelor speciale este alcătuită, în general, din aceiași constituenți ca și alamele binare și anume, din agregate cristaline de soluții solide α și β .

Elementele de aliere se găsesc dizolvate în rețeaua cristalină a soluției solide, ceea ce modifică caracteristicile. Numai în anumite cazuri pot apare alți constituenți structurali. De aceea, în mod practic, se poate considera că o parte din zinc se înlocuiește printr-un alt element de aliere, astfel încât raportul cantitativ dintre fazele α și β se schimbă, cu toate că se menține același conținut de cupru. Această influență a elementului de aliere se poate caracteriza, aproximativ, cu ajutorul *coeficientului de echivalență* K_i , acesta simbolizând că 1% din elementul respectiv produce același efect structural precum K_i [%Zn], întreaga cantitate de aliaj fiind egală cu 100 %.

Coeficienții de echivalență pentru principalele elemente de aliere în alamele speciale au valorile prezentate în tabelul 12.6.

Tabelul 12.6.

Valorile coeficienților de echivalență K_i pentru alamele speciale

Elementele	Si	Al	Sn	Mg	Pb	Fe	Mn	Ni	Co
Coeficienții K_i	10	6	2	2	1	0,9	0,5	-1,3	-0,5

În funcție de valoarea coeficientului de echivalență K_i și concentrația C_i a elementului de aliere înlocuitor al zincului, concentrația procentuală în zinc a alamei speciale se calculează cu relația:

$$C_{Zn} = \frac{\%Zn + \sum K_i C_i}{\%Cu + \%Zn + \sum K_i C_i} \cdot 100, \quad [\%Zn] \quad (12.3.)$$

De exemplu, dacă într-o alamă α cu 70 %Cu și 30 %Zn, se substituie 2 % zinc cu 2 % siliciu (coeficient de echivalență $K_i = 10$), atunci concentrația procentuală în zinc a alamei speciale obținute va fi:

$$C_{Zn} = \frac{28 + (10 \times 2)}{28 + 70 + (10 \times 2)} \times 100 = 40,7 [\%Zn] \quad (12.4.)$$

adică structura alamei devine bifazică ($\alpha + \beta$).

Echivalentul structural al alamelor α cu 70 %Cu și 30 %Zn este alama specială cu 76 %Cu, 22 %Zn și 2 %Al, care se folosește pentru executarea țevilor, laminate la rece sau trase, pentru condensatoare.

Două din elementele de aliere ale alamelor speciale (nichelul și cobaltul) largesc domeniul α ,adică se comportă ca și cum ar mări conținutul de cupru în aceste aliaje. Dacă se adaugă nichel într-o alamă $\alpha + \beta$, faza β începe să dispară din structură și alama specială respectivă devine monofazică.

Din punctul de vedere al acțiunii asupra structurii și, implicit, asupra proprietăților alamelor speciale, elementele de aliere se pot clasifica în două categorii și anume în elemente care îngustează domeniul α ,adică micșorează solubilitatea zincului în cupru (Si, Al, Fe, Sn și Mn) și în elemente care largesc domeniul γ ,adică măresc solubilitatea zincului în cupru (Ni, Co și Ag).

Pentru realizarea prin laminare a tablelor, benzilor și țevilor, în practică sunt utilizate mai multe *tipuri de alame speciale*.

Alamele cu plumb sunt alame bifazice $\alpha + \beta$ utilizate atât pentru obținerea produselor deformate, cât și a unor produse turnate, plumbul adăugându-se pentru a îmbunătăți prelucrabilitatea prin așchiere.

Alamele cu aluminiu sunt caracterizate prin rezistență mecanică mai mare decât a alamelor obișnuite și prin rezistență mare la coroziune și la oxidare.

Alamele cu staniu au rezistență mare la coroziune și se folosesc pentru produse laminate, în schimb *alamele cu siliciu* se utilizează la turnarea pieselor cu pereți subțiri. Simbolizarea și compoziția acestor alame speciale, inclusiv a celor *cu nichel* și a celor *complex aliate* se prezintă în subcapitolul 12.4.

Bronzurile speciale sunt acele aliaje cu bază de cupru în care staniul, zincul sau nichelul nu sunt elemente principale de aliere. În trecut, sub denumirea de bronzuri se cuprindeau numai aliajele cupru-staniu.

În mod obișnuit, bronzurile cu staniu sunt denumite pe scurt bronzuri, iar celelalte sunt bronzurile speciale, căpătând calificativul după principalul element de aliere: bronzuri cu aluminiu, bronzuri cu siliciu, bronzuri cu mangan, bronzuri cu beriliu, bronzuri cu plumb etc. Categoria bronzurilor speciale este deschisă pentru a cuprinde și alte noi aliaje cu bază de cupru, aplicabile industrial.

Diagrama de echilibru a sistemului de aliaje cupru-staniu este prezentată în figura 12.6. Bronzurile cu staniu sunt aliaje binare cupru-staniu care conțin până la 15 % staniu dar, în general, cele utilizate în practică sunt aliaje complexe aliate cu zinc, fier, plumb, fosfor, nichel, mangan și cu alte elemente.

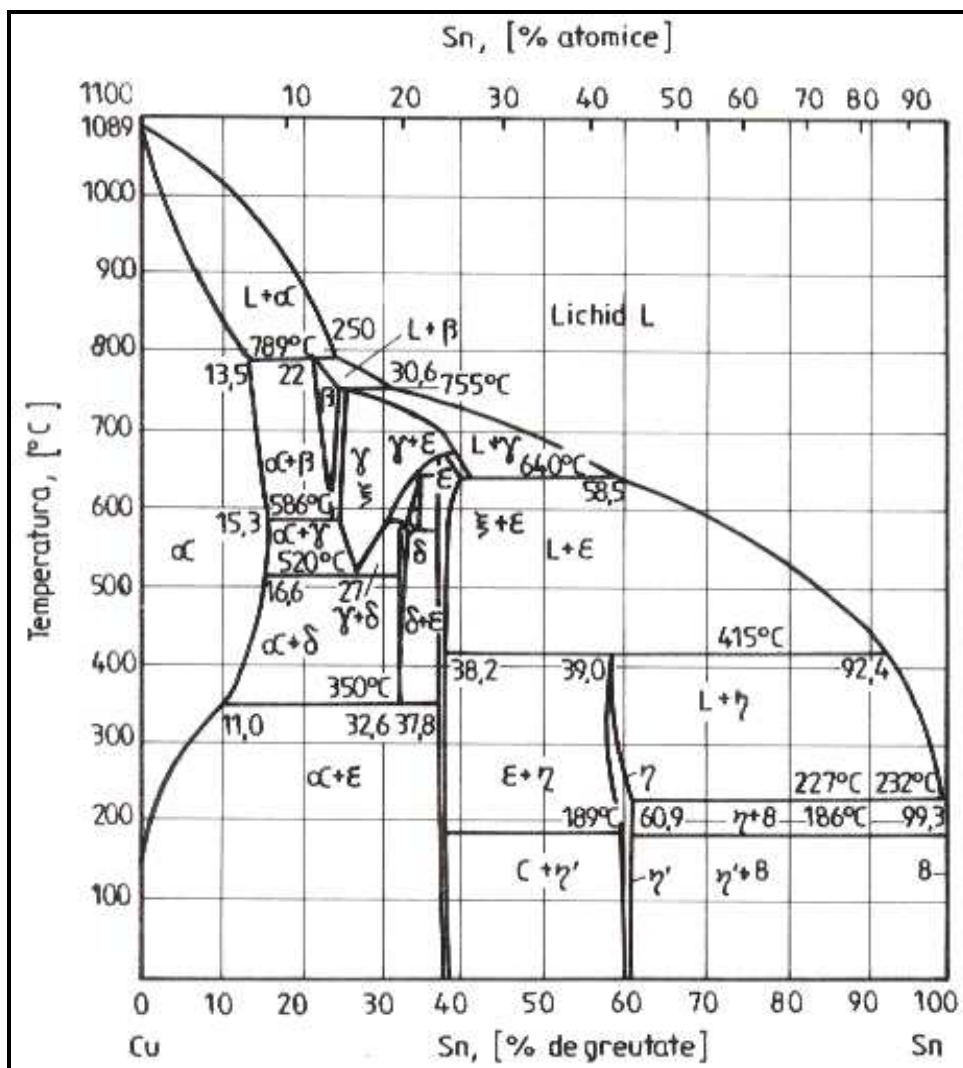


Fig.12.6. Diagrama de echilibru a sistemului de aliaje cupru-staniu.

Structura acestor aliaje depinde de compoziția lor chimică, dar și de condițiile de solidificare, de deformare plastică sau de tratament termic. În general, bronzurile cu până la 9% staniu, turnate și recoapte, au structura poliedrică de soluție solidă α omogenă. Prin solidificarea cu viteze obișnuite bronzurile cu 5...6 % staniu au în structură atât soluția solidă dendritică α cât și eutectoidul ($\alpha + \delta$). Prin laminare la rece și recoacere de recristalizare rezultă o structură poliedrică de soluție solidă omogenă cu macle.

Din cauza intervalului mare de temperaturi în care are loc solidificarea bronzurilor cu staniu și a difuziei lente a staniului în cupru, în semifabricatele turnate din bronzuri cu staniu apar atât segregatii dendritice accentuate cât și porozitate dispersă.

Bronzurile cu staniu sunt utilizate în tehnică datorită bunei rezistențe la coroziune și rezistenței mari la uzare mecanică.

Alte aliaje ale cuprului, pe lângă alame și bronzuri, se mai pot menționa aliajele Cu-Ni cum sunt cuprunichelurile care conțin 15...35 %Ni, caracterizate de o deformabilitate mare la rece și la cald, rezistență foarte mare la coroziune și refractaritate ridicată. Cuprunichelurile sunt utilizate la confecționarea instrumentelor medicale, a tacâmurilor, bijuteriilor sau rezistențelor electrice (nichelina cu circa 32%Ni). Aliajul cu 40...45%Ni numit constantan, are rezistivitatea electrică și forța termoelectrică ridicate și, ca atare, este utilizat la confecționarea rezistențelor și aparatelor de încălzire care lucrează până la temperatura de 700°C. De asemenea, se mai pot menționa aliajele Cu-Mn care sunt caracterizate de rezistivitate electrică mare, motiv pentru care sunt utilizate pentru reostate. Aceste aliaje au circa 12%Mn (manganin), sau 20%Mn (manganin dublu), dar și alte elemente de aliere ca 2...4%Ni sau 3...5,5 %Al.

12.3. INFLUENȚA ELEMENTELOR DE ALIERE ÎN ALIAJELE SPECIALE CU BAZĂ DE CUPRU

În cazul alamelor speciale și a bronzurilor speciale, îmbunătățirea diferitelor proprietăți ale acestora, ca rezistența mecanică (limita de curgere, rezistența la rupere), proprietățile de plasticitate (alungirea și stricțiunea la rupere), tenacitatea, rezistența la coroziune, rezistența la oxidare la cald, prelucrabilitatea etc. se realizează prin aliere.

Influența zincului. În alamele cu concentrația corespunzătoare domeniului α , creșterea procentului de zinc conduce la creșterea rezistenței și alungirii la rupere a aliajului, ductibilitatea atingând un maxim la 30%Zn. Creșterea în continuare a concentrației zincului, prin apariția fazei β , produce scăderea rapidă a alungirii și creșterea, în continuare, a rezistenței care atinge un maximum când întreaga structură a aliajului respectiv este formată din faza β . În continuare rezistența va scădea brusc ca urmare a apariției fazei γ , fragile (fig.12.7).

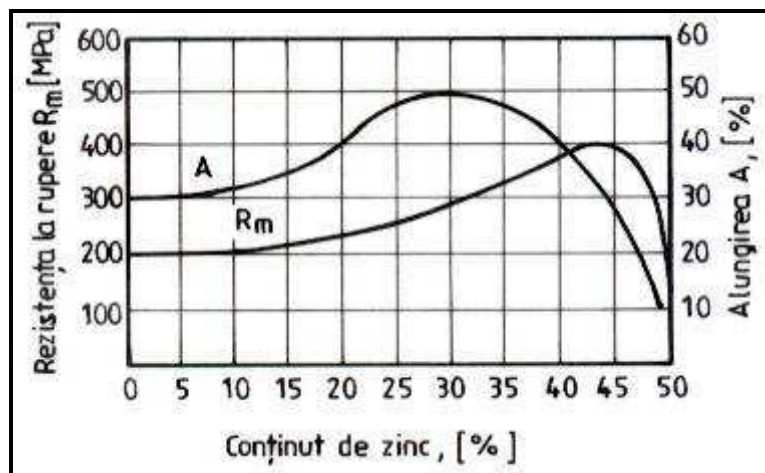


Fig.12.7 Influența conținutului de zinc asupra caracteristicilor mecanice ale alamelor.

Pe măsură ce proporția de fază β în structură crește, reziliența aliajului scade, iar duritatea se mărește, aliajul devenind extrem de dur dar și fragil, când apare faza γ .

În cazul bronzurilor, prezența zincului ameliorează proprietățile tehnologice ale aliajelor, respectiv micșorează intervalul de temperaturi pentru solidificare, mărește fluiditatea aliajelor, reduce tendința acestora la saturarea în gaze, împiedicând formarea suflurilor, dar în același timp micșorează și proprietățile antifricțiune. Zincul, dizolvându-se în cupru, se găsește în soluția solidă α și se adaugă până la circa 11%.

Influența aluminiului. Aluminiul se adaugă în alame până la 6% având influență puternică în special asupra rezistenței la rupere. Astfel, de exemplu, un adaos de 1% Al conduce la creșterea rezistenței la rupere a alamelor cu 88N/mm^2 , aceasta deoarece 1% Al are un efect echivalent cu circa 5%Zn.

Alamele cu 18...30% Zn și 3...5% Al prezintă transformări de fază în stare solidă și pot fi supuse durificării prin călire și îmbătrânire artificială. De asemenea, aluminiul contribuie și la creșterea rezistenței la coroziune și a rezistenței la oxidarea la cald a alamelor îmbunătățind, în același timp și stabilitatea structurii la încălzire, prevenind creșterea grăunților.

În bronzul cu staniu, aluminiul nu va fi prezent deoarece are o acțiune dăunătoare mărind granulația și porozitatea, în special la produsele turnate, deci și la semifabricatele destinate deformării plastice. În bronzurile cu aluminiu (sistemul cupru - aluminiu) concentrația acestuia ajunge până la 15%. Pentru deformare, bronzurile cu aluminiu au concentrații de până la 7% pentru deformarea la rece (structură monofazică α - c.f.c.) și concentrații de 8...11% pentru deformarea la cald (structură bifazică $\alpha+\beta$ pentru temperaturi cuprinse între $565\text{...}1035^\circ\text{C}$, conform figurii 12.8).

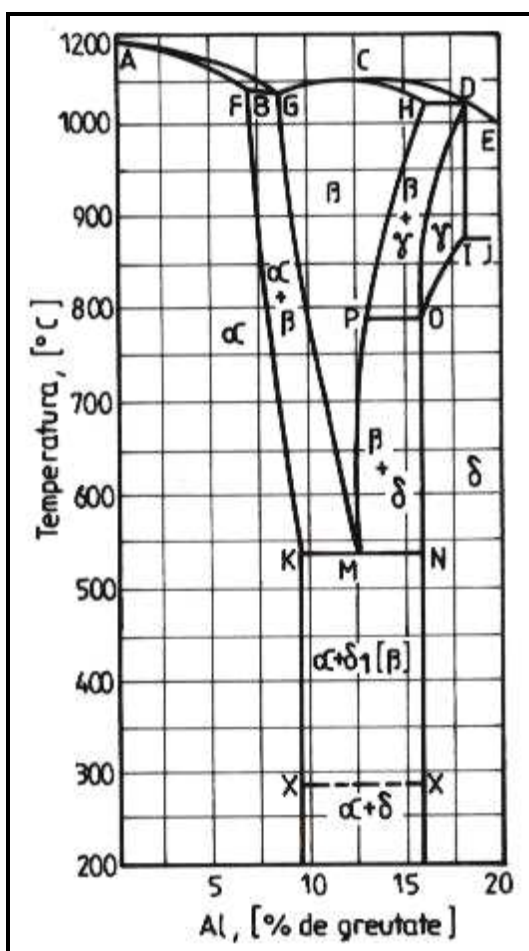


Fig. 12.8. Diagrama de echilibru a sistemului de aliaje cupru-aluminiu.

Din figura 12.9 rezultă că bronzurile care conțin până la 5% Al au plasticitatea ridicată, iar rezistența relativ mică. La conținuturi de peste 6 % Al în structura aliajului în stare turnată apare și eutectoidul $\alpha+\gamma_2$, care produce creșterea rezistenței, însă în detrimentul plasticității care scade brusc. La conținuturi de aluminiu de peste 10%, prin creșterea cantității de fază γ_2 în aliajul turnat, începe să scadă și rezistența la rupere a aliajului.

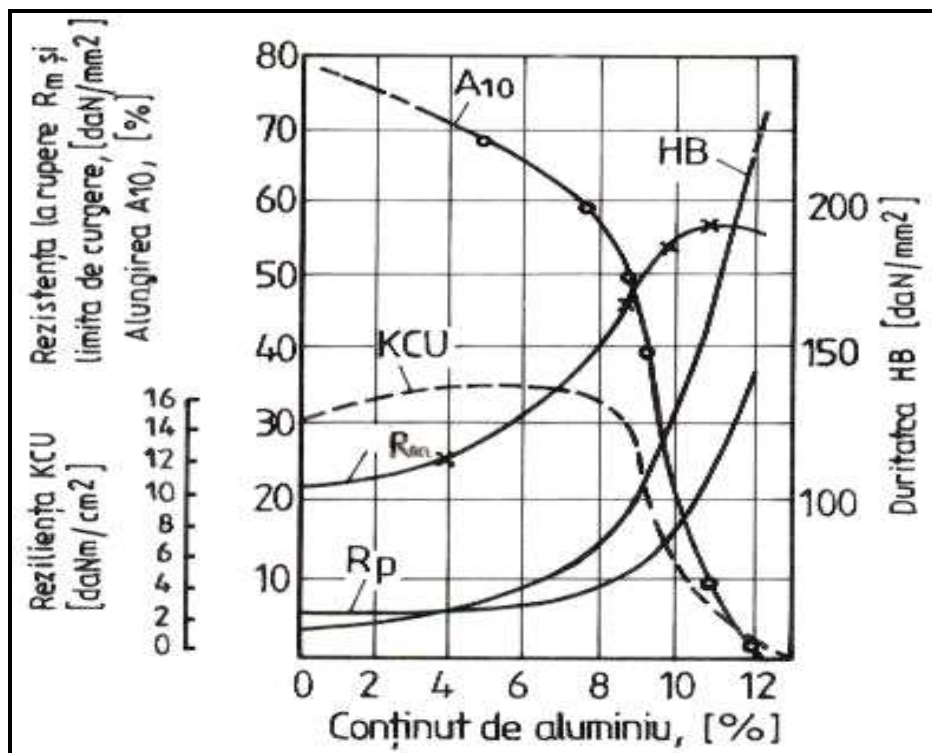


Fig. 12.9. Variația caracteristicilor mecanice ale bronzurilor cu aluminiu în funcție de conținutul în aluminiu.

Influența manganului. Manganul se adaugă în alame până la concentrații de 2%, pentru a mări rezistența la rupere, limita de curgere și alungirea.

În bronzuri manganul exercită și o acțiune dezoxidantă, mărește densitatea și îmbunătățește proprietățile lor mecanice. În bronzurile cu aluminiu cât și în bronzurile cu siliciu, manganul produce creșterea rezistenței la coroziune.

Cuprul formează cu manganul soluții solide, care au rezistivitate ridicată și rezistență mare la coroziunea în apă de mare și la oxidarea la temperaturi înalte.

Influența siliciului. Siliciul produce îngustarea domeniului α al alamelor, micșorând solubilitatea zincului în cupru, mărește însă valoarea proprietăților de rezistență și tenacitate (care se mențin până la $-180^\circ C$), crește fluiditatea și înlătură pericolul de oxidare a zincului din aliaj în timpul turnării pieselor sau semifabricatelor pentru deformare. În alame 1% Si are un efect echivalent cu 10% Zn. Siliciul în alame se introduce până la un conținut de circa 3%.

În bronzurile cu staniu, proporții de zecimi de procent de zinc reduc foarte mult elasticitatea acestor aliaje.

În bronzurile cu siliciu de importanță practică, concentrația siliciului variază între 1,5...5%, asigurând acestor aliaje proprietăți mecanice și rezistență la coroziune foarte bune (fig.12.10). Siliciul, conferind aliajului și o elasticitate foarte mare, face ca aceste bronzuri să fie utilizate și la fabricarea arcurilor și a altor elemente elastice.

Influența staniului. În alame staniul produce creșterea rezistenței la coroziune, a limitei de curgere, a rezistenței la rupere și a durității, dar plasticitatea acestor aliaje scade brusc la conținuturi mai mari de 1% Sn, din cauza formării constituenților duri și fragili.

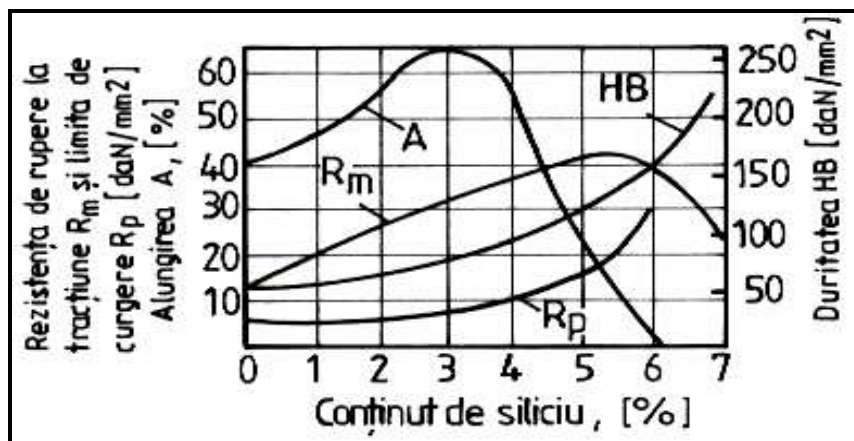


Fig. 12.10. Influența conținutului de siliciu asupra caracteristicilor aliajelor cupru-siliciu.

În bronzul cu staniu proprietățile mecanice ale cuprului sunt influențate de către staniu în același mod ca și de către zinc, dar mult mai brusc (fig.12.11), plasticitatea începând să scadă chiar de la 5% Sn.

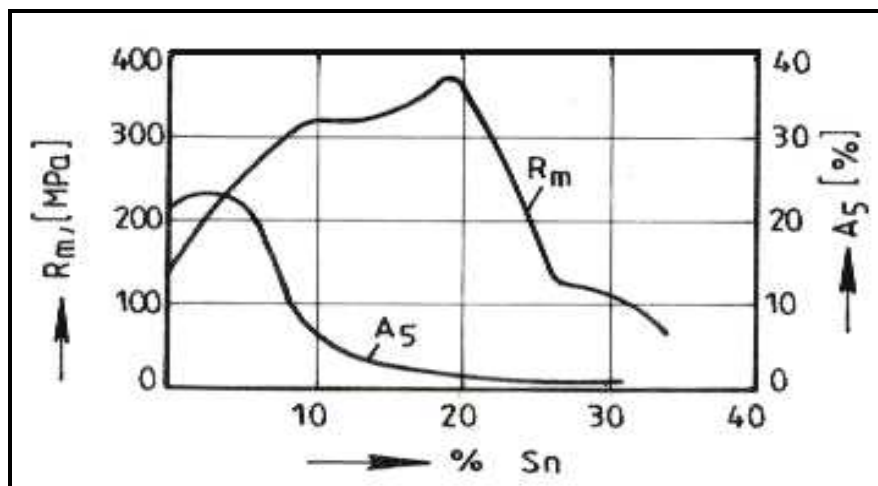


Fig. 12.11. Influența conținutului de staniu asupra caracteristicilor aliajelor cupru-staniu.

Rezistența mecanică crește până la 20%Sn, de unde începe să scadă, deoarece în structură există multă fază δ care fragilizează aliajul.

Influența nichelului. În alame nichelul lărgeste domeniul de existență al soluției solide α , crescând solubilitatea zincului în cupru, măbind rezistența mecanică, plasticitatea, tenacitatea și rezistența la coroziune la temperaturi ridicate. De asemenea, nichelul imprimă alamelor capacitatea de a se lustrui bine. Nichelul în alame produce și creșterea tenacității fazei β , ca și prezența manganului, a fierului sau a aluminiului.

Alamele Cu-Zn-Ni sunt de două tipuri și anume:

- alame α cu nichel, care conțin 5...30% Zn și 7...30% Ni (restul cupru) și care se numesc și argint de nichel sau argint german, datorită culorii albe argintii a acestora, atunci când conținutul de nichel este de circa 20 %. Aceste alame au proprietăți mecanice bune atât la rece cât și la cald până la temperaturi de circa 800°C;

- alame $\alpha+\beta$ cu nichel, numite și bronzuri de argint, care au în general

45 % cupru, 45 % zinc și 10 % nichel și se pot prelucra ușor prin extrudare.

În bronzurile cu staniu, nichelul îmbunătățește proprietățile mecanice la rece și la cald și la rezistența la uzură a materialului. De asemenea, nichelul este prezent și în bronzurile cu siliciu, pentru ameliorarea proprietăților mecanice și rezistenței la coroziune. În bronzul cu 10%Al și 3%Fe, conținutul de nichel de asemenea îmbunătățește proprietățile de rezistență a aliajului (fig.12.12). În aliajele cupru-nichel, formate numai din soluții solide (fig.12.13) cu rețea *c.f.c.*, creșterea concentrației de nichel conduce la mărirea proprietăților mecanice (fig.12.14), a rezistenței la coroziune, a rezistivității electrice și a proprietăților termoelectrice ale cuprului.

Influența fierului. Limita de solubilitate a fierului în faza α , dar și în faza β , a aliajelor cupru-zinc, este de 0,2 %. Peste această limită fierul precipită sub forma compusului FeZn_7 , care acționează în direcția finisării structurii. Același efect îl are fierul și în cazul alamelor $\alpha + \beta$, finisând și structura Widmanstätten. Prin aceste efecte fierul mărește rezistența la rupere, limita de curgere și alungirea la rupere a alamelor. Fierul produce și creșterea temperaturii de începere a recristalizării pentru cupru și aliajele sale. În bronzurile cu staniu fierul de asemenea produce creșterea proprietăților mecanice ca urmare a finisării grăunților, însă la conținuturi mai mari de 0,2% duritatea crește mult, iar bronzul devine fragil.

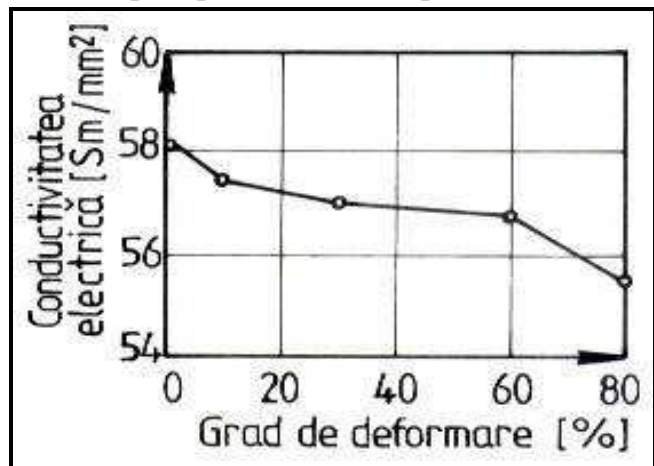


Fig. 12.12. Influența nichelului asupra caracteristicilor bronzului Cu Al 10 Fe3.

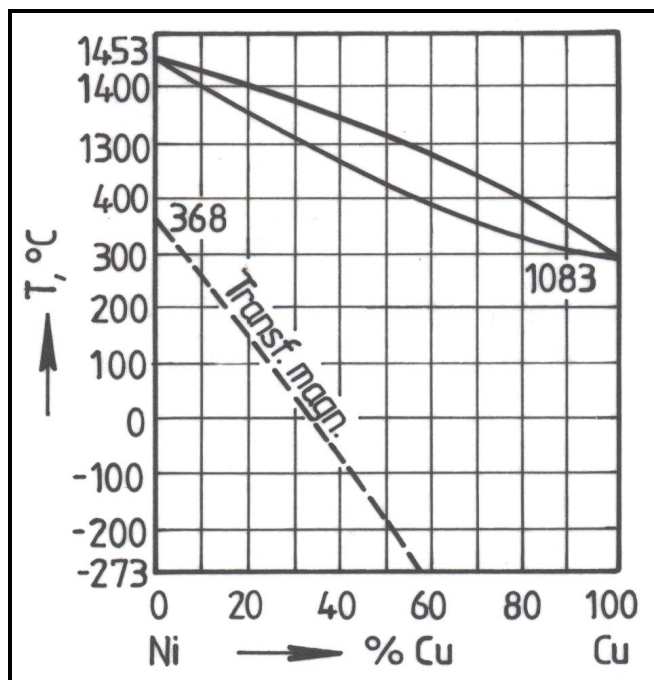


Fig. 12.13. Diagrama aliajelor cupru-nichel.

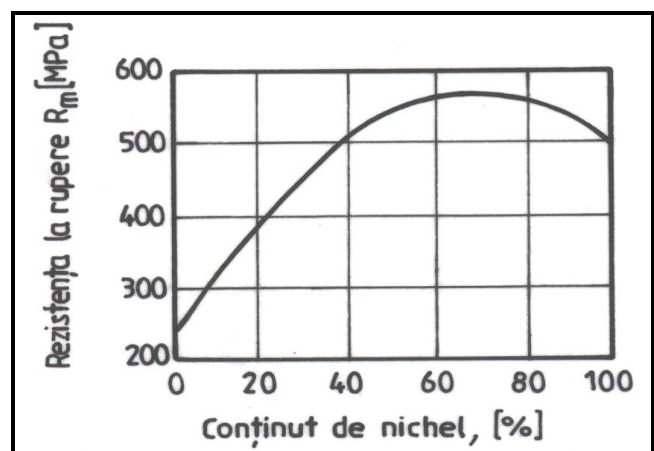


Fig.12.14. Variația rezistenței la rupere a aliajelor Cu-Ni cu conținutul de nichel.

Influența beriliului. Beriliul este un element de aliere specific bronzului.

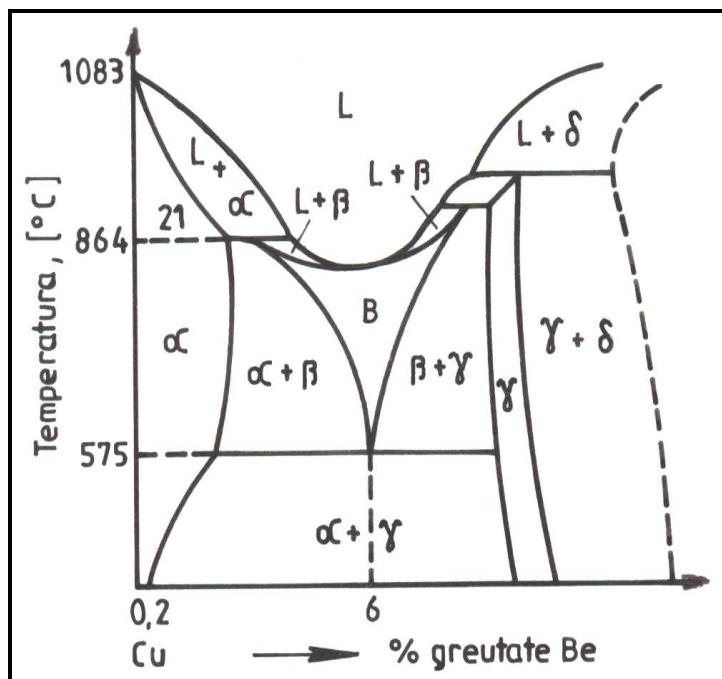


Fig. 12.15. Partea dinspre cupru a diagramei cupru-beriliu.

Din diagrama de echilibru cupru-beriliu (fig.12.15) rezultă că la temperatura ambiantă cuprul dizolvă maximum 0,2% Be, iar prin călire de la 800°C, se poate obține, la 20°C, o soluție solidă α suprasaturată de beriliu în cupru care, prin îmbătrânire artificială la 300...350°C, asigură durități foarte mari, de 300...400 HB, ca urmare a precipitării fazei γ (CuBe sau Cu_7Be_6). De asemenea, bronzurile cu beriliu prezintă și valori ridicate ale rezistenței la rupere, rezistenței la coroziune, rezistenței la deformări elastice mari și sudabilității.

Elemente nocive în cupru și aliajele sale. În cupru, impuritățile nu trebuie să atingă, ca valori însumate, conținutul de maximum 1%. Oxigenul, bismutul, plumbul și sulful sunt insolubile în cupru și, ca atare, ele apar ca incluziuni. Celelalte impurități ca Sb, As, Fe, Se, P etc., în concentrațiile în care se găsesc în cupru sunt solubile formând soluții solide cu cuprul.

Bismutul și plumbul sunt cele mai dăunătoare impurități pentru cupru, deoarece formează cu acesta eutectice ușor fuzibile. Aceste eutectice, având temperaturi de topire reduse (271°C și, respectiv, 327°C) produc fragilitatea la cald a cuprului, respectiv conduc la imposibilitatea deformării la cald a cuprului cu astfel de impurități. Din această cauză concentrațiile maxime admise de Bi și Pb în cupru sunt de 0,005% și, respectiv, 0,02%.

Efectul negativ al bismutului și plumbului este mult atenuat dacă în cupru se introduc elemente ca Zr, Ca sau Ce care formează cu bismutul și plumbul compuși greu fuzibili.

Cu *oxigenul* cuprul formează eutectic cu 0,39% O_2 , cu temperatura de topire de 1065°C, ceea ce face ca oxigenul să fie practic inofensiv. Se admite însă, maxim 0,1% O_2 în cupru deoarece provoacă fragilitatea cuprului prin așa numita boală de hidrogen a cuprului. Cuprul în acest caz nu poate fi deformat la cald fără să fisureze deoarece în timpul încălzirii semifabricatelor în cuptoare cu atmosferă reducătoare de H_2 sau CH_4 , aceste gaze difuzează în cupru și, reacționând cu oxigenul, formează vapori de apă, care produc ruperi locale (fisuri) ca urmare a presiunii mari exercitate asupra lor.

Concentrații mai mari de 0,1% O_2 în cupru, reduc sensibil și plasticitatea la rece a cuprului.

Sulful fiind de asemenea insolubil în cupru, formează cu acesta un eutectic (Cu + Cu_2S) cu punct de topire 1067°C și care nu produce fragilitatea la cald a

cuprului, dar compusul Cu_2S , cu temperatura de topire 1129°C , prezent la limitele de grăunte ale cuprului, produce scăderea proprietăților de rezistență și plasticitate ale acestuia.

Arseniul se dizolvă în cupru, formând soluție solidă, până la 7,5% concentrație, măbind temperatura de recristalizare a acestuia, fapt care se răsfrânge negativ asupra plasticității cuprului și aliajelor sale.

De asemenea, arseniul formează și compuși fragili care se dispun intergranular.

Stibiul și fosforul de asemenea micșorează plasticitatea cuprului și aliajelor sale, ca urmare a unor compuși fragili, care se dispun la limitele de grăunte favorizând ruperile intercristaline.

12.4. PARAMETRII TEHNOLOGICI DE LAMINARE A ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE CUPRU

12.4.1. Parametrii tehnologici de laminare a alamelor speciale

Compoziția chimică a aliajelor cupru-zinc (alamelor) destinate prelucrării prin laminare la cald sau la rece, în funcție de tipul acestor aliaje, se prezintă în tabelele 12.7, 12.8 și 12.9, conform standardului STAS 95-90.

Tabelul 12.7

Aliaje cupru-zinc, fără plumb, deformabile (STAS 95-90)

Marca aliajului	Compoziția chimică, %								Densitate kg/dm ³
	Elemente de aliere		Impurități						
	Cu	Zn	Pb	Fe	Mn	Al	Sn	Total	
CuZn10	89...91	Rest	0,05	0,1	0,05	0,02	0,05	0,4	8,8
CuZn15	84...86	Rest	0,05	0,1	0,05	0,02	0,05	0,4	8,8
CuZn20	79...81	Rest	0,05	0,1	0,05	0,02	0,05	0,4	8,7
CuZn30	68...71	Rest	0,05	0,1	0,05	0,02	0,05	0,4	8,5
CuZn36	63...65	Rest	0,07	0,1	0,1	0,03	0,03	0,4	8,4
CuZn37	62...64	Rest	0,3	0,2	0,1	0,03	0,03	0,8	8,4

Tabelul 12.8

Aliaje cupru-zinc, cu plumb, deformabile (STAS 95-90)

Marca aliajului	Compoziția chimică, %								Densi- tatea kg/dm ³
	Elemente de aliere			Impurități					
	Cu	Pb	Zn	Fe	Mn	Al	Sn	Total	
CuZn36Pb1	61...64	0,5...1,5	Rest	0,2	0,1	0,05	0,1	0,5	8,5
CuZn35Pb1,5	62...64	0,7...2,5	Rest	0,2	0,1	0,05	0,1	0,5	8,5
CuZn39Pb2	57...60	1,0...3,0	Rest	0,4	0,2	0,1	0,3	1,5	8,4
CuZn39Pb3	57...59	2,5...3,5	Rest	0,4	0,2	0,1	0,2	1,5	8,4
CuZn40Pb1	59...61	0,3...1,5	Rest	0,3	0,1	0,05	0,2	1,0	8,4

Aliaje cupru-zinc deformabile speciale (STAS 95-90)

Marca aliajului	Compoziția chimică, %									Densi- tatea, kg/ dm ³
	Elemente de aliere								Impu- rități, %max	
	Cu	Pb	Fe	Mn	Al	Si	Zn	Alte		
CuZn31Si	66...70	-	-	-	-	0,7... 1,3	Rest	-	2,2	8,4
CuZn36AlMnFe	58...62	0,1... 1,5	0,5... 2,0	0,2... 2,5	1,0... 3,0	-	Rest	Ni = 0...5	0,5	8,4
CuZn38Pb2Mn2	57...60	1,5... 2,5	-	1,5... 2,5	-	-	Rest	-	2,5	8,5
CuZn39Mn1,5Al	56...60	0,1... 1,5	-	0,5... 2,0	0,5... 2,0	0,1... 0,5	Rest	-	0,5	8,2
CuZn39Ni3	57...61	-	-	-	-	-	Rest	Ni = 3...4	0,2	8,3
CuZn40Mn3,5	53...58	0,1... 0,5	0,5... 1,5	3,0... 4,0	-	-	Rest	-	1,0	8,3
CuZn42Mn3Al	57...60	-	-	2,0... 4,0	1,5... 2,0	0,6... 0,9	Rest	-	-	8,3
CuZn42Mn3Al2	57...60	0,2... 0,35	-	2,0... 4,0	1,2... 2,4	-	Rest	-	-	8,3
CuZn28Sn1	70...73	-	-	-	-	-	Rest	Sn = 1...2	0,3	8,5
CuZn38Mn1,5Al	57...60	0,5... 1,0	-	1,0... 2,0	1,0... 1,5	0,3... 0,7	Rest	Sn = 0...0,5	0,5	8,5

În cazul alamelor speciale, *încălzirea în vederea laminării* trebuie să fie efectuată în domeniul fazelor β sau $\alpha+\beta$, faze care au cea mai bună plasticitate la temperaturi înalte. Depășirea temperaturilor optime de laminare la cald a alamelor (valabil și pentru bronzuri) conduce la creșterea exagerată a grăunților fazei β și la scăderea rezistenței acesteia. La scăderea temperaturii de laminare sub 450°C, în alame se formează faza β cu plasticitate redusă, iar scăderea în continuare a temperaturii, pe lângă micșorarea plasticității, produce și creșterea rezistenței la deformare.

Din diagramele de recristalizare a cuprului (fig.12.4) și aliajelor sale rezultă că *gradul critic de deformare*, care determină apariția unei granulații grosolane după recristalizare sau prin laminare la cald, se află în limitele 5...15%. Deci, *laminarea la cald* poate conduce la obținerea unei granulații fine și la obținerea unor proprietăți mecanice superioare, dacă se vor aplica grade de reducere superioare celor critice, iar intervalul temperaturilor de laminare a alamelor speciale va fi cuprins între 800...950°C (v. tabelul 11.1).

Din cercetările efectuate privind comportarea la deformarea la cald a cuprului și alamelor au rezultat următoarele:

- cuprul, într-un interval foarte mare de temperaturi de deformare (550...850°C), are plasticitatea practic nelimitată;
- creșterea concentrației zincului în cupru, până la 20 % Zn, produce o micșorare neînsemnată a plasticității și se poate considera, pentru această grupă de alame, că plasticitatea este, la fel ca mai sus, practic nelimitată;

- la creșterea concentrației zincului în alame până la 36% deformabilitatea aliajelor scade brusc; creșterea, în continuare, a concentrației zincului în cupru produce o modificare structurală în aliaj și din nou se produce creșterea deformabilității; astfel, de exemplu, alama cu 41% Zn, în domeniul temperaturilor înalte de deformare, prezintă deformabilitate mai mare decât alama cu 38% Zn;

- din diagramele de plasticitate ale cuprului și alamelor rezultă condițiile de laminare la cald, prezentate în tabelul 12.7.

Tabelul 12.7

Parametrii tehnologici de laminare la cald a alamelor

% Cu în alamă	Intervalul de temperaturi °C	Reducerea admisibilă, %	% Cu în alamă	Intervalul de temperaturi °C	Reducerea admisibilă %
99,98	900...550	85...90	68,0	850...700	50...60
95,12	900...550	70...75	63,82	850...650	60...65
89,03	850...650	70...75	57,98	850...700	35...40
70,89	850...750	40...45	58,27 (1,12%Pb)	800...700	70...75

În cazul *laminării la rece* a cuprului și alamelor reducerea totală maxim admisă, între două tratamente termice de recoacere de recristalizare, variază între 50...80%, iar reducerile pe treceri, între 15...45 %.

Pentru laminarea la rece a principalelor aliaje cupru-zinc, sunt prezentate în figura 12.16 *a...g* curbele de ecruisare caracteristice acestor aliaje, din care se pot trage concluzii privind comportarea la deformarea prin laminare a alamelor.

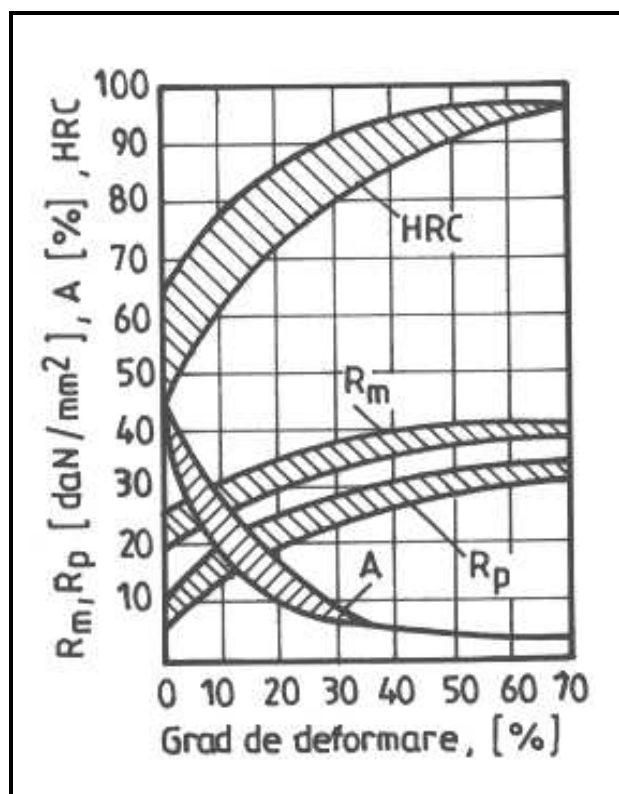
12.4.2. Parametrii tehnologici de laminare a bronzurilor speciale

Compozițiile chimice, conform standardelor românești, ale diferitelor mărci de bronzuri speciale deformabile, utilizate pentru obținerea produselor laminate, sunt prezentate în tabelele 12.8, 12.9 și 12.10.

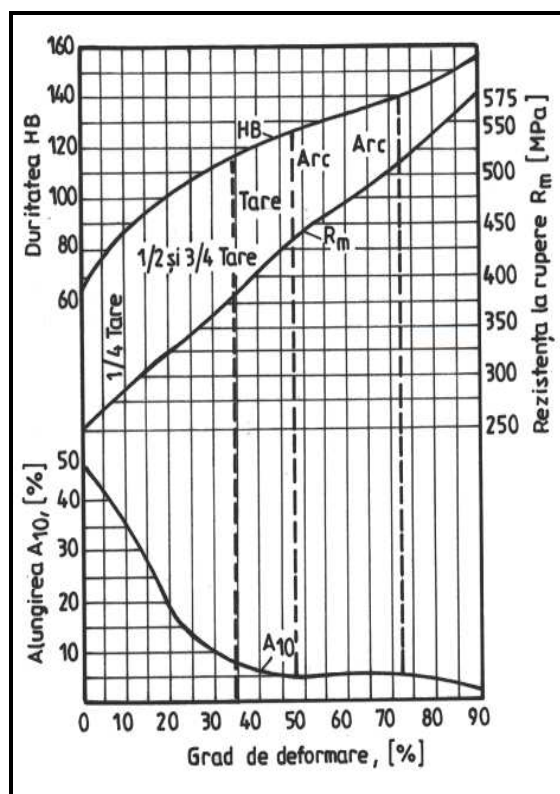
Tabelul 12.8

Aliaje speciale cupru-staniu deformabile (SR ISO 427:1996)

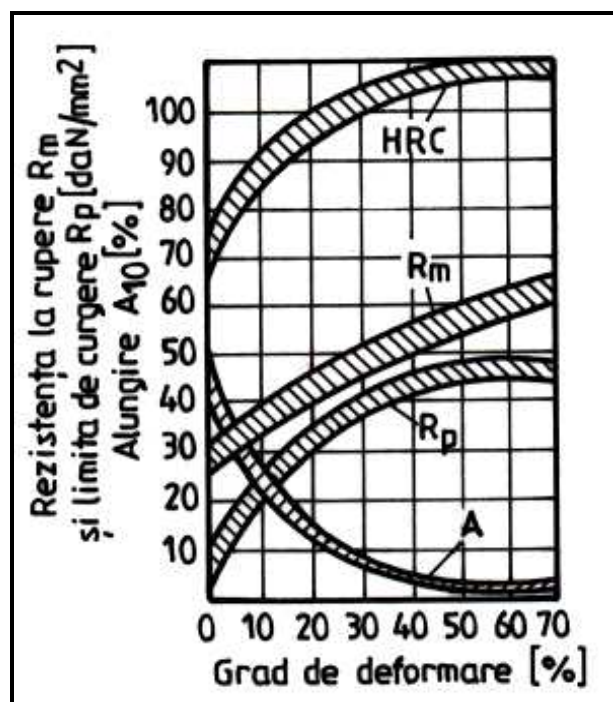
Simbolizare	Element	Compoziția chimică, %							Densitate medie kg/dm ³
		Cu	Fe	Ni	P	Pb	Sn	Zn	
CuSn8P	min	rest	-	-	0,1	-	7,5	-	8,8
	max		0,1	0,3	0,4	0,05	9,0	0,3	
CuSnZn2	min	rest	-	-	-	-	3,0	1,0	8,9
	max		0,1	0,3	-	0,05	5,0	3,0	
CuSn4Pb4Zn3	min	rest	-	-	0,01	3,5	3,5	1,5	8,9
	max		0,1	-	0,50	4,5	4,5	4,5	



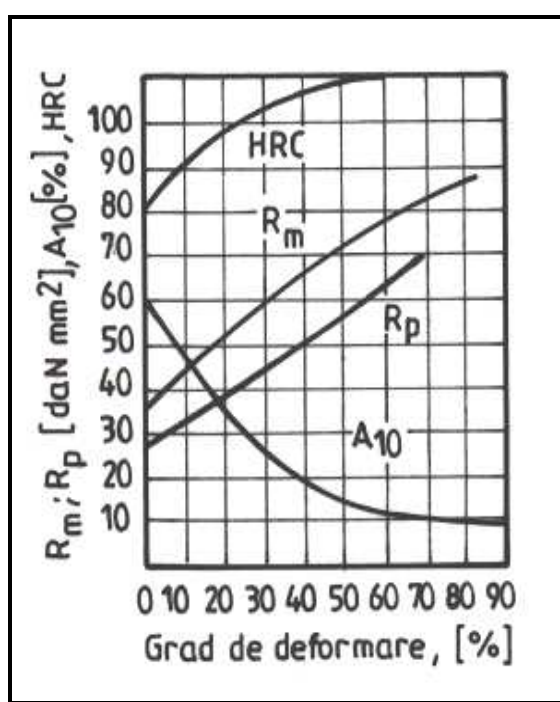
a



b

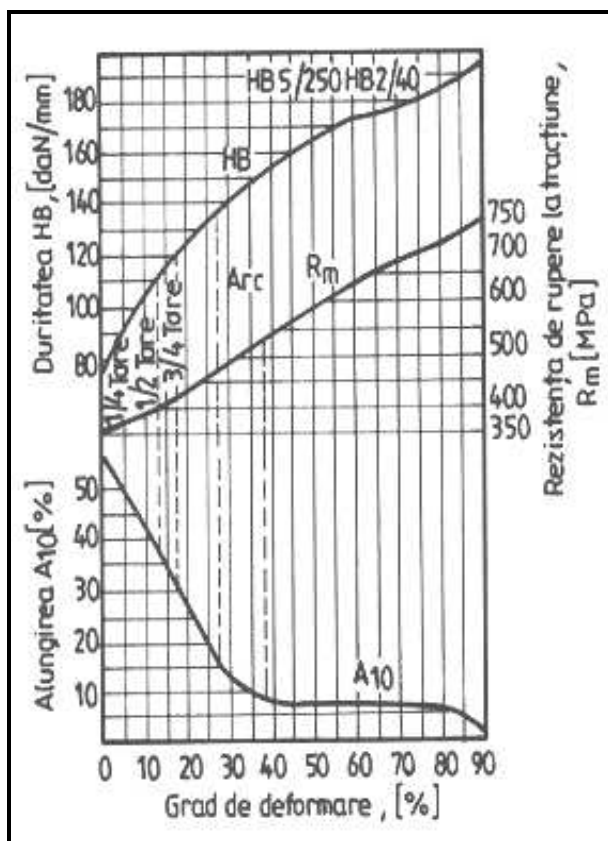


c

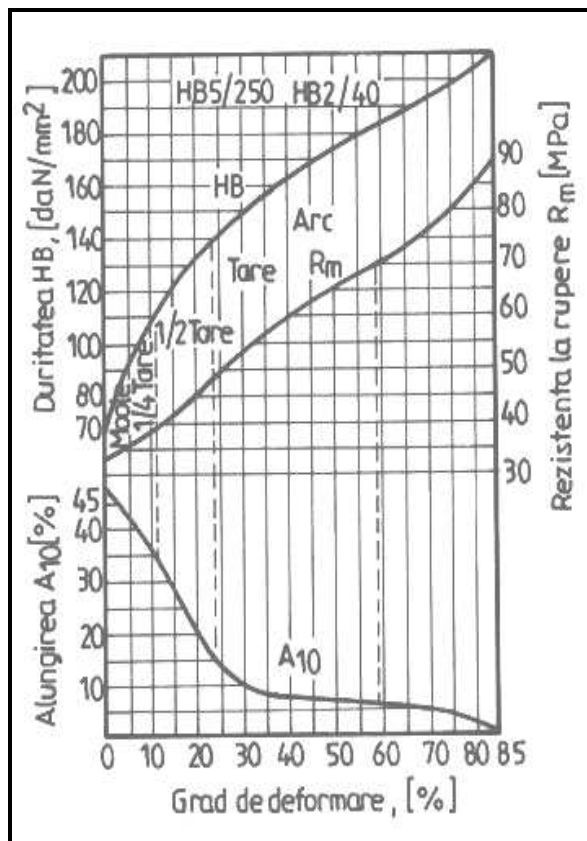


d

Fig.12.16. Diagramele de variație a caracteristicilor mecanice ale cuprului și aliajelor cupru-zinc cu gradul de deformare la laminarea la rece: a - pentru cuprul electrolitic Cu-OF conform SR ISO 431:1995 (__ mărirea de grăunte 0,015mm; __ mărirea de grăunte 0,040 mm; b - pentru alama CuZn10 (mărirea de grăunte 0,018 mm); c - pentru alama CuZn15 (__ mărirea de grăunte 0,015 mm; __ mărirea de grăunte 0,070 mm; d - pentru alama CuZn30;



e



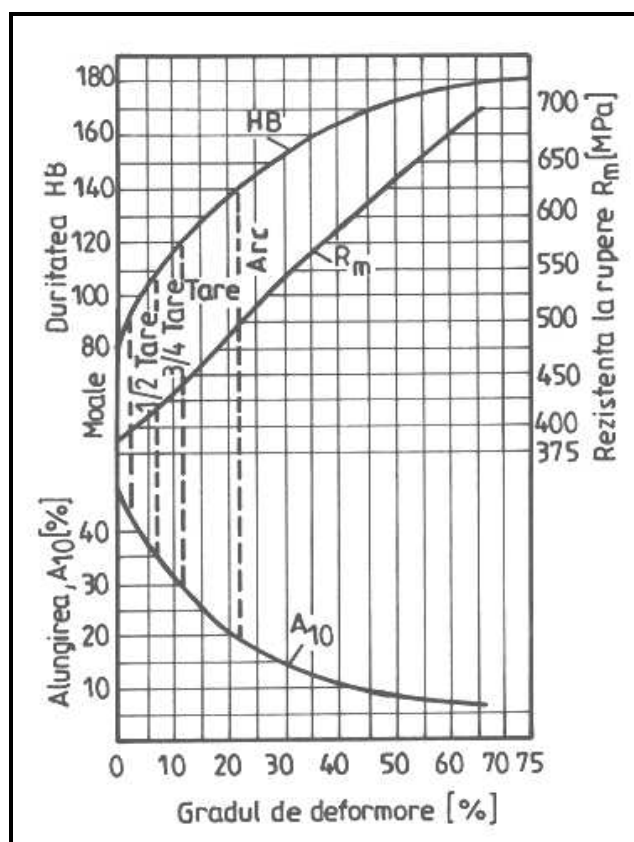
f

Fig.12.16. (continuare):

e – pentru alama CuZn30 (mărima de grăunte 0,020mm);

f – pentru alama CuZn37 (mărima de grăunte 0,06 mm);

g – pentru alama CuZn39Pb1 (mărima de grăunte 0,012 mm).



g

Tabelul 12.9

Aliaje speciale cupru-aluminiu deformabile (SR ISO 428:1996)

Simbolizare	Compoziția chimică, %										ρ kg/dm ³
	Cu	Al	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	Si	Sn	Zn	
CuAl7Fe3Sn	Rest	6,0 8,0	1,5 3,5	- -	- 1,0	- 1,0	- 0,05	- -	0,15 0,50	- 0,5	7,7
CuAl7Si2	Rest	6,0 7,6	- 0,8	- -	- 0,1	- 0,2	- 0,25	1,5 2,4	- 0,20	- 0,5	7,7
CuAl8Fe3	Rest	6,5 8,5	1,5 3,5	- -	- 1,0	- 1,0	- 0,05	- -	- -	- 0,5	7,7
CuAl9Fe4Ni4	Rest	8,0 11,0	2,5 4,5	- -	- 3,0	2,5 5,0	- 0,1	- 0,1	- 0,2	- 0,5	7,6
CuAl9Mn2	Rest	8,0 10,0	- 1,5	- -	1,5 3,0	- 0,8	- 0,05	- -	- -	- 0,5	7,5
CuAl9Ni3Fe2	Rest	8,0 9,5	1,0 3,0	- 0,05	- 2,5	1,5 4,0	- 0,05	- 0,1	- 0,2	- 0,2	7,5
CuAl10Fe3	Rest	8,5 11,0	2,0 4,0	- -	- 3,5	- 1,0	- 0,05	- -	- -	- 0,5	7,6
CuAl10Ni5Fe4	Rest	8,5 11,0	2,0 5,0	- -	- 1,5	4,0 6,0	- 0,05	- -	- -	- 0,5	7,6

Tabelul 12.10

Aliaje speciale Cu-Ni-Zn deformabile (SR ISO 430:1995)

Simbolizare	Compoziția chimică, %						ρ kg/dm ³
	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	
CuNi18Zn20	60,0 64,0	- 0,3	- 0,5	17,0 19,0	- 0,5	Rest	8,8
CuNi18Zn27	53,0 56,0	- 0,3	- 0,5	17,0 19,0	- 0,5	Rest	8,7
CuNi15Zn21	62,0 66,0	- 0,3	- 0,5	14,0 16,0	- 0,5	Rest	8,7
CuNi12Zn24	62,0 66,0	- 0,3	- 0,5	11,0 13,0	- 0,5	Rest	8,7
CuNi12Zn29	57,0 61,0	- 0,3	- 0,5	11,0 13,5	- 0,5	Rest	8,6
CuNi10Zn27	61,0 65,0	- 0,3	- 0,5	9,0 11,0	- 0,5	Rest	8,6
CuNi18Zn19Pb1	59,0 63,0	- 0,3	- 0,7	17,0 19,0	0,5 1,5	Rest	8,8
CuNi10Zn28Pb1	59,0 63,0	- 0,3	- 0,7	9,0 11,0	1,0 2,0	Rest	8,6

Comportarea la deformarea prin laminare a bronzurilor a fost studiată în măsură destul de redusă și, în consecință, în literatura de specialitate se dau indicații tehnologice foarte sumare, cu caracter informativ. O particularitate a bronzurilor este intervalul mare de temperaturi la care are loc cristalizarea și, ca urmare, aceste bronzuri prezintă tendință accentuată spre *segregație interdendritică*. Cu cât este mai scăzută temperatura de turnare și mai ridicată

viteza de răcire, cu atât zona cristalelor columnare este mai puțin adâncă. În același timp, creșterea vitezei de răcire asigură o structură cu grăunți fini, măbind astfel plasticitatea aliajului în stare turnată.

Intervalul temperaturilor de deformare pentru bronzurile speciale este 750...850°C (v. tabelul 11.1). Intervalul îngust al temperaturilor de deformare conduce la necesitatea deformărilor cu număr minim de operații și treceri. O asemenea deformare duce la mărirea rezistenței la deformare a materialului. Mărirea vitezei de deformare conduce, de asemenea, la mărirea rezistenței la deformare. La temperaturi ridicate, bronzurile au plasticitatea mică, insuficientă pentru laminarea la cald, acest procedeu de prelucrare aplicându-se destul de rar.

Semifabricatele turnate din aliaje cupru-staniu destinate laminării la rece se supun, în prealabil, tratamentului termic de recoacere de omogenizare la temperatura de 750...780°C timp de circa 6 h, prin care se urmărește atât uniformizarea compoziției chimice, cât și descompunerea fazelor fragile.

Pentru laminarea la rece a bronzurilor cu staniu, semifabricatele turnate nu vor avea o grosime mai mare de 60...65 mm. Reducerile aplicate, fără tratamentul termic de recoacere de recrystalizare, pot ajunge la circa 35...60 %, cu reduceri medii pe trecere de 8...25 %. Reduceri cu valori tot mai mari pe treceri se vor aplica bronzurilor speciale cu structură de deformare, recrystalizată și pe măsură ce grosimea semifabricatului se micșorează pe parcursul operațiilor de laminare la rece.

Comportarea unor bronzuri la deformarea prin laminare la rece și la încălzirea efectuată după o asemenea deformare este prezentată în figura 12.17.

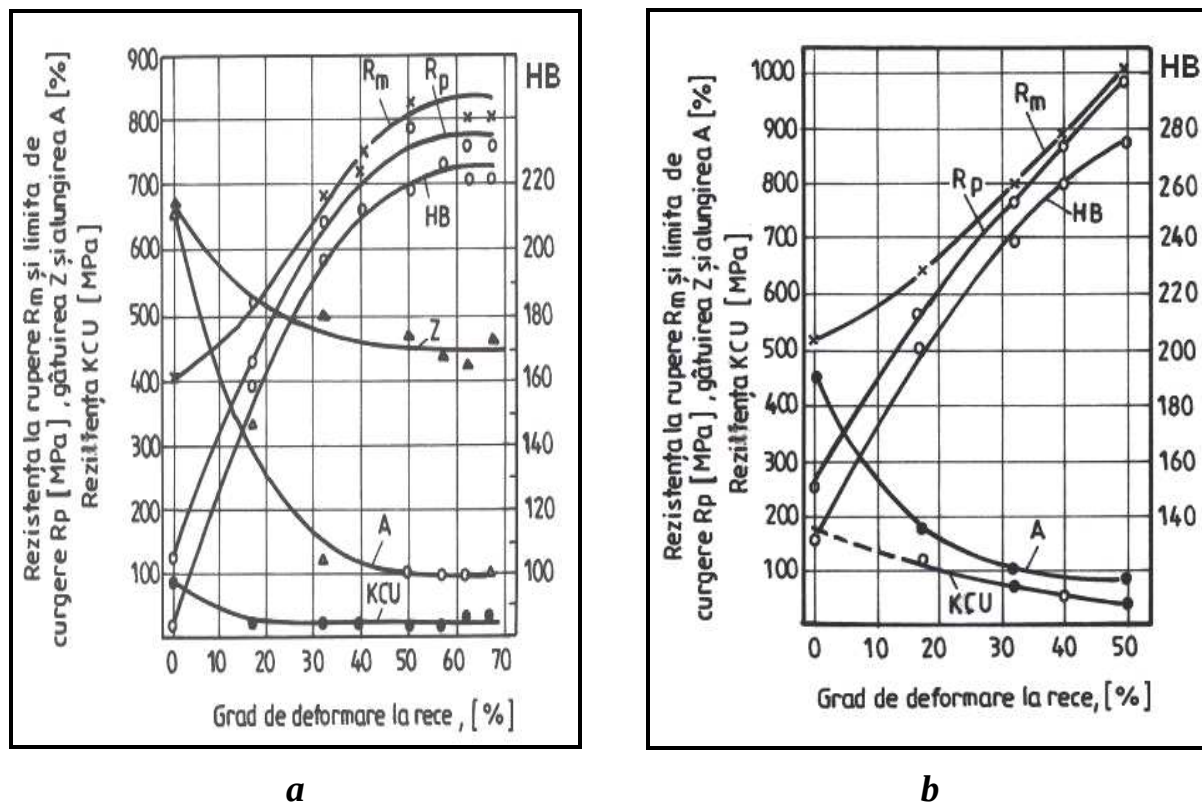
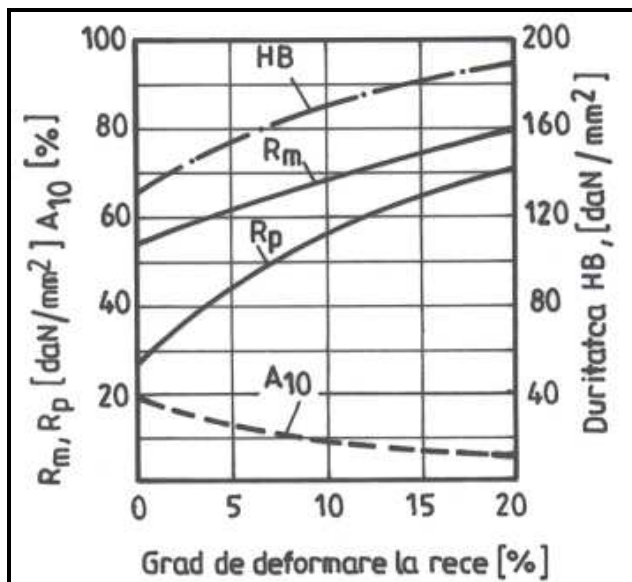
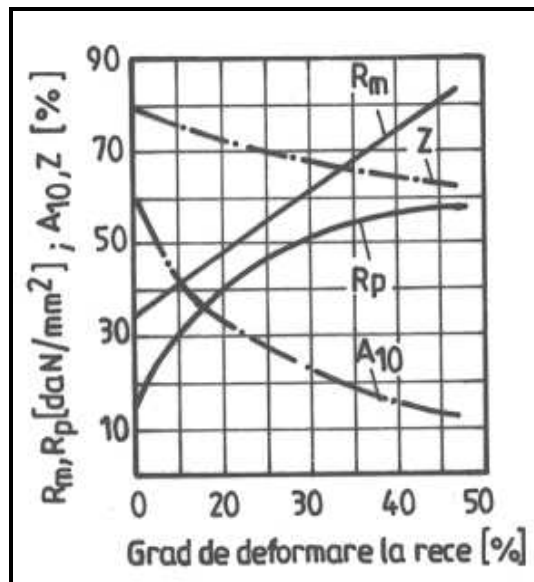


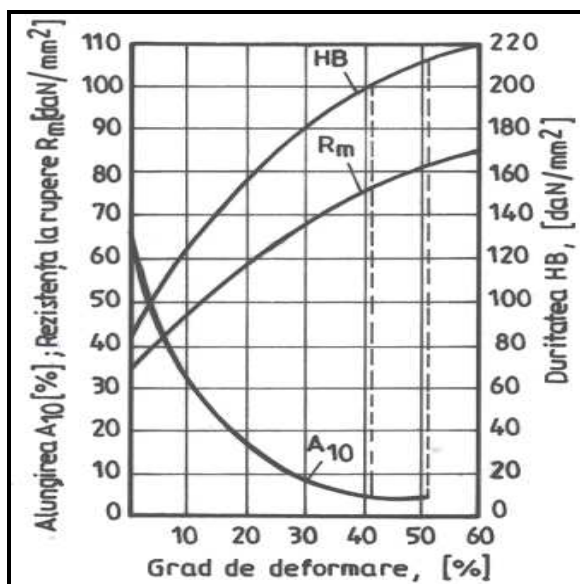
Fig.12.17. Diagramele de variație a caracteristicilor mecanice ale unor bronzuri cu gradul de deformare la laminarea la rece:
a - pentru bronzul CuSn5; b - pentru bronzul CuSn8



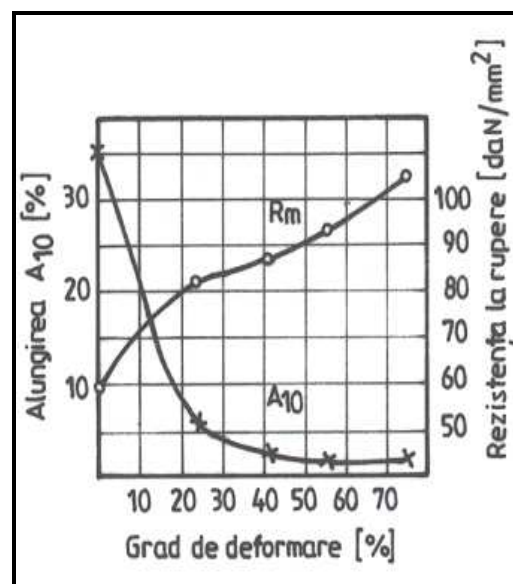
c



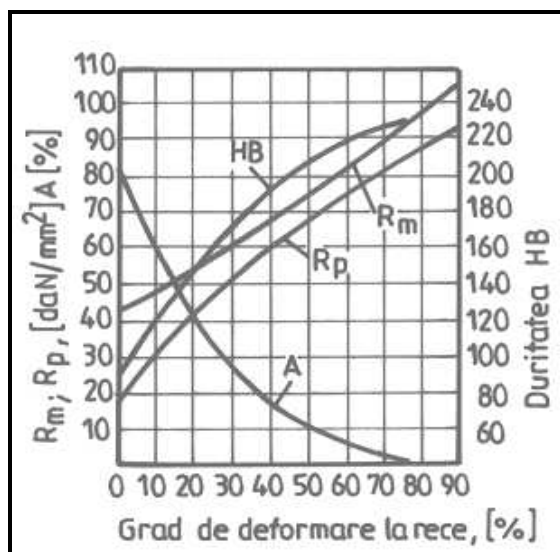
d



e

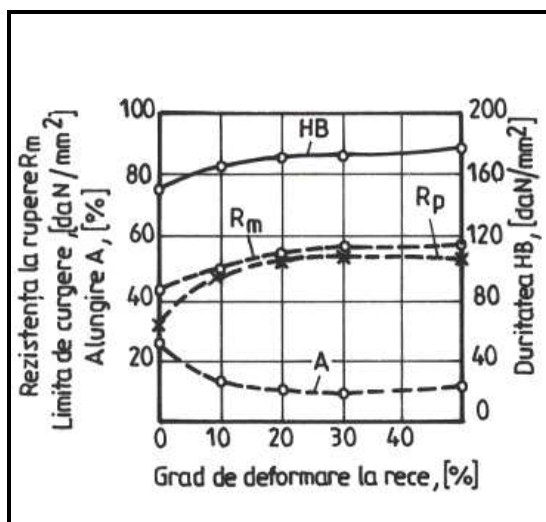


f

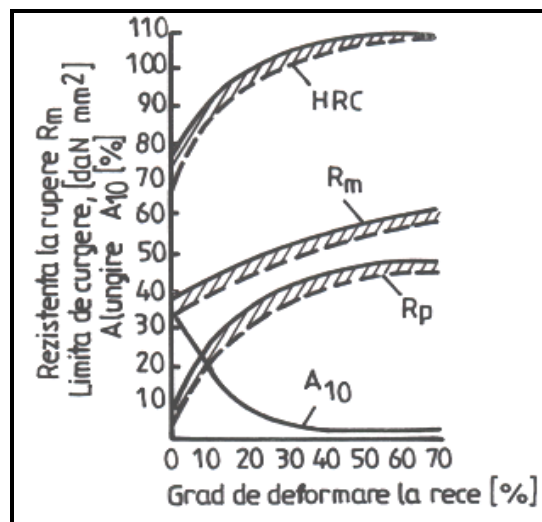


g

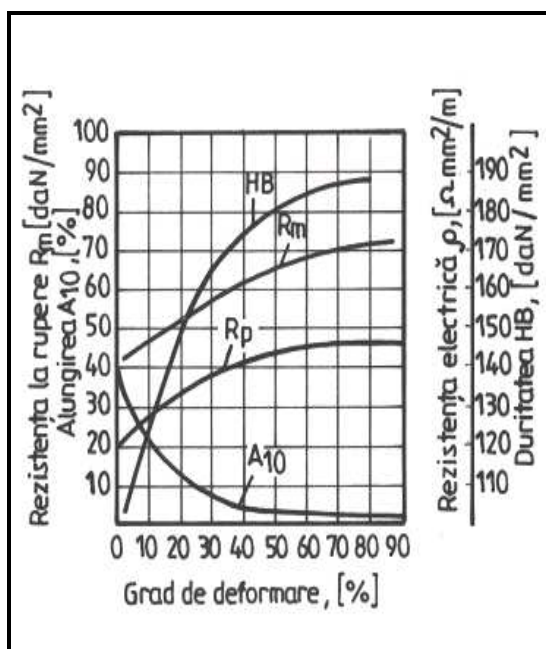
Fig. 12.17. (continuare):
 c - pentru bronzul CuAl10Fe3;
 d - pentru bronzul
 CuAl10Ni5Fe4;
 e - pentru bronzul CuSi3Mn1;
 f - pentru bronzul Cu+20%Mn+
 20%Ni;
 g - pentru bronzul CuSn7P.



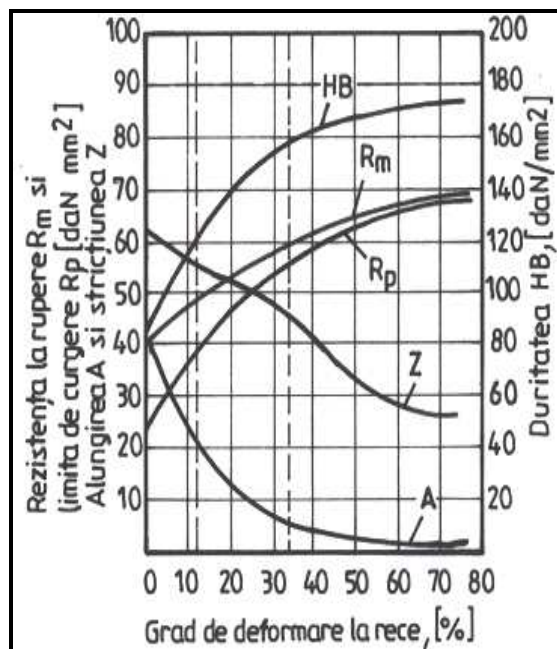
h



i



j



k

Fig. 12.17. (continuare):

h - pentru bronzul CuCr1; *i* - pentru bronzul Cu-13%Ni (—mărimea de grăunte 0,015mm; — — —mărimea de grăunte 0,05 mm; *j* - aliaj Cu-30%Ni; *k* - aliaj Cu-13%Ni-17%Zn.

Pentru trei tipuri caracteristice de bronzuri deformabile la cald, cu structură inițială de turnare și de deformare la cald, respectiv bronzuri din sistemele:

- bronz 1: sistemul Cu-Al-Fe cu compoziția 8,5...11,0 %Al și 2,0...4,0%Fe (*CuAl10Fe3* conform standardului românesc SR ISO 428:1996, v. tabelul 12.9);
- bronz 2: sistemul Cu-Be-Ni cu compoziția chimică 1,9...2,2%Be și 0,2...0,5% Ni (*BrBe2* conform standardului rusesc GOST 1789);
- bronz 3: sistemul Cu-Sn-P cu compoziția 7,5...9,0%Sn și 0,1...0,4%P (*CuSn8P* conform standardului românesc SR ISO 427:1996, v. tabelul 12.8),

s-au obținut următoarele caracteristici de deformabilitate:

a) domeniul de temperaturi cu plasticitate maximă:

- pentru bronzul 1 - deformare la cald: 700...900°C;
- pentru bronzul 2 - deformare la cald: 600...800°C;
- deformare la rece: 20...200°C;
- pentru bronzul 3 - deformare la cald: 700...800°C;
- deformare la rece: 20...200°C.

b) tipuri de procese de deformare care pot fi aplicate:

- bronzul 1 este aliaj foarte plastic și poate fi prelucrat prin laminare, dar și prin forjare, matrițare și extrudare;

- bronzul 2 în intervalul de temperaturi de 20...200°C este un material foarte plastic și poate fi procesat la rece prin laminare, dar și tragere; în intervalul de temperaturi corespunzător deformării la cald poate fi procesat prin procedee de laminare precum și prin extrudare;

- bronzul 3 prezintă plasticitate ridicată la rece și poate fi prelucrat prin laminare, dar și prin tragere; în domeniul temperaturilor corespunzătoare deformării la cald aliajul prezintă plasticitate practic neînsemnată, din această cauză acest aliaj se procesează la cald doar prin extrudare, chiar și prin acest procedeu deformarea executându-se cu dificultate.

Pentru aliajele reprezentative acestor trei grupe de bronzuri se prezintă în figurile 12.18...12.20 domeniile de plasticitate, iar în figurile 12.21...12.23, variația rezistenței la deformare în funcție de temperatură.

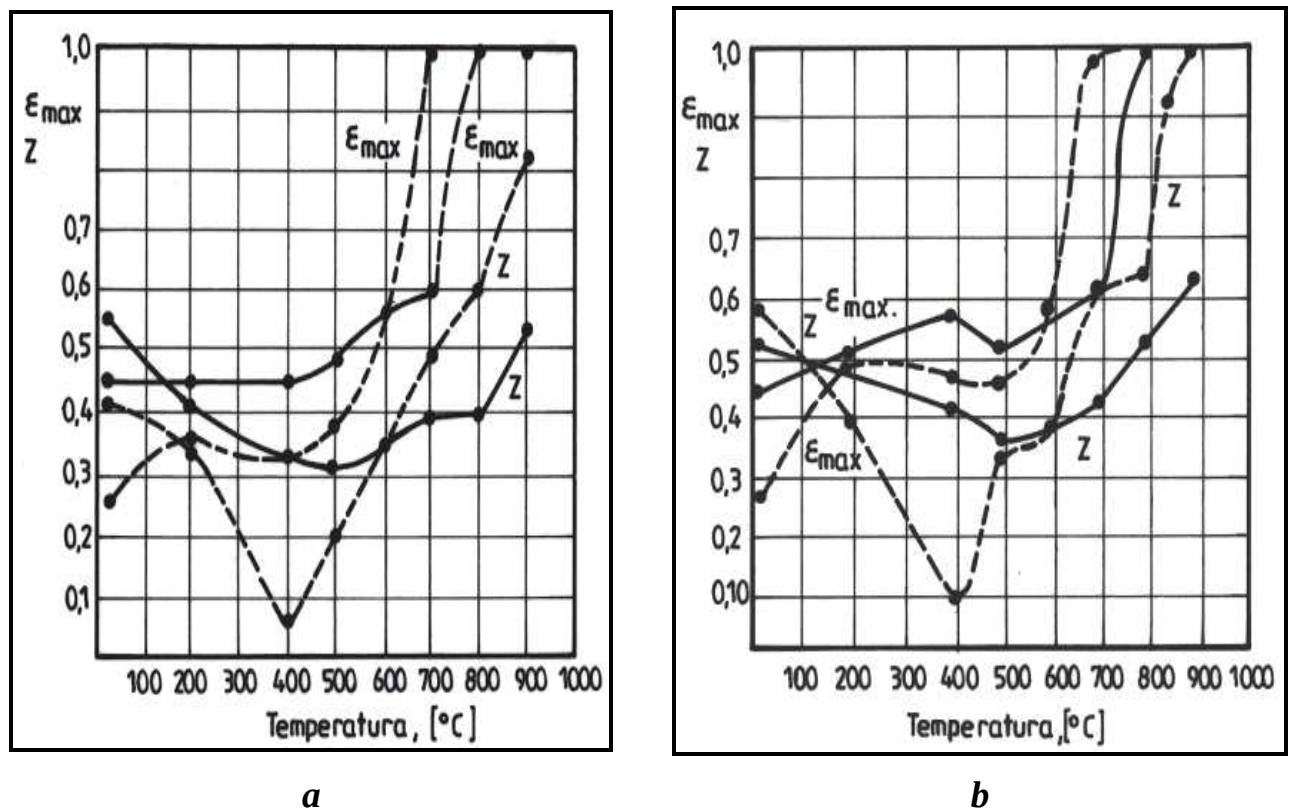
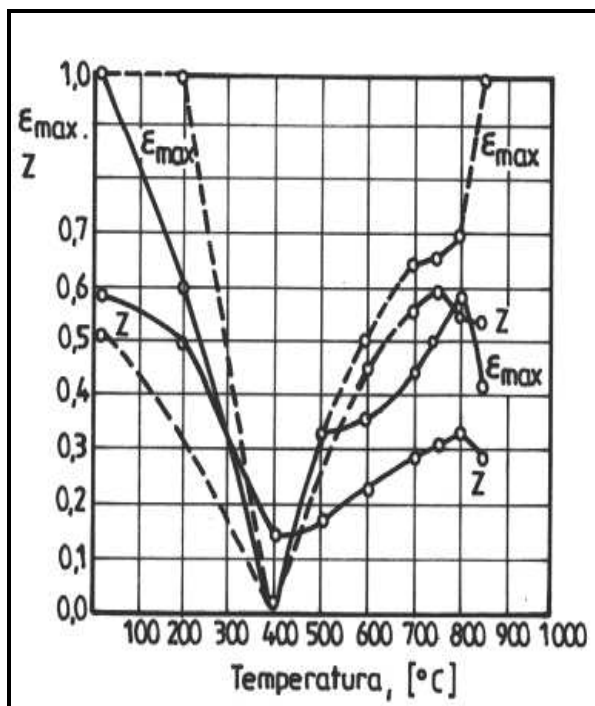
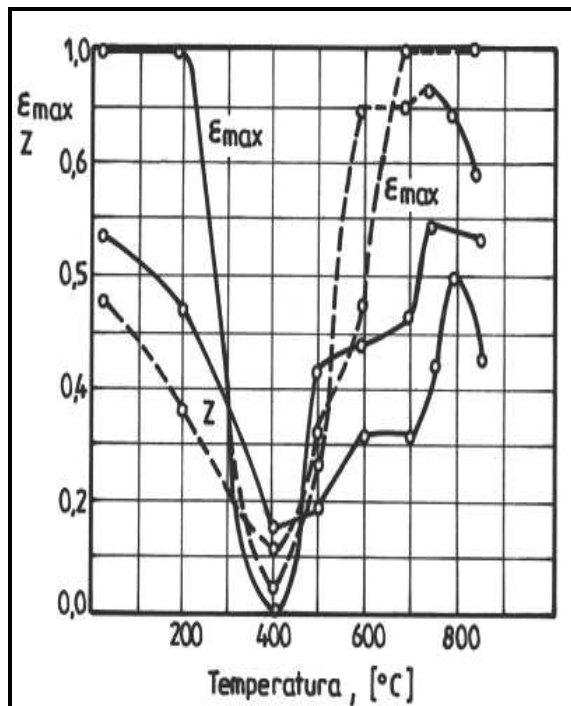


Fig. 12.18. Diagramele de variație a plasticității exprimată prin gradul maxim de reducere ϵ_{max} și stricțiunea Z în funcție de temperatura de deformare a bronzului CuAl10Fe3 în stare turnată (a) și în stare deformată (b).

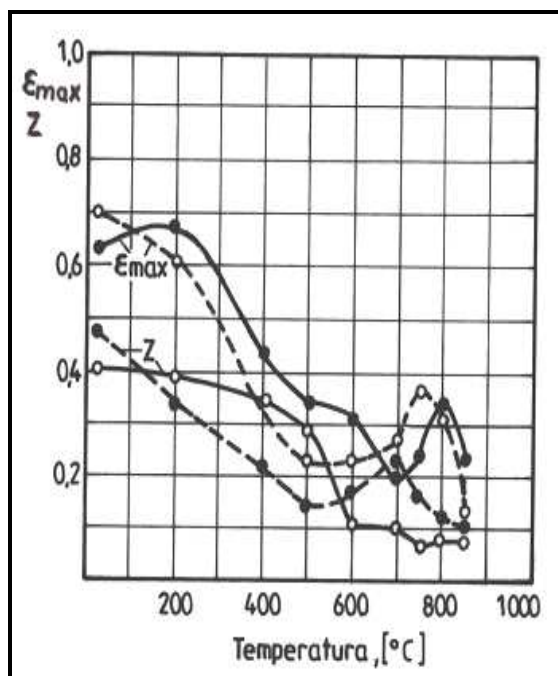


a

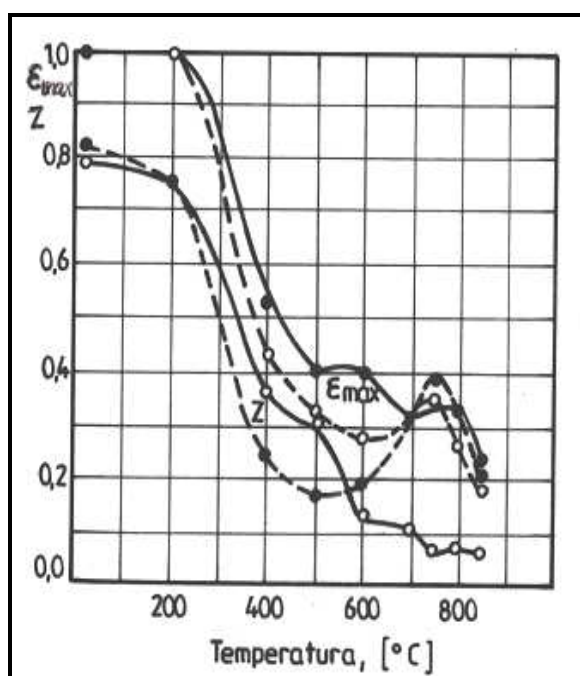


b

Fig. 12.19. Diagramele de variație a plasticității exprimată prin gradul maxim de reducere $\varepsilon_{\max}$ și stricțiunea Z în funcție de temperatura de deformare a bronzului $BrBe_2$ în stare turnată (a) și în stare deformată (b).



a



b

Fig. 12.20. Diagramele de variație a plasticității exprimată prin gradul maxim de reducere $\varepsilon_{\max}$ și stricțiunea Z în funcție de temperatura de deformare a bronzului $CuSn_8P$ în stare turnată (a) și în stare deformată (b).

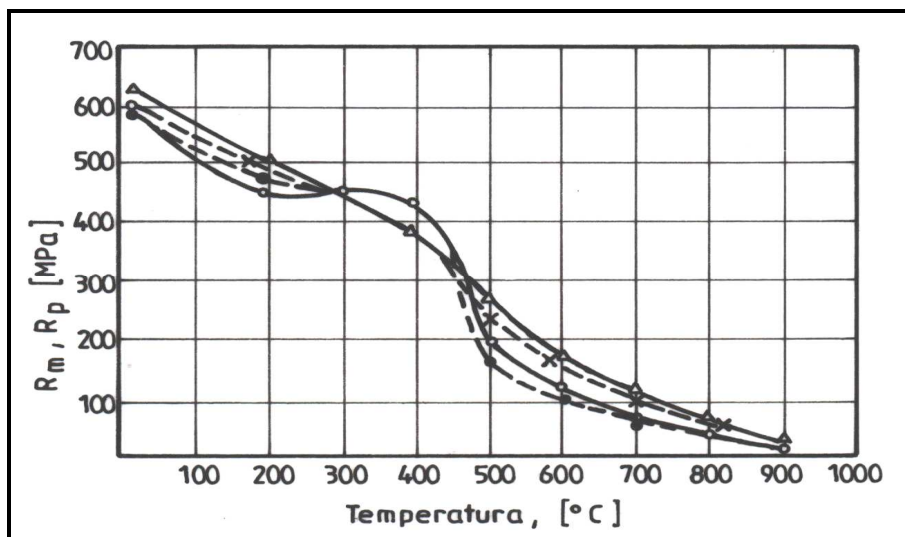


Fig. 12.21. Variația rezistenței la deformare exprimată prin rezistența la rupere R_m și limita de curgere R_p în funcție de temperatura de deformare a bronzului $CuAl10Fe3$: _ _ _ în stare turnată; ____ în stare deformată.

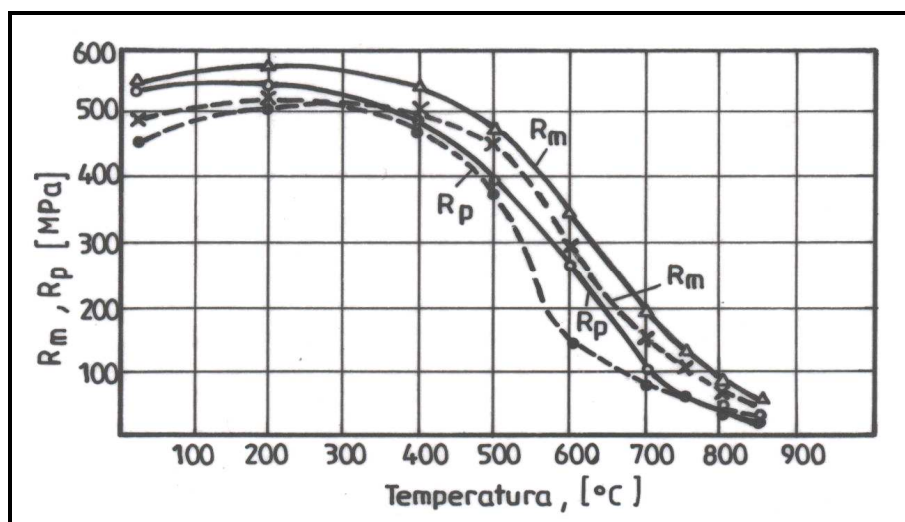


Fig. 12.22. Variația rezistenței la deformare exprimată prin rezistența la rupere R_m și limita de curgere R_p în funcție de temperatura de deformare a bronzului $BrBe2$: _ _ _ în stare turnată; ____ în stare deformată.

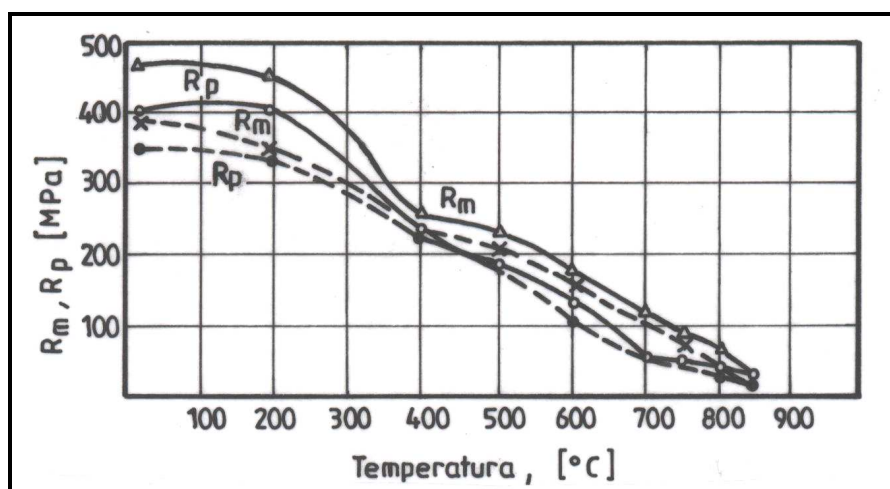


Fig. 12.23. Variația rezistenței la deformare exprimată prin rezistența la rupere R_m și limita de curgere R_p în funcție de temperatura de deformare a bronzului $CuSn8P$: _ _ _ în stare turnată; ____ în stare deformată.

Din examinarea acestor diagrame rezultă următoarele:

- caracteristicile de deformabilitate depind de natura aliajului și constituenții structurali ai acestuia; astfel se constată diferențe esențiale între valorile caracteristicilor de deformabilitate ale aliajelor în stare turnată și în stare de deformare la cald (prin extrudare);

- pentru bronzurile din sistemul Cu-Sn-P se constată un interval foarte îngust de temperaturi (700...800°C), în care pot avea loc procese de deformare la cald; de asemenea, datorită deformabilității reduse a acestor aliaje, pot fi prelucrate plastic numai în condițiile unor stări de tensiune cu comprimări triaxiale, cum este de exemplu cazul extrudării; de asemenea, această clasă de bronzuri nu poate fi deformată prin procese caracterizate de viteze ridicate de deformare;

- în cazul bronzurilor din sistemul Cu-Be-Ni, care sunt foarte plastice atât la cald cât și la rece, se constată că valoarea superioară a temperaturilor pentru deformare la cald este limitată la 800°C; peste această valoare, deformabilitatea aliajului scade;

- bronzurile din sistemul Cu-Al-Fe prezintă deformabilitate ridicată la cald (la 700...900°C) atât prin prelucrare plastică statică cât și dinamică; diferența între valorile parametrilor de deformabilitate ale aliajului prelucrat static și dinamic în intervalul de temperaturi (0,4...0,64) T_{top} se explică prin mecanismul deformării în cele două situații.

Bronzurile cu staniu și fosfor sunt bronzuri deformabile (laminabile) care se caracterizează printr-un conținut mai redus de staniu decât cele de turnătorie, astfel încât structura să fie monofazică, alcătuită din soluție solidă α -plastică atât la cald cât și la rece. Bronzurile deformabile conțin, în general, maximum 8...9 %Sn. Ca adaosuri de aliere se utilizează în special fosforul, în proporție de 0,02...0,4 %, zincul în proporție de 2...5 % și plumbul în proporție de 1,5...4,5%, acesta din urmă cu scopul de a îmbunătăți prelucrabilitatea prin așchiere.

Bronzurile cu beriliu au devenit aliaje deosebit de importante pentru tehnica modernă, datorită proprietăților excepționale de rezistență și duritate, elasticitate, rezistență la oboseală și uzură. Bronzurile cu beriliu industriale se utilizează pentru turnare și pentru laminare. Bronzurile cu beriliu deformabile (laminabile) conțin în mod normal, 2...2,7 %Be. La conținuturi mai mici, sub 1%Be, durificarea este insuficientă, iar la conținuturi de peste 2,7 %Be aliajele se deformează greu, datorită prezenței fazei β . Pentru a economisi beriliu se adaugă elemente de aliere, care au același efect de durificare, dar mai slab, cum sunt cobaltul, fierul nichelul, siliciul, argintul, manganul sau titanul.

Laminarea la rece după călirea de punere în soluție a bronzurilor cu beriliu mărește duritatea la maximum realizabil și accelerează durificarea. De fapt ecruisajul creează germeni care măresc viteza de precipitare. Astfel, gradul de dispersie a precipitatelor este mai mare, iar prin tratament termic se obțin caracteristici mecanice superioare.

Bronzurile cu aluminiu industriale pot fi binare (aliaje cupru-aluminiu) sau complexe care, în afară de componenții de bază, cupru și aluminiu, conțin adaosuri de aliere ca fier, mangan, nichel sau plumb. În funcție de structură și proprietăți, se pot distinge trei categorii principale descrise în continuare.

a) aliaje deformabile la rece, cu structură monofazică (soluție solidă α , omogenă și plastică) cu mai puțin de 7 % aluminiu;

b) aliaje deformabile la cald, care conțin 8,0...11,0 %Al și se pot deforma ușor la cald, în stare de soluție solidă omogenă β ; printr-un tratament de călire se poate menține faza β și la temperatura ambiantă, însă în stare de echilibru metastabil;

c) aliaje de turnătorie, care conțin 9...15 %Al și de cele mai multe ori sunt aliaje complexe, cu adaosuri de fier, mangan, nichel sau plumb.

În ceea ce privește *rezistența la deformare* a acestor clase de aliaje se pot menționa următoarele:

- în cazul aliajului Cu-Be-Ni, creșterea temperaturii până la 400°C nu produce scăderea accentuată a rezistenței la deformare, valoarea acesteia se menține ridicată (de până la 400 MPa) până la temperatura de 500°C;

- la bronzurile cu Al și Fe, încălzirea până la 400°C produce reducerea rezistenței la deformare de la 600 la 430 MPa, iar la bronzurile Cu-Sn-P încălzirea până la 200°C nu produce practic nici o modificare a rezistenței la deformare;

La aliajele din aceste trei clase de bronzuri, cercetările privind deformarea prin extrudare la temperaturi de 650...680°C, au condus la următoarele valori ale presiunii de deformare:

- aliaj Cu-Al-Fe ; $p_m = 80 \text{ MPa}$;

- aliaj Cu-Be-Ni ; $p_m = 125 \text{ MPa}$;

- aliaj Cu-Sn-P ; $p_m = 110 \text{ MPa}$.

În funcție de cele de mai sus se prezintă următoarele concluzii privind comportarea la deformare a acestor trei clase de bronzuri:

- bronzurile cu Al și Fe prezintă o foarte înaltă plasticitate la cald, atât în stare turnată cât și în stare deformată la cald; aliajele se deformează bine atât prin solicitări statice cât și dinamice; astfel se pot forja și matrița la cald la ciocane cu viteze de impact de până la 5...6 m/s, se pot extruda cu viteze de până la 100...120 cm/s și, respectiv, se pot lamina cu ori și ce valoare a gradului de deformare;

- bronzurile cu Be și Ni prezintă două domenii cu plasticitate ridicată respectiv atât la temperaturi joase (deformare la rece) cât și la temperaturi de 600...850°C; la deformarea la rece prin laminare se pot aplica reduceri mari, iar prin tragere reducerea de secțiune poate ajunge până la 20%; pentru laminarea la cald, intervalul de temperatură recomandat este 600...800°C, iar pentru extrudare domeniul este mult mai îngust respectiv 730...780°C;

- bronzurile cu Sn și P la temperaturi joase (deformare la rece) sunt foarte plastice, putându-se aplica reduceri mari la laminare, iar la tragere reducerile de secțiune pe treceri nu vor depăși 15...20%; laminarea la cald este posibilă într-un interval îngust de temperaturi și la viteze de deformare foarte joase; plasticitatea foarte redusă a acestor aliaje, face ca la extrudare să nu se depășească viteze de deformare de 50...80 mm/s.

În cazul laminării la rece a bronzurilor speciale reducerea totală maxim admisă, între două tratamente termice de recoacere de recristalizare, variază între 50 și 80 %, iar reducerile pe treceri, între 15 și 45 %.

Capitolul 13

LAMINAREA ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE CU BAZĂ DE NICHEL

Nichelul este foarte mult utilizat sub formă de aliaje. Utilizarea nichelului este determinată în principal de proprietățile remarcabile de rezistență la coroziune, proprietăți deosebit de importante în industria chimică și alimentară.

Aliajele cu bază de nichel mai importante conțin cupru, crom sau fier, iar cele speciale sunt aliaje complexe care conțin elemente ca mangan, beriliu, aluminiu, siliciu, titan și molibden care formează combinații ce precipită provocând efecte de durificare. Proprietățile de utilizare ale acestor aliaje diferă foarte mult de la un aliaj la altul: rezistență foarte mare la coroziune, rezistivitate electrică ridicată, proprietăți remarcabile la temperaturi ridicate, permeabilitate magnetică mare sau constantă la variația câmpului magnetic, coeficient de dilatare termică mic etc.

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

Nichelul este elementul chimic situat în grupa a VIII-a a sistemului periodic al elementelor, este înrudit cu fierul, fiind un metal de tranziție din aceeași grupă a sistemului periodic al elementelor dar, totodată, face trecerea spre metalele stabile, respectiv cupru, cu care se aseamănă în multe privințe.

Nichelul cristalizează în sistemul de cristalizare *cub cu fețe centrate*, cu parametrul rețelei 3,516Å și nu prezintă nici o transformare alotropică.

Greutatea specifică, la temperatura de 20°C, calculată pe baza parametrului de rețea este de 8,907g/cm³. Coeficientul de dilatare termică liniară, între 27°C și 100°C, este de $13 \times 10^{-6} (^{\circ}\text{C})^{-1}$ și crește cu temperatura până la un maxim, în apropierea punctului Curie de la 368°C.

Căldura masică variază cu temperatura și trece printr-un maximum în punctul Curie (fig.13.1). Valoarea medie, între 27 și 100°C, este de 544 J/Kg K.

Conductivitatea termică a nichelului este cu atât mai mare cu cât puritatea acestuia este mai ridicată. La 100°C conductivitatea termică λ are valoarea de 0,198 cal/cm.s°C, iar valoarea medie pentru intervalul de temperaturi 27...100°C este de 0,145 cal/cm.s°C (60,7 w/m.K);

Rezistivitatea electrică la 20°C a nichelului electrolitic este 6,844μΩcm. Această valoare crește cu temperatura, coeficientul de temperatură mediu pentru

intervalul 0...100°C fiind de 0,00692. În funcție de rezistivitatea electrică la 20°C, rezistivitatea la diferite temperaturi crește și anume, de circa 4 ori până la 350°C și de circa 6 ori până la 900°C (fig.13.2).

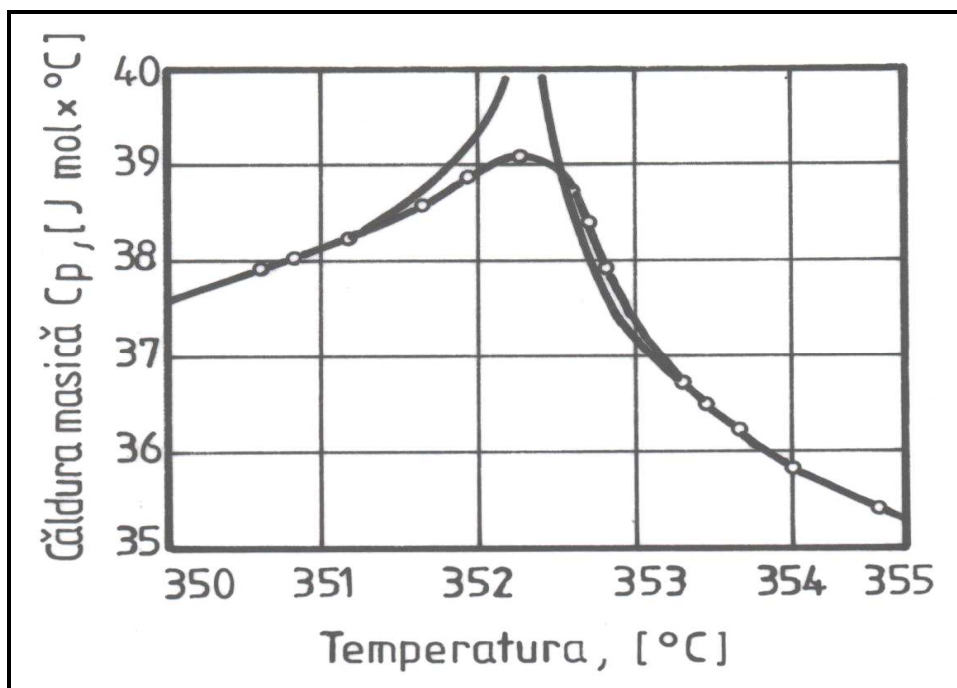


Fig.13.1. Variația căldurii masice a nichelului în apropierea punctului Curie.

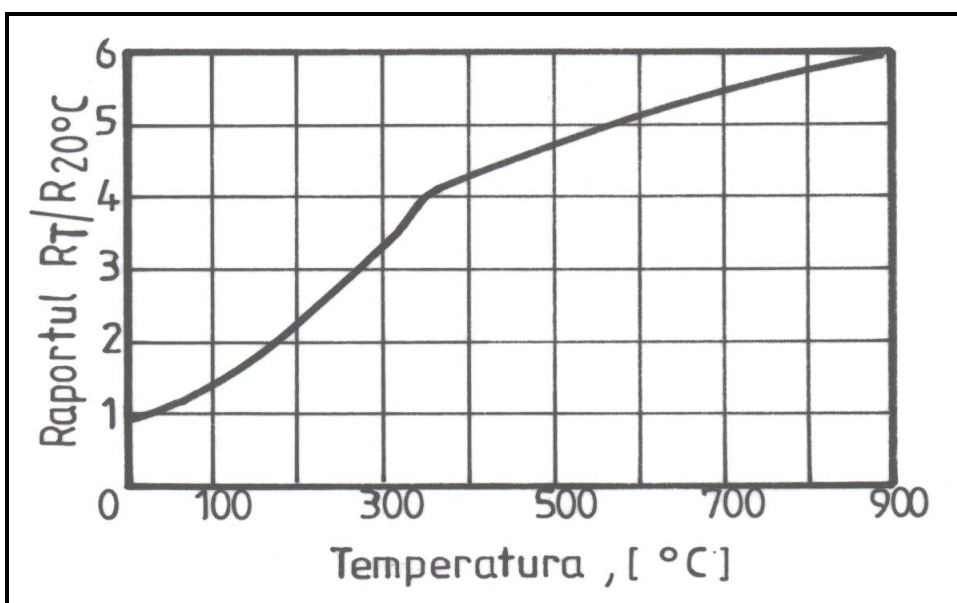


Fig.13.2. Variația raportului de rezistivitate R_T/R_{23}^0 în funcție de temperatură în cazul nichelului.

Referitor la *proprietățile magnetice*, nichelul este feromagnetic la temperatura ambiantă, având direcția cristalografică <111> de ușoară magnetizare. Această proprietate se păstrează până la temperatura punctului Curie (368°C). Permeabilitatea magnetică a nichelului este cu atât mai mare cu cât și puritatea acestuia este mai ridicată. În schimb, ecruisarea reduce

permeabilitatea magnetică și ridică valoarea câmpului coercitiv. Aceste efecte sunt practic anulate prin recristalizare.

Proprietățile mecanice ale nichelului, determinate pe eșantioane policristaline de înaltă puritate în stare recoaptă, au următoarele valori:

$$R_m = 270 \pm 20 \text{ MPa}; \quad R_{p02} = 34 \pm 5 \text{ MPa};$$

$$A_5 = 20 \pm 4 \%; \quad HV = 670 \pm 40 \text{ MPa}.$$

Modulul de elasticitate al lui Young are valoarea $E = 211000 \text{ MPa}$ în stare demagnetizată și $E = 226000 \text{ MPa}$ în stare magnetizată la saturație. Prin reducerea purității nichelului proprietățile de rezistență cresc simțitor. Variația proprietăților mecanice ale nichelului tehnic în funcție de gradul de reducere ε aplicat la deformarea la rece este dată de următoarele relații:

$$R_m = (R_m)_0 + 1,1 \varepsilon^{0,81}; \quad R_{p02} = (R_{p02})_0 + 13,7 \varepsilon^{0,38};$$

$$HB = (HB)_0 + 21,6 \varepsilon^{0,46}; \quad \lg A_5 = 1,672 - 0,0224\varepsilon + 0,0001\varepsilon^2.$$

în care valorile cu indice "o" corespund stării moale recristalizate.

Principalele proprietăți mecanice și fizice ale nichelului sunt prezentate în tabelul 13.1.

Tabelul 13.1

Caracteristici mecanice și fizice ale nichelului

Nr. crt.	Proprietatea	Unitatea de măsură	Valoarea
1.	Rezistența la rupere, R_m	MPa	circa 470
2.	Limita de curgere, R_c	MPa	circa 150
3.	Alungirea la rupere, A_s	%	circa 40
4.	Modulul de elasticitate longitudinal, E	MPa	205 800
5.	Conductibilitatea termică (20°C...100°C)	W/mK (cal/cm · grd/s)	60,7 (0,145)
6.	Rezistivitatea electrică (20°C)	Ohm·m	$9,5 \cdot 10^{-8}$
7.	Coeficientul de dilatare termică liniară (între 27°C și 100°C)	grd ⁻¹	$13 \cdot 10^{-8}$
8.	Căldura latentă de topire	(cal/grd)	$308,98 \cdot 10^3$
9.	Căldura specifică medie între 27 și 100°C	J/kg K (cal/g·grd)	544 (0,130)
10.	Temperatura de fierbere	°C	2800
11.	Temperatura de topire	°C	1455
12.	Densitatea (25°C)	kg/dm ³	8,89
13.	Temperatura de transformare magnetică	°C	368°C
14.	Parametrul rețelei	Å	3,516
15.	Rețeaua cristalină	-	c . f . c .
16.	Configurația electronică	-	[Ar] 3d ⁸ 4s ²
17.	Stări de oxidare	-	-
18.	Volumul atomic	cm ³ /mol	6,6
19.	Masa atomică	-	58,69
20.	Numărul atomic	-	28

În ceea ce privește *proprietățile tehnologice* ale nichelului se cunoaște că acesta este foarte sensibil la recristalizare în prezența impurităților.

Temperatura de recristalizare depinde de gradul de deformare și de durata tratamentului de recoacere și are valoarea de 500°C pentru nichelul tehnic cu

puritatea de 99,2%, în timp ce la eşantioane de nichel cu puritate de 99,94 % temperatura de recristalizare coboară la 290°C.

Caracteristicile tehnologice mai importante ale nichelului sunt:

- temperatura de turnare 1550...1650 °C;
- temperatura de deformare la cald 1140...1250 °C;
- temperatura de recoacere 700...800 °C;
- temperatura de recristalizare 300 °C;
- contracția liniară la solidificare 1 %.

Deformabilitatea atât la cald cât și la rece a nichelului este ridicată. Deformația plastică introduce în structura nichelului defecte reticulare a căror concentrație crește cu gradul de deformare. Acest fenomen este evidențiat prin creșterea rezistivității materialului.

Textura de deformare a nichelului, determinată pe probe cu o puritate de 99,96%, are orientările (123) [121] pentru deformarea prin laminare. După recoacerea de recristalizare prelungită, tabla de nichel laminată are textura cubică (100) [001].

Privind *proprietățile chimice*, nichelul se aseamănă cu metalele prețioase. Astfel, nichelul se caracterizează prin mare stabilitate la coroziune în aer, în apă sau chiar în acizi. Nichelul este complet stabil față de apa dulce sau de mare, de soluțiile alcaline sau alcaliile topite, de amoniac și față de multe substanțe organice sau anorganice. Acidul sulfuric și clorhidric produc coroziune lentă. Chiar acidul fluorhidric, în comparație cu alte metale, îl atacă mai greu. În acid azotic diluat se dizolvă intens, dar în schimb, în acid azotic concentrat se pasivează.

13.2. ELEMENTE DE ALIERE ȘI IMPURITĂȚI ÎN ALIAJELE SPECIALE CU BAZĂ DE NICHEL

Aliajele speciale cu bază de nichel cuprind diferite clase de materiale, care se caracterizează prin *proprietăți speciale*, cum sunt rezistivitate electrică mare, forță termoelectromotoare, coeficient de temperatură a rezistivității foarte mic, proprietăți magnetice (permeabilitate magnetică înaltă sau constantă), dilatare termică foarte mică, refractaritate și rezistență la temperaturi ridicate, rezistență la oxidare și la coroziune etc.

De aceea, din punctul de vedere al domeniilor de utilizare, aceste aliaje se clasifică în aliaje pentru construcții de mașini, aliaje pentru electrotehnică, aliaje cu proprietăți speciale și aliaje termorezistente (refractare).

În funcție de *principalul element* de aliere, aliajele cu bază de nichel se pot clasifica în aliaje cu cupru, aliaje cu mangan, aliaje cu crom, aliaje cu fier, aliaje cu molibden, aliaje cu siliciu, aliaje cu titan, aliaje cu cobalt, aliaje cu aluminiu și aliaje cu beriliu. Câteva dintre aliajele mai uzuale și dintre cele speciale cu bază de nichel sunt prezentate în tabelul 13.2.

Impuritățile prezente în nichel se clasifică în trei categorii: a) impurități care reacționează cu nichelul cum sunt oxigenul, sulful, arsenul, fosforul, seleniul, telurul și stibiul; b) impurități practic insolubile cum sunt carbonul, plumbul, bismutul și cadmiul; c) impurități solubile în stare solidă cum sunt cobaltul, fierul, siliciul și cuprul.

Compoziția chimică și proprietățile specifice ale unor aliaje speciale cu bază de nichel

Tabelul 13.2

Grupa de aliaje	Clasa de aliaje	Denumirea aliajului	Compoziția chimică %	Proprietăți și utilizări
Aliaje Ni-Cu		Aliaje Monel binare	67...70% Ni; 25...30% Cu; max. 3% Fe, 1,5% Mn	Este folosit la construirea pieselor de mașini care lucrează în medii corosive (pompe, turbine, aparate chimice etc).
Aliaje Ni-Fe	Aliaje cu proprietăți magnetice speciale	Aliaje de tip Permalloy	78,5% Ni, 20,9% Fe; 0,6% Mn	Permeabilitate magnetică inițială mare Recept la 100°C și răcire rapidă.
			79% Ni; 15,4% Fe; 5% Mo; 0,6% Mn	Răcire în câmp magnetic. Permeabilitatea inițială foarte mare
		Perminvar	45% Ni; 30% Fe; 25% Co	Recoacere la 300°C. Permeabilitate magnetică constantă la o mare variație a câmpului magnetic
		Invar (invar)	35...37% Ni; max 0,3% C; restul fier	Coefficient de dilatare constant, $1,5 \cdot 10^{-6}$, între temperatura ambiantă și 100°C.
		Superinvar	31% Ni; 4...6% Co; restul fier	Coefficient de dilatare constant și mai mic decât al invarului.
	Aliaje cu proprietăți termice speciale	Kovar	28% Ni; 53% Fe; 18% Co	Coefficient de dilatare egal cu al platinei și al sticlei, motiv pentru care sunt utilizate sub formă de fire în locul platinei la sudarea cu sticlă, pentru confecționarea becurilor electrice.
		Platinin	42...48% Ni; max. 0,3% C; restul fier	Modulul de elasticitate constant la 0...40°C
		Elinvar	33% Ni; 51...53% Fe; 4...5% Cr; 1...3% W, Mo, Si și C câte 0,5...2% fiecare	Este utilizat la fabricarea instrumentelor de precizie, dispozitive pentru etaloane de frecvență, resorturi de ceasuri etc.
	Aliaje stabile la oxidare la cald	Cromel A	90% Ni; 20% Cr	Cromonichelurile binare sunt utilizate pentru coafte, țesut elementelor de încălzire ale cuprelor electrice, pușcă în foloie până la 1050°C
		Nicrom	60% Ni; 16% Cr; 24% Fe	Cromonichelurile cu fier sunt utilizate pentru confecționarea rezistențelor electrice, cușilor de comandă și de recoadere etc.
		Inconel	80% Ni; 14% Cr; 6% Fe	

Tabelul 13.2 (continuare)

0	1	2	3	4
Aliaje complexe cu bază de nichel durificabile structural	Aliaje inoxidabile	Aliaje complexe de tip Monel	Monel S Monel K500	Aliaje rezistente la coroziune și cu proprietăți de rezistență mecanică ridicate.
	Aliaje inoxidabile și refractare	Aliaje complexe de tip Inconel Aliaje complexe de tip Ni-Fe-Mo Aliaje de tip Hastelloy Aliaje Ni-Cr-Fe-Ti-Al cu sau fără cobalt de tip Nimonic Aliaje Ni-Cr-Co-Fe-Mo etc de tip Udimet	Inconel W Inconel X Hastelloy A Hastelloy B Hastelloy C Nimonic 90 Nimonic 100 Udimet 600 Udimet 700	Aliaje complexe de tip Nimonic, Inconel, Hastelloy și Udimet fac parte din categoria aliajelor cu refractaritate foarte înaltă numite superaliaje. Aliajele Hastelloy A și B sunt deosebit de rezistente la coroziune în acid clorhidric, în alți acizi și în săruri, iar Hastelloy C rezistă foarte bine la agenții oxidanți cum sunt clorul umed, acidul azotic etc
			67...70% Ni; max. 3% Fe; 3...4% Si; 1,2...1,5% Mn; restul Cu 63...70% Ni; max. 3% Fe; 3% Al; 0,5% Ti; 1% Mn; 1% Si; restul Cu 75% Ni; 15% Cr; 7% Fe; 2,5% Ti; 1% Mn; 1% Si; restul Cu 73% Ni; 15% Cr; 7% Fe; 2,3% Ti; 0,8% Nb + Ta; 0,9% Al; restul Mn, Si etc 56% Ni; 22% Fe; 22% Mo 62% Ni; 6% Fe; 32% Mo 53% Ni; 17% Cr; 6% Fe; 19% Mo 18...21% Cr; 15...21% Co; 2...2,8% Ti; 0,8...1,2% Al; circa 1% Fe; 0,1% C și circa 55% Ni 10...12% Cr; 18...22% Co; 4,5...5,5% Mo; 1...2% Ti; 4...6% Al; 2% Fe; 0,3% C; restul Ni 49% Ni; 18% Cr; 16% Co; 4% Fe; 4% Mo; 3% Ti; 4% Al; restul B, C, Mn, Si 50% Ni; 15% Cr; 19% Co; 1% Fe; 5% Mo; 3,5% Ti; 4,2% Al	

Cobaltul, fierul, siliciul și cuprul formează cu nichelul soluții solide care, deși măresc puțin rezistența mecanică și rezistența electrică a nichelului, nu influențează negativ prelucrabilitatea prin deformare plastică.

Carbonul provine în nichel sau în aliajele de nichel din creuzetele de grafit sau când se folosește ca dezoxidant pentru nichel. La conținuturi reziduale de peste 0,1 %, înrăutățește plasticitatea nichelului datorită separării sub formă de grafit la limitele grăunților.

Plumbul și bismutul sunt practic insolubile în nichel în stare solidă și se separă sub formă de particule metalice sau compuși la limitele grăunților, de aceea se limitează conținutul maxim la 0,01 % în cazul plumbului și la 0,001 % în cazul bismutului.

Sulfur nu se dizolvă în nichel și îl face fragil la roșu, imposibil de deformat la cald. Pentru înlăturarea influenței dăunătoare a sulfurului se adaugă magneziu și mangan, care formează cu sulfurul compuși (sulfuri) greu fuzibile, care nu mai au influență prea mare asupra proprietăților și prelucrabilității prin deformare a nichelului.

Oxygenul formează cu nichelul compusul NiO, care formează cu nichelul un amestec eutectic. Cantități mici din acest eutectic nu influențează deformabilitatea și caracteristicile mecanice ale nichelului.

Fosforul formează compusul Ni₃P care alcătuiește cu nichelul un eutectic ușor fuzibil la temperatura de 880°C și insolubilitate practică în stare solidă. Conținutul maxim admisibil de fosfor trebuie să fie sub 0,001%

Arsenul, seleniul, telurul și stibiul alcătuiesc cu nichelul eutectice ușor fuzibile, de aceea conținutul în aceste elemente se limitează sub 0,001%.

13.3. PARAMETRII TEHNOLOGICI DE LAMINARE A ALIAJELOR SPECIALE CU BAZĂ DE NICHEL

Principalele grupe de aliaje deformabile cu bază de nichel sunt aliajele *nichel-cupru* (de tip Monel), aliajele *nichel-fier* (cu proprietăți speciale magnetice, termice sau elastice), aliajele *nichel-crom* și *nichel-crom-fier* (stabile la oxidare la cald) de tip Cromel, Nicrom sau Inconel și aliajele *complexe* durificabile structural (inoxidabile și refractare) de tip Inconel, Hastelloy, Nimonic și Udimet (v. tabelul 13.2).

13.3.1. Parametrii tehnologici ai aliajelor nichel-cupru

Nichelul împreună cu cuprul fiind izomorfe (rețea cubică cu fețe centrate) și având raze atomice de dimensiuni foarte apropiate se aliază în orice proporție, formând solide, după cum se observă din diagrama de echilibru termic nichel-cupru, prezentată în figura 13.3.

Rezistența mecanică și, respectiv, *rezistența la deformare* cresc la mărirea conținutului de cupru, atingând un maximum la 30...40 %Cu.

Plasticitatea aliajelor scade continuu cu creșterea concentrației de cupru, dar rămâne totuși suficient de mare, indiferent de conținutul de cupru în nichel.

Odată cu creșterea conținutului de cupru în aliajele nichel-cupru crește și rezistența la coroziune și rezistivitatea electrică a acestora.

Principalele aliaje nichel-cupru sunt așa-numitele aliaje *Monel*, care conțin 67...70 % Ni; 26...30 % Cu și max. 3 % Fe și 1,5 % Mn.

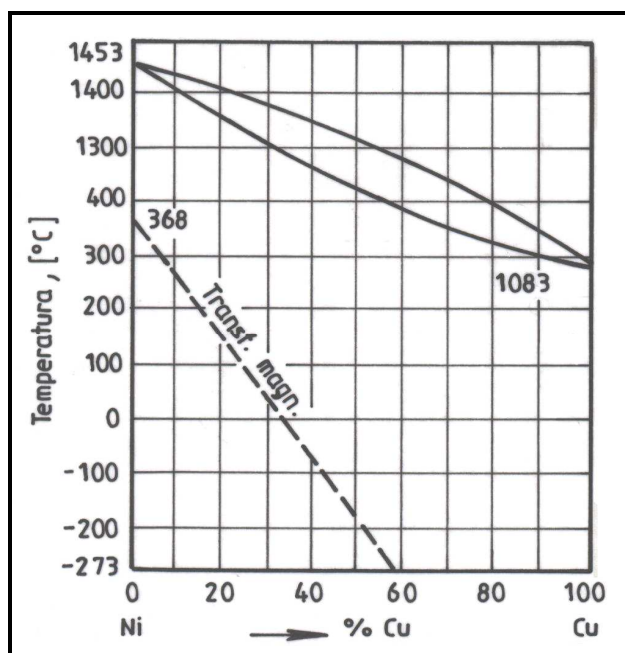


Fig.13.3. Diagrama de echilibru nichel-cupru.

Aliajele speciale cu bază de nichel și cupru sunt aliajele ternare Ni-Cu-Zn, Ni-Cu-Al și Ni-Cu-Mn.

Aliajele industriale Ni-Cu-Zn (v. tabelul 12.10) se cunosc sub denumirea de *alpaca*, *newsilber* și *argentan*. Cel mai folosit aliaj de tip alpaca are compoziția 15 % Ni și 20 % Zn, care are structură monofazică formată din soluție solidă ternară de nichel și zinc în cupru. Rezistența mecanică este mai bună decât a aliajelor binare, iar plasticitatea are valori mari.

Aliajele Ni-Cu-Al sunt cunoscute sub denumirea de aliaje *cunial* și sunt susceptibile la durificarea structurală prin tratament termic, care constă din călire de la 900...1000 °C și revenire la 500...600 °C, pentru a se realiza descompunerea soluției solide suprasaturate, însoțită de formarea unei structuri eterogene, cu dispersia foarte fină a fazelor precipitate.

Prin aceasta se produce creșterea sensibilă a rezistenței mecanice și durității aliajului.

Cel mai mare efect se obține prin *tratament termomecanic*, adică laminarea la rece după călire și apoi revenirea.

Aliajele Ni-Cu-Mn (de exemplu constantanul cu 45 % Ni, 35 % Cu și 1,5%Mn) se caracterizează prin cea mai înaltă forță termoelectromotoare dintre toate aliajele de nichel și, de aceea, se folosesc pentru termoelemente.

Aliajele speciale nichel-cupru pot fi deformate plastic cu ușurință prin *laminare la cald*, dar și prin *laminare la rece*, chiar cu grade de reducere foarte mari pe secțiune, fără recoaceri intermediare. Se obțin produse sub formă de table, benzi, țevi cu pereți subțiri precum și alte produse sau semifabricate.

Aceste aliaje, după laminare și după recoacere, au rezistența la rupere de 400...600 MPa și proprietăți de plasticitate foarte bune caracterizate, de exemplu, de alungiri cuprinse între 35...53 % și stricțiuni de 65...75 %.

Caracteristicile mecanice în stare ecruisată și *caracteristicile tehnologice* ale acestor aliaje sunt:

- rezistența la rupere prin tracțiune 650...850 MPa;
- limita de curgere 630...800 MPa;
- alungirea relativă 2...3 %;
- duritatea 210 HB
- temperatura de topire 1370°C;
- temperatura de laminare la cald 1200...800°C;
- temperatura de recoacere de recristalizare 800...850°C.

Ca structură, sunt aliaje monofazice (soluție solidă α).

Adaosurile de fier, mangan, siliciu etc. rămân în soluția solidă pe care o durifică prin aliere.

13.3.2. Parametrii tehnologici ai aliajelor nichel-fier

Aliajele nichel-fier sunt deosebit de importante atât cu bază de nichel, cât și cu bază de fier, acestea făcând trecerea gradată de la aliajele feroase (oțeluri aliate cu nichel) către aliajele neferoase (cu conținut mare de nichel și fără carbon). Aliajele nichel-fier au conținut ridicat de nichel și posedă proprietăți magnetice, termice și elastice deosebite. Ca atare, aceste aliaje se împart în trei grupe distincte prezentate în continuare.

Aliajele nichel-fier magnetice au permeabilitatea magnetică mare și conțin 70...80 % Ni și 20...30 % Fe precum și conținuturi mici de magneziu, siliciu și cupru. Un exemplu tipic pentru această grupă este aliajul *Permalloy* cu 78,5 % Ni și 21,5 % Fe care, printr-un tratament termic special (omogenizare la 1200°C în atmosferă de hidrogen, recoacere secundară la 600 °C și răcire cu viteză strict determinată), capătă valori de până la 90000 gauși/oerstezi ale permeabilității, la o forță coercitivă foarte mică, de 0,03 Oe.

Dacă concentrația nichelului scade la circa 45% și, pe lângă circa 30%Fe se introduce și 25%Co, se obține aliajul *Perminvar* care este caracterizat de stabilitatea valorii permeabilității magnetice.

Aliajele nichel-fier cu proprietăți termice speciale conțin 30...40%Ni, 4...18%Cu, max 0,3%C, restul fier. Din această grupă de aliaje cele mai utilizate sunt *Invarul*, *Elinvarul* și *Kovarul*, care prezintă coeficienți de dilatare foarte mici și constanți la creșterea temperaturii.

Aliajele nichel-fier cu proprietăți elastice speciale (de exemplu elinvarul) conțin 33 %Ni; 4...5 %Cr și mici cantități de wolfram, titan, beriliu și alte elemente. Prezintă un coeficient de temperatură al modulului de elasticitate scăzut, ceea ce face ca într-un interval de la 0 la 40°C modulul de elasticitate al aliajului să fie constant.

Aliajele nichel-fier au deformabilitate foarte bună și se pot lamina atât la cald cât și la rece obținându-se, cu ușurință, benzi cu grosimi de până la 25 μm.

13.3.3. Parametrii tehnologici ai aliajelor nichel-crom

Aliajele nichel-crom și *nichel-crom-fier* sunt aliaje refractare și se folosesc pentru confecționarea rezistențelor electrice ale cuptoarelor de încălzire. Pot fi folosite până la 1200°C ca, de exemplu, aliajul *Nicrothal* cu 80%Ni și 20%Cr. Pentru temperaturi mai scăzute se utilizează aliajul ternar de tip *Nichrom* cu 60%Ni, 16%Cr și 24%Fe.

Din sistemul ternar *nichel-crom-fier* sunt utilizate, în general, aliaje cu 50...70 % Ni, 10...30 % Cr și 10...30 % Fe denumite generic *cromonicheluri cu fier*. Aceste aliaje nu se pot utiliza decât la temperaturi sub 900°C. Un adaos de până la 8%Mo mărește rezistența la temperaturi înalte a aliajelor de tip nichrom.

Aliajele binare nichel-crom sunt monofazice până la circa 30%Cr conform diagramei de echilibru termic din figura 13.4 și, prezentând rețea C.F.C., au plasticitatea bună, dar rezistența la deformare este mare chiar și la temperaturi ridicate, ceea ce face ca laminarea acestor aliaje să devină dificilă, în special când conținutul de crom depășește 20%.

Temperatura de recristalizare a acestor aliaje este, de asemenea mare, iar

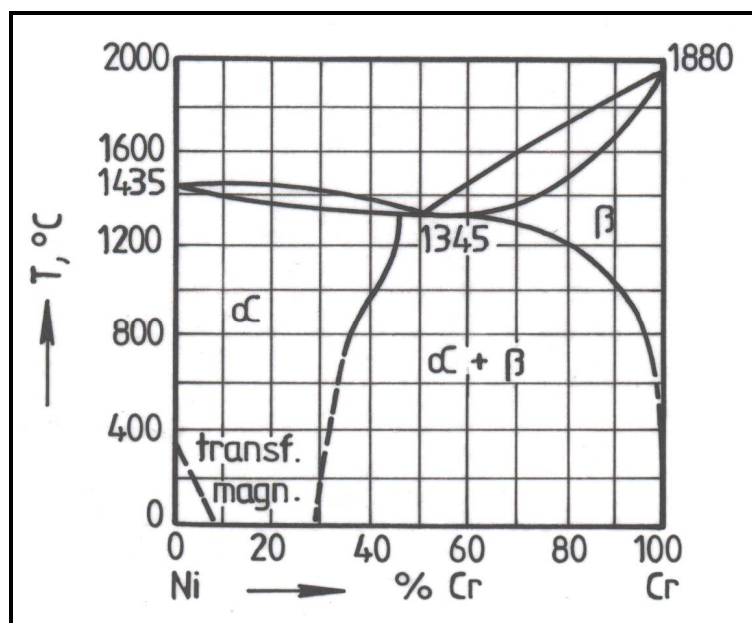


Fig. 13.4. Diagrama de echilibru a sistemului Ni-Cr

viteza procesului de recristalizare este mică, ceea ce indică prezența unei ecruisări puternice chiar la temperaturi înalte. Aceste aliaje sunt caracterizate și de coeziune intercrystalină mică (în special când în compoziția aliajului sunt și impurități de sulf, fosfor, plumb sau staniu care dau compuși ușor fuzibili) și de conductibilitate termică scăzută, ceea ce impune condiții severe pentru regimul termic de încălzire și laminare.

13.3.4. Parametrii tehnologici ai aliajelor complexe

Aliajele complexe de nichel sunt, în general, inoxidabile și refractare (tabelul 13.2) și conțin, pe lângă elementele de aliere obișnuite (Cu, Fe, Cr), adausuri de Mn, Al, Be, Si, Ti și Mo care formează combinații care precipită, producând durificarea structurală a aliajelor.

Aceste aliaje complexe sunt caracterizate de proprietăți de *rezistență*, deci și de rezistență la deformare, ridicate, dar cu valori ale indicilor de *plasticitate* ce nu coboară, în general, mult sub cele ale nichelului, dacă aliajele sunt în stare recoaptă. Deci se poate aprecia că aceste aliaje se pot lamina în condiții foarte bune atât la cald cât și la rece, dar eforturile de deformare vor fi ceva mai mari decât în cazul aliajelor convenționale pe bază de nichel. Aliajele de nichel pot fi deformate prin orice proces în piese (forjare, matrițare), profile (laminare, extrudare), sârme (laminare și tragere) sau produse plate - table și benzi (prin laminare).

Pentru principalele aliaje complexe de nichel, parametrii tehnologici recomandați pentru procesele de laminare sunt:

- intervalul de temperaturi de laminare: 1200...800°C;
- unghiul maxim de prindere la laminarea la cald: 15...25°;
- coeficientul de frecare:
 - la laminarea la cald: 0,25...0,45;
 - la laminare la rece - fără ungere: 0,20...0,25;
 - cu ungere: 0,10...0,15;
- gradul de reducere:
 - la laminarea la cald: 15...30 %;
 - la laminarea la rece - total: 50...70%;
 - pe trecere: 10...40%;

Durificarea se poate realiza prin călire în apă de la 800...1200°C urmată de revenire la 600...800°C, prin revenire după deformarea plastică prin laminare la rece sau prin laminare la cald.

Capitolul 14

LAMINAREA ZINCULUI ȘI A ALIAJELOR CU BAZĂ DE ZINC

14.1. PROPRIETĂȚI FIZICO-MECANICE ȘI TEHNOLOGICE ALE ZINCULUI

Zincul este elementul situat în subgrupa II B a sistemului periodic și face parte dintre metalele bivalente grele, împreună cu cadmiul și mercurul, care sunt omologii săi superiori.

Sistemul de cristalizare a zincului este hexagonal compact cu parametrii rețelei, la 25°C, $a = 2,664 \text{ Å}$ și $c = 4,946 \text{ Å}$.

Greutatea specifică la 25°C, pentru puritatea de 99,999% este $7,133 \text{ g/cm}^3$ și crește la $7,14 \text{ g/cm}^3$ pentru zincul de puritate tehnică.

Coeficientul de dilatare termică liniară între 20 și 100°C, pentru zincul tehnic, are valoarea de $39,5 \cdot 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$.

Căldura masică la 20°C pentru zincul tehnic este $0,0926 \text{ cal/g °C}$ (sau $387,6 \text{ J/Kg K}$).

Conductivitatea termică la 20°C este $\lambda = 0,265 \text{ cal/cm,°C,s}$ (sau $\lambda = 110,9 \text{ W/mK}$). Variația cu temperatura a conductivității termice prezintă un minim în jurul temperaturii de 110 K și un maxim la 290 K (pentru zinc cu puritate foarte ridicată, 99,999%).

Rezistivitatea electrică pentru zincul tehnic este $\rho = 5,75 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}^2/\text{m}$ (la 0°C) și variază cu temperatura corespunzător valorii coeficientului de temperatură al rezistivității $\alpha = 0,00417$.

Modulul de elasticitate longitudinal are valorile $E = 80000 \dots 130000 \text{ MPa}$, în funcție de puritate, iar modulul de elasticitate transversal $G = 38000 \text{ MPa}$.

În funcție de starea materialului, proprietățile de rezistență mecanică ale zincului sunt prezentate în tabelul 14.1.

Tabelul 14.1

Proprietăți de rezistență ale zincului

Proprietatea	Starea		
	turnat	deformat	recopt
R_m , MPa	20...70	110...150	70...100
$R_{p0,2}$, MPa	40	80...100	-
Duritatea HB	30...40	35...45	-
Alungirea A_5 , %	0,3...0,5	10...20	40...50

În tabelul 14.2 se prezintă proprietățile mecanice și fizice ale zincului.

Proprietăți mecanice și fizice ale zincului

Nr crt.	Proprietatea	Unitatea de măsură	Valoarea
1.	Rezistența la tracțiune	MPa	140
2.	Limita de elasticitate	MPa	70
3.	Alungirea la rupere	%	50
4.	Modulul de elasticitate transversală	MPa	100000
5.	Rezistivitatea (0°C)	Ohm·m	$5,75 \cdot 10^{-8}$
6.	Căldura specifică (20°C)	J/kg·K	387,6
7.	Conductibilitatea termică (20°C)	(cal/g·grd)	(0,0926)
		W/kg·K	110,9
		(cal/g·grd)	(0,265)
8.	Temperatura de fierbere	°C	906
9.	Temperatura de topire	°C	419,5
10.	Densitatea (20°C) stare turnată	g·cm ⁻³	7,133
			7,142
11.	Parametrul rețelei (20°C)	Å	a=2,664
			c=4,946
12.	Structura cristalină	-	h.c.
13.	Configurația electronică	-	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ²
14.	Stări de oxidare	-	+2
15.	Volumul atomic(20°C)	cm ³ /atom·g	9,17
16.	Masa atomică	-	65,38
17.	Numărul atomic	-	30

Proprietăți tehnologice. Deformarea plastică a zincului are loc prin alunecare și maclare. Sistemele de alunecare sunt:

- sistemul principal este cel bazal (0000) < 1120>
- sisteme secundare: - alunecare secundară de ordinul II - (1122)<1123>
- alunecare piramidală de ordinul I -(1101)<1120>
- alunecare prismatică (1100)<1100>

Deformarea prin maclare are loc după sistemul (1012)<1011>

Deformabilitatea zincului crește simțitor odată cu trecerea de la starea de turnare la starea de deformare, plasticitatea de exemplu, exprimată prin alungirea la rupere, crește de peste 40 de ori. Zincul pur se deformează ușor mai ales când este încălzit până la 150°C.

14.2. ELEMENTE DE ALIERE ȘI IMPURITĂȚI ÎN ALIAJELE CU BAZĂ DE ZINC

Cuprul în concentrație de până la 2% formează soluții solide cu zincul și nu influențează practic deformabilitatea zincului. La concentrații de peste 2%, cuprul înrăutățește plasticitatea zincului, în special când temperatura de deformare coboară sub 100°C.

Magneziul formează cu zincul compuși intermetalici, care măresc rezistența la deformarea la rece a acestuia. Față de zincul electrolitic (fără

magneziu) de exemplu, care are o rezistență la rupere după laminare de 170MPa, deformat în aceleași condiții, zincul cu 0,01%Mg va avea o rezistență la rupere de 250...260 MPa.

Impuritățile existente în zinc ca *staniul* și *plumbul* formează un eutectic ternar ușor fuzibil (temperaturi de topire circa 150°C) care face imposibilă deformarea zincului la temperaturi de peste 150°C. Pe acest considerent zincul destinat laminării la cald nu trebuie să conțină peste 0,002 %Sn.

Plumbul, *fierul* și *cadmiul*, impurități obișnuite în zinc, până la o concentrație de 0,05% nu împiedică deformarea plastică a zincului.

Fierul, insolubil în zinc și *cadmiul*, parțial solubil în zinc, măresc duritatea zincului, iar fierul în concentrație de 0,2...0,3% crește temperatura de recristalizare, respectiv întârzie procesul de recristalizare a zincului, contribuind la obținerea unor table ecruisate chiar după laminarea la cald.

Fierul în cantitate de până la 0,01% formează cu zincul un compus intermetalic care pe lângă mărirea durității zincului produce și o oarecare fragilitate.

Cadmiul la solidificare se separă adesea la limitele de grăunte influențând negativ plasticitatea zincului în stare caldă.

În cantități de până la 0,2...0,25% cadmiul nu împiedică recristalizarea zincului după laminarea la rece. La concentrații mai mari, de până la 3% duritatea zincului crește continuu, iar peste 3% cadmiu, acesta practic nu mai influențează duritatea.

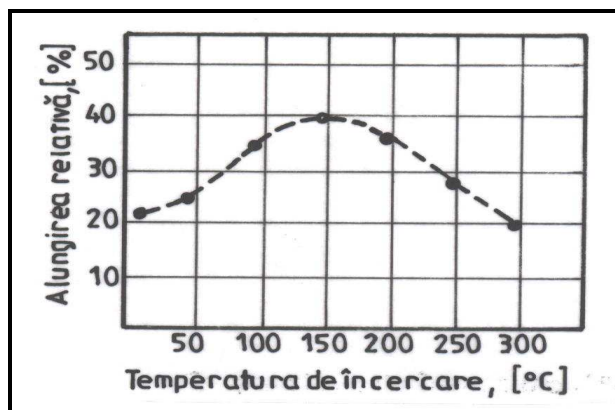
Plumbul este parțial solubil în zinc în stare solidă și se separă la limita grăunților sub forma unui eutectic Pb-Zn sau chiar sub formă de plumb metalic.

Până la concentrația de 1,2% plumbul nu influențează deformabilitatea zincului la cald sau la rece și nici valorile proprietăților sale mecanice.

14.3. PARAMETRII TEHNOLOGICI DE LAMINARE A ZINCULUI ȘI ALIAJELOR CU BAZĂ DE ZINC

Zincul de puritate ridicată recristalizează chiar și la temperatura ambiantă. Totuși, *temperaturile optime* pentru laminarea la cald a zincului (acest proces fiind cel cu cea mai mare pondere în prelucrarea plastică a zincului) sunt plasate între 150...180°C pentru care indicele de plasticitate a zincului prezintă un maxim (fig.14.1) corespunzător unei alungiri la rupere de circa 40%.

Fig. 14.1. Influența temperaturii asupra alungirii relative a zincului 99,99% laminat la cald.



Laminarea la cald a zincului în stare de turnare se execută cu grade de reducere mici, 6...10%, în primele treceri până se distruge structura de turnare a semifabricatului. După aceasta gradele de reducere pot să crească până la valoarea maximă admisă de condițiile de prindere a laminatului între cilindri (unghiul maxim de prindere α variază între 20 și 25°).

În timpul laminării la cald a zincului apare un efect termic puternic, care produce creșterea temperaturii laminatului cu atât mai mult cu cât gradul de reducere aplicat a fost mai mare și temperatura de laminare mai joasă (fig.14.2).

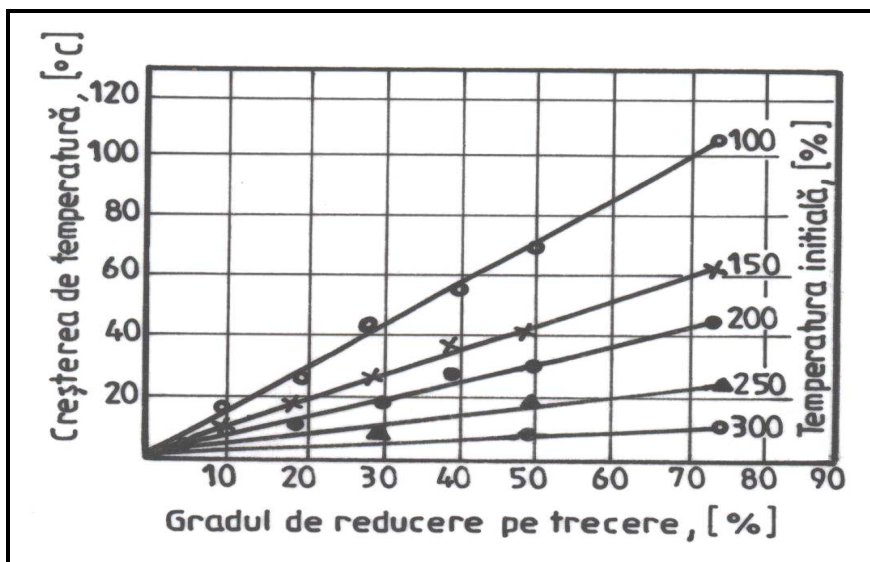


Fig. 14.2. Creșterea de temperatură a zincului laminat la cald în funcție de temperatura de începere a laminării și de reducerile pe trecere.

De exemplu, la laminarea unei benzi cu temperatura inițială de 100°C, prin aplicarea unui grad de reducere de 50% se obține o creștere a temperaturii de circa 70°C.

Laminarea la rece a zincului se poate efectua în condiții bune numai după o laminare prealabilă la cald, cu aplicarea de grade de reducere ϵ cu valori de 20...25%.

În ceea ce privește variația proprietăților de rezistență ale zincului deformat la rece se constată că valorile maxime se obțin pentru un grad de deformare de circa 40% (unde curba de ecrusare prezintă un maxim). De asemenea, s-a constatat că aceste proprietăți de rezistență scad în timp. De exemplu, dacă în urma laminării la rece cu $\epsilon = 40\%$ a unui semifabricat din zinc electrolitic, rezistența la rupere a fost de 259 MPa, același laminat, după o depozitare de 30 zile, a avut rezistența la rupere de 220 MPa, respectiv a avut loc o micșorare a rezistenței de 15%.

Zincul având o tendință pronunțată de orientare preferențiată a cristalelor în timpul deformării la rece prezintă și o *anizotropie a proprietăților*, respectiv rezistența la rupere este superioară pe direcția perpendiculară pe sensul de laminare în timp ce indicii de plasticitate sunt mai mari pe direcția de laminare (fig.14.3).

Indicele de anizotropie, ca diferență relativă între valorile proprietăților pe două direcții perpendiculare, se determină cu relația:

$$A_{Rm} = \frac{(R_m)_t - (R_m)_l}{0,5 [(R_m)_t + (R_m)_l]} \cdot 100, \quad \% \quad (14.1)$$

în care: R_{mt} este rezistența la rupere pe direcție transversală;

R_{ml} - rezistența la rupere pe direcție longitudinală;

A_{Rm} - indicele de anizotropie.

Indicele de anizotropie scade pe măsură ce gradul total de reducere se realizează printr-un număr mai mic de treceri.

De exemplu laminându-se o bandă din zinc cu un grad total de reducere de 75% anizotropia maximă pentru rezistența la rupere a fost de 31% pentru cazul laminării în 13 treceri și a scăzut la 15,5% pentru cazul laminării într-o singură trecere. Pentru aceleași condiții de laminare anizotropia alungirii la rupere a scăzut corespunzător de la 55% la 34%.

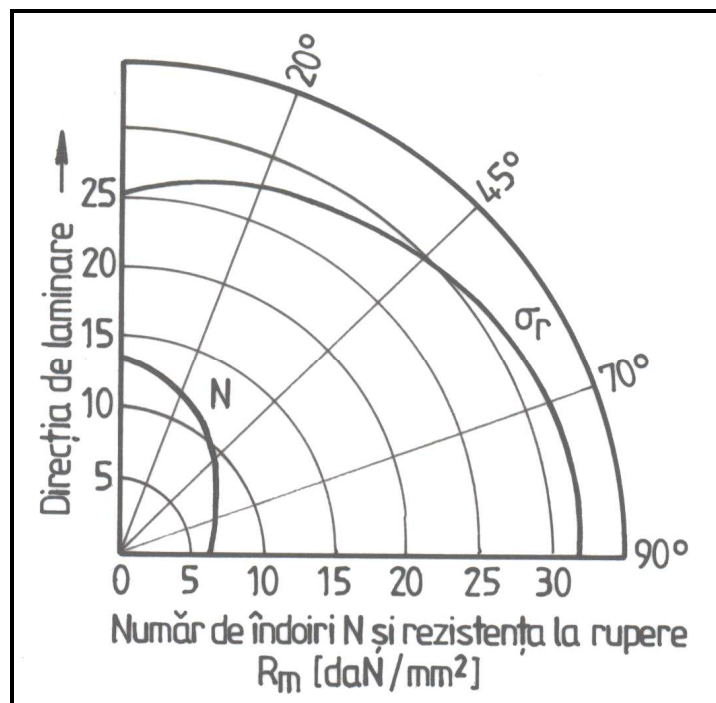


Fig. 14.3. Anizotropia rezistenței la rupere și a numărului de îndoiri a zincului laminat la rece.

Reducerea anizotropiei se poate realiza prin schimbarea sensului de laminare pentru ultima trecere.

Alierea zincului ce urmează a se procesa prin deformare plastică urmărește în principal îmbunătățirea proprietăților sale mecanice.

Astfel, de exemplu, dacă o bandă laminată la cald din zinc cu maxim 0,1%Pb are $R_m=137$ MPa și $A_5 = 65$ % rezistența la rupere va crește la 148 MPa dacă se mai adaugă 0,05...0,08 %Cd sau va crește la 169 MPa dacă în zinc se introduce un procent de 0,85...1,25 %Cu. La acest ultim aliaj, dacă se mai introduce și până la 0,016 % Mg rezistența la rupere crește la 206 MPa. În mod corespunzător alungirea va scădea la 52 %, 50 % și, respectiv, 20 %.

Dintre aliajele cele mai reprezentative ale zincului sunt aliajele care conțin 4...15 % Al, ca aliaje binare, iar ca aliaje ternare deformabile sunt cele din sistemul Zn-Al-Cu, care conțin 0,2...10 % Al și 2...5 % Cu.

Plasticitatea maximă a acestor aliaje se obține la temperaturi de 270...300°C, iar structura de deformare apare doar după aplicarea unor grade de reducere totală de 40...50%.

Laminarea la cald a zincului și aliajelor sale se efectuează prin două procedee și anume prin laminarea în pachete și prin laminarea în rulouri.

Laminarea în pachete cu toate că este o tehnologie învechită, se practică încă în multe uzine. Pentru aceasta se toarnă semifabricatele (platine) în cochilii orizontale deschise cu o grosime de 18...20 mm. Lățimea și lungimea semifabricatelor se stabilește în funcție de dimensiunile finale cerute foilor de tablă care vor avea grosimi de 0,5...2,5 mm.

După solidificare și răcirea până la circa 150...180°C (în cazul zincului) se începe laminarea pe direcție transversală a semifabricatului și se continuă în 3...6 treceri până la grosimea de 2...4 mm. În continuare se șutează tablele laminate și se formează pachetul cu până la 40 de foi în funcție de grosimea finală dorită. Laminarea finisoare a pachetului de table se execută pe direcție perpendiculară semnului laminării degrosisoare. La laminarea în pachete cilindrii cajei de laminare (cajă duo cu diametrul cilindrilor de 500...600 mm) trebuie să aibă temperatura de 160...180°C. Ca urmare a creșterii temperaturii în timpul laminării și ca urmare a efectului termic al deformației cu circa 50...70°C la sfârșitul laminării produsului finit este practic complet recristalizat. În timpul laminării tablele sunt lubrificate cu o unsoare naturală (seu topit).

Laminarea în rulouri se practică la zincul electrolitic de înaltă puritate (99,99%) cât și la aliajele laminabile ale zincului. Trecerile degrosisoare se efectuează la cald pe o cajă reversibilă aplicându-se reduceri de circa 10...12% la primele treceri și până la 40...45% la ultimele treceri (aproximativ 9...11 treceri pentru o bramă de 600...1000 kg).

După laminarea degrosisoare, tabla semifabricat se șutează pe margini la un foarfece cu discuri, după care laminarea continuă la caja finisoare (duo reversibilă sau ireversibilă).

Laminarea se efectuează la rece (40...50°C) și, pentru a prelua degajarea de căldură rezultată prin efectul termic al deformației, cilindrii laminorului sunt răciți cu apă la interior. Reducerile aplicate vor putea fi cât mai apropiate de valorile maxim admisibile.

Zincul și aliajele sale se prelucerează și prin extrudare însă presiunile de deformare necesare sunt mari (700...1000 MPa față de 400 MPa la aluminiu și 300 MPa la alame) ca urmare a posibilității limitate a zincului de a se deforma cu alungire. Temperatura recomandată pentru extrudare variază între 200 și 320°C, iar viteza de extrudare, în funcție de raportul de presare, variază între 4...8 m/min. Zincul și aliajele sale poate fi prelucrate și prin trefilare, în cazul acestui procedeu coeficienții de alungire λ vor avea valori de 1,13...1,20, iar filierele utilizate vor avea unghiul conului de lucru α de 10...12° și raportul $\sigma_r/\sigma_{\text{tref}}$ de 1,3...2,1.