

LAMINAREA MATERIALELOR METALICE SPECIALE

Partea a III-a:

CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND PROCESUL TEHNOLOGIC DE LAMINARE A ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE

| | | |
|--------------|--|-----|
| Capitolul 9 | Noțiuni de bază referitoare la constituția și structura aliajelor neferoase speciale..... | 117 |
| 9.1 | Criterii de clasificare a aliajelor neferoase..... | 118 |
| 9.2 | Constituția fizico-chimică a aliajelor neferoase..... | 121 |
| 9.3 | Particularități ale structurii aliajelor neferoase speciale..... | 123 |
| Capitolul 10 | Semifabricate și produse laminate finite din aliaje neferoase speciale..... | 129 |
| 10.1 | Semifabricate destinate laminării..... | 129 |
| 10.2 | Produse laminate finite..... | 131 |
| 10.3 | Mărci de aliaje neferoase speciale folosite pentru laminare... | 132 |
| Capitolul 11 | Particularitățile procesului tehnologic de laminare a aliajelor neferoase speciale..... | 134 |
| 11.1 | Considerații privind deformabilitatea aliajelor neferoase speciale..... | 134 |
| 11.2 | Caracteristici ale laminoarelor pentru laminarea aliajelor neferoase speciale..... | 140 |
| 11.3 | Recoacerea de omogenizare și încălzirea pentru laminare.... | 142 |
| 11.4 | Parametrii tehnologici ai procesului de laminare a aliajelor neferoase speciale..... | 146 |

Partea a III-a: **CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND PROCESUL TEHNOLOGIC DE LAMINARE A ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE**

Capitolul 9

NOȚIUNI DE BAZĂ REFERITOARE LA CONSTITUȚIA ȘI STRUCTURA ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE

Aliajele neferoase sunt alcătuite din două sau din mai multe metale, semimetale și metaloide în care predomină însușirile metalice. Pentru caracterizarea aliajelor neferoase în vederea utilizării în industrie, trebuie să li se cunoască compoziția, structura și proprietățile.

Domeniile de aplicare practică ale metalelor și aliajelor neferoase sunt determinate, în primul rând, de proprietățile lor. În general, tehnica modernă se caracterizează prin faptul că solicită de la aceste materiale metalice un complex de proprietăți, cu valori superioare. De exemplu, pentru construcția motoarelor cu reacție sunt necesare materiale metalice refractare, rezistente la fluaj și la oxidare la temperaturi înalte având, în același timp, valori mici ale greutateii specifice, condiții la care nu mai corespund aliajele neferoase clasice, în acest scop utilizându-se aliajele neferoase speciale de titan, zirconiu, niobiu și altele.

În domeniul construcțiilor de mașini, în special pentru aviație și pentru rachete cosmice, se impune utilizarea unor aliaje cu greutate specifică cât mai reduse și în același timp cu rezistențe mecanice foarte mari. De aceea, a apărut orientarea spre metale și aliaje ușoare și ultraușoare (de aluminiu, magneziu, beriliu) sau semiușoare (de titan).

Se mai întâlnesc și alte cazuri în domeniul tehnic, în care este nevoie de concentrarea unor cantități mari de material într-un volum cât mai mic și deci, este necesară folosirea metalelor și aliajelor cu greutate specifică mari. De exemplu, la confecționarea containerelor pentru transportul substanțelor radioactive, pentru a mări momentul de inerție a ansamblurilor rotative sau pentru a echilibra anumite piese în mișcare rapidă se folosesc materiale metalice cu mase concentrate. În mod obișnuit, în astfel de cazuri, se utilizează plumbul, dar pentru cazuri speciale se folosesc aliaje extrem de grele și cu caracteristici mecanice ridicate ca, de exemplu, aliaje pe bază de wolfram, tantal sau reniu.

Din punct de vedere tehnic, până de curând, multe metale neferoase nu își găsiseră aplicații, fiind considerate elemente rare, datorită insuficienței rezervelor de minereuri sau imperfecțiunii proceselor metalurgice de extragere. Tehnicile și tehnologiile moderne au trecut, însă, la valorificarea intensivă a metalelor rare și disperse, ca de exemplu, în industria semiconductoarelor sau în

metalurgie ca modificatori sau ca adaosuri de aliere pentru aliajele speciale, ca aliaje puternic refractare etc. Astfel, se poate considera noțiunea de metal rar ca învechită și nu mai trebuie inclusă în clasificarea tehnologică a metalelor.

9.1. CRITERII DE CLASIFICARE A ALIAJELOR NEFEROASE

Se cunoaște că majoritatea elementelor chimice posedă, în condiții obișnuite, caracterul *metalic*, dintre celelalte elemente chimice, în număr mult mai mic, o parte (C, Si, Ge, B, As, Se, Te) se numesc *semimetale* și sunt elemente semiconductoare, iar cealaltă parte o constituie elementele nemetalice sau *metaloidele* (F, Cl, Br, I, O, S, N, P, H).

Asupra clasificării tehnologice a metalelor și aliajelor neferoase există încă mai multe puncte de vedere. Se obișnuiește să se clasifice metalele de utilitate tehnică în două mari clase și anume, în metale *feroase* (grupa fierului) și în metale *neferoase*, care cuprind restul metalelor.

Metalele neferoase folosite în tehnică nu sunt elemente pure deoarece, oricât de perfecționate ar fi procesele de rafinare, nu se pot îndepărta complet elementele străine. Puritatea absolută constituie încă o noțiune abstractă și un deziderat științific. În metalurgia semiconductoarelor și a materialelor pentru tehnica nucleară s-a ajuns la reducerea conținutului de elemente străine la valori sub 10^{-13} % procente atomice, realizându-se așa-numita puritate fizică. De obicei, în tehnică se utilizează exprimarea în procente de greutate. În funcție de compoziția chimică metalele neferoase pot fi de *puritate tehnică* scăzută (95...99%), de puritate tehnică medie (99,0...99,9 %), de *puritate chimică* ridicată (99,90...99,99 %), de *puritate spectrală* (99,999%) și de *puritate fizică* (cu mai puțin de 10^{-6} % impurități).

Metalele propriu-zise nu pot să acopere nici pe departe necesitățile tehnicii unde, în cele mai multe cazuri, se cer asociații de proprietăți cu valori optime, în funcție de scopul urmărit. De aceea metalele se folosesc mult mai frecvent sub formă de *aliaje metalice*, care sunt alcătuite din două sau mai multe metale, sau din metale, semimetale și metaloide, în care predomină însușirile metalice. Aliajele a căror bază o constituie fierul se numesc aliaje feroase (oțeluri, fonte, feroaliaje), iar aliajele a căror bază o constituie un metal neferos se numesc aliaje neferoase.

Compoziții acestor aliaje sunt elementele chimice care intră în compoziția lor, iar metalul care predomină în compoziția aliajului este componentul de bază sau principal, aliajul devenind astfel un derivat al metalului de bază. În consecință, aliajele neferoase se pot clasifica, după metalul de bază, în aliaje *cu baza de cupru*, aliaje *cu baza de nichel*, aliaje *cu baza de aluminiu*, aliaje *cu baza de titan* etc. Componentul de aliere reprezintă elementul sau elementele (metale, semimetale sau metaloide) care sunt introduse în mod intenționat în metalul de bază pentru a forma aliaje cu proprietăți specifice. După numărul elementelor de aliere se disting aliaje *binare*, *ternare*, *cuaternare* și *complexe*. După conținutul în elemente de aliere, se consideră, în mod

convențional, *aliaje slab aliate* cele care conțin sub 2,5 % în greutate elemente de aliere, *aliaje mediu aliate*, cele cu 2,5...10 % în greutate elemente de aliere și *aliaje înalt aliate*, cele cu peste 10 % în greutate elemente de aliere.

Aliajele neferoase speciale sunt acele aliaje neferoase la care predomină numai unul dintre elementele de aliere care, în cooperare cu metalul de bază, determină în ansamblu însușirile aliajului respectiv, iar celelalte elemente sunt adăugate numai în cantități mai mici pentru a accentua anumite calități noi. De exemplu, alamele speciale sau bronzurile speciale sunt aliaje Cu-Zn, respectiv, Cu-Sn care conțin elemente ca aluminiu, mangan, fier, nichel, siliciu, plumb, în proporții mici, dar cu influență considerabilă asupra proprietăților. Aceste elemente se denumesc convențional *adaosuri speciale de aliere*.

În afară de metalul de bază și de elementele de aliere, aliajele industriale conțin *impurități*, adică elemente străine care nu au putut fi îndepărtate complet în procesele de rafinare sau au fost introduse accidental în procesele de elaborare și prelucrare a acestor aliaje. Se pot distinge *impurități neutre*, care nu dăunează asupra structurii și proprietăților aliajelor și *impurități nocive*, care înrăutățesc proprietățile și, deci, trebuie evitate sau reduse sub limita maximă admisibilă.

Acele elemente adăugate în mod intenționat și în cantități infime în aliajele neferoase pentru a le modifica structura și a le îmbunătăți proprietățile se numesc *modificatori*. În consecință, ele nu pot fi considerate impurități, ci mai degrabă adaosuri de aliere cum sunt, de exemplu, sodiul pentru modificarea siluminurilor, beriliul pentru modificarea aliajelor de cupru, titanul în unele aliaje de aluminiu, thoriul și ceriul în unele aliaje de magneziu etc.

În practica utilizării metalelor și aliajelor neferoase un interes deosebit în prezintă *greutatea specifică γ* care reprezintă masa unității de volum a unui semifabricat sau produs finit din aceste materiale metalice. Metalele neferoase și, corespunzător acestora ca metale de bază și aliajele lor, au greutatea specifică care cuprind o gamă foarte largă de valori și se clasifică, în mod convențional, în următoarele *grupe* (valorile greutății specifice γ sunt indicate în kg/dm³):

- metale extrem de ușoare, mai ușoare decât apa având $\gamma < 1$ și cuprinde Li (0,53), K (0,86) și Na (0,97);

- metale ultraușoare, având $\gamma = 1...2$ și cuprinde Rb (1,53), Ca (1,55), Cs(1,90), Mg (1,74) și Be (1,85);

- metale ușoare, având $\gamma = 2...4$ și cuprinde Sr (2,63), Ba (3,73) și Al (2,7) precum și două semimetale ca elemente de aliere, B (2,34) și Si (2,37);

- metale semiușoare având $\gamma = 4...6$ și cuprinde Ti (4,5), Ge (5,36), Ga(5,93), Ra (6,0) și V (6,0);

- metale grele, având $\gamma = 6...10$ și cuprinde Zr (6,52), Sb (6,69), Zn (7,13), Sn (7,29), Cr (7,2), In (7,3), Mn (7,46), Nb (8,5), Cd (8,65), Co (8,9), Ni (8,9), Cu (8,95) și Bi (9,84);

- metale supergrole, având $\gamma = 10...15$ și cuprinde Mo (10,2), Ag (10,5), Pb (11,34), Th (11,7), Tl (11,85), Ru(12,41), Pd (12,16), Hf (13,3) și Hg(13,55);

- metale extrem de grele, cu $\gamma = 15...22,5$ și cuprinde Ta (16,8), Au(19,28), U (19,3), W (19,35), Re (21,0), Pt (21,4), Ir (22,4) și Os (22,5).

Cele mai multe metale neferoase uzuale (Cu, Ni, Co, Cr, Mn, Zn și Sn) se încadrează, ca și fierul, în clasa metalelor grele. Greutatea specifică variază în funcție de temperatură, datorită dilatării volumice.

Temperatura de topire (T_t) este o altă caracteristică fizică deosebit de importantă pentru practică. După mărimea temperaturii de topire, metalele și aliajele neferoase se pot grupa, convențional, în următoarele *categorii*:

- metale foarte ușor fuzibile cu $T_t < 100$ °C, care cuprinde Hg, Cs, Na, K;
- metale ușor fuzibile, cu $T_t = 100...500$ °C: In, Li, Sn, Tl, Cd, Pb și Zn;
- metale fuzibile cu $T_t = 500...1000$ °C: Sb, Mg, Al, Ba, Sr, Ca, Ge și Ag;
- metale greu fuzibile, cu $T_t = 1000...1800$ °C: Au, Cu, U, Mn, Be, Ni, Co, Pd, V, Ti, Pt și Cr;
- metale refractare, cu $T_t = 1800...2500$ °C: Th, Zr, Rh, Hf, Ru și Ir;
- metale puternic refractare, cu $T_t > 2500$ °C: Nb, Mo, Os, Ta, Re și W.

Aliajele neferoase au temperaturi de topire foarte diferite, în funcție de acțiunea elementelor de aliere asupra componentului de bază. În unele cazuri pot rezulta aliaje cu temperaturi de topire mult mai înalte decât ale elementelor componente, în special când se formează compuși intermetalici congruenți și greu fuzibili. În general, însă, prin adaosuri de aliere se coboară temperatura de topire a metalului de bază.

În funcție de *dilatarea termică*, în mod convențional, pe baza valorilor coeficientului mediu α de dilatare liniară la temperaturi cuprinse între zero și 100°C, metalele neferoase se pot împărți în următoarele *grupe*:

- metale cu coeficient de dilatare liniară foarte mare, $\alpha > 50 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, care cuprinde Cs, Rb, Na, K și Li;
- metale cu coeficient de dilatare liniară mare, $\alpha > 20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, care cuprinde U, Zn, Tl, In, Cd, Pb, Mg, Al, Sn, Ca și Mn;
- metale cu coeficient de dilatare liniară mediu, $\alpha < 20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, care cuprinde Ba, Ag, Ga, Cu, Au, Zr, Ni, Co, Be, Bi, Fe, Pd, Th și Sb;
- metale cu coeficient de dilatare liniară mic, $\alpha < 10 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, care cuprinde Pt, Rh, Cr, Nb, Ti, Ru, Ir, Os, Ta, Mo, W și Re.

Aliajele neferoase au, în general, coeficienți de dilatare cu valori apropiate de cele ale metalelor componente. Sunt însă și cazuri, în special atunci când se formează soluții solide, în care coeficientul de dilatare este mult mai mic.

Multe aplicații tehnologice sunt bazate pe fenomenele de dilatare a metalelor și aliajelor, dintre care se specifică piesele bimetalice. Aceste piese sunt obținute prin laminarea alăturată a două metale sau aliaje cu coeficienți de dilatare foarte diferiți, realizându-se o aderență perfectă pe suprafața de contact. Prin ridicarea temperaturii, lamela bimetalică se deformează în funcție de dilatarea diferită a celor două metale sau aliaje din care este alcătuită. Îndoirea depinde de temperatură, de aceea piesele bimetalice se utilizează în dispozitivele de termostatare.

Conductibilitatea termică λ este o caracteristică de bază, fiind capacitatea metalului de a conduce fluxul caloric. Pe baza mărimii conductibilității termice λ , metalele neferoase se pot clasifica în următoarele grupe:

- metale cu conductibilitatea termică foarte bună, $\lambda > 0,5$ cal/cm·s°C, care cuprinde Ag, Cu, Au și Al;
- metale cu conductibilitatea termică bună, $\lambda = 0,1...0,5$ cal/cm·s°C, care cuprinde W, Be, Mg, Mo, Na, Zn, Cd, K, Rh, Ni, Co, Pt, Pd, Li, Sn, Ir, Ta și Ti;
- metale cu conductibilitatea termică slabă, $\lambda < 0,1$ cal/cm·s°C, care cuprinde Pb, Cr, Sb, Hg, Bi și Mn.

Aliajele au conductibilitatea termică mai mică decât metalele componente deoarece conductibilitatea este cu atât mai bună cu cât metalul este mai pur. Aliajele neferoase cu conductibilitate termică bună sunt necesare pentru termotehnică, schimbătoare de căldură, radiatoare, refrigerente. Organele de mașini supuse la fluxuri termice intense, trebuie confecționate din aliaje cu conductibilitate termică bună, pentru a nu fi supuse la acumulări locale de căldură, care dezvoltă gradientele termice mari. Datorită acestor proprietăți, pentru construcția pistoanelor de la motoarele cu ardere internă se folosesc, de preferință, aliaje ușoare pe bază de aluminiu, care asociază greutatea specifică mică cu conductibilitatea termică apreciabilă.

După mărimea *rezistivității electrice* ρ metalele neferoase se pot împărți în următoarele categorii:

- metale foarte bune conducătoare, $\rho < 3\mu\Omega\text{cm}$: Ag, Cu, Au și Al;
- metale bune conducătoare, $\rho < 10\mu\Omega\text{cm}$: Na, Mg, W, Co, Mo, Zn, Ni;
- metale slab conducătoare, $\rho = 10...20\mu\Omega\text{cm}$: Cd, Pt, Sn, Cr, Be, Pb, Ti;
- metale rezistive, $\rho = 20...50\mu\Omega\text{cm}$: V, Sr, Hf, U, Zr;
- metale foarte rezistive, $\rho > 50\mu\Omega\text{cm}$: Ga, Hg, Bi și Mn.

9.2. CONSTITUȚIA FIZICO-CHIMICĂ A ALIAJELOR NEFEROASE

În prezent peste cincizeci de metale neferoase au devenit necesare pentru industria modernă. Din totdeauna metalele au fost folosite mult mai frecvent sub formă de aliaje metalice. Prin introducerea unuia sau mai multor elemente de aliere într-un metal se pot obține aliaje cu diferite compoziții, structuri și proprietăți, care își găsesc multiple utilizări în tehnică.

Structura aliajelor în stare solidă este cu mult mai complexă decât structura metalelor pure și depinde, mai ales, de relația reciprocă dintre componenții aliajului. În cazuri extreme, când între componenții aliajului nu există acțiune reciprocă, structura aliajului va consta dintr-un amestec mecanic al cristalelor din componenții respectivi.

Cel mai frecvent, însă, elementele care alcătuiesc un aliaj pot reacționa între ele, formând compuși intermetalici sau se pot dizolva reciproc, formând soluții solide.

Fazele din aliaje sunt acele părți omogene ale unui sistem, mărginite de celelalte părți ale sistemului prin suprafețe de separare și care prezintă rețele proprii. Trecerea de la o fază la alta este însoțită de modificarea în trepte a compoziției chimice și a structurii cristaline. Deoarece proprietățile aliajelor sunt determinate, în primul rând, de fazele existente și de structura lor cristalină,

studiul aliajelor se va începe cu determinarea fazelor care pot exista în aliajele neferoase în anumite condiții de temperatură, concentrație și presiune, având structura pe care ele o posedă în condiții date.

Constituenții structurali ai aliajelor neferoase sunt acele părți constitutive, faze sau amestecuri de faze, din care este alcătuită structura aliajelor și care prezintă, la analiza metalografică, un aspect caracteristic. Acești constituenți structurali ai aliajelor sunt grupați în patru tipuri principale și anume în metale pure, compuși definiți, soluții solide și amestecuri mecanice.

Metalele pure sunt constituenți care se caracterizează prin temperaturi constante de solidificare, respectiv de topire. Metalele pure au sisteme de cristalizare proprii, iar la analiza metalografică apar sub formă de grăunți poliedrici, perfect omogeni dacă nu există impurități. La un atac de scurtă durată cu reactivi metalografici, apar în evidență la microscop numai limitele dintre cristale, iar dacă atacul este mai prelungit, cristalele apar nuanțate și corodate diferit, din cauza anizotropiei și orientării lor metalografice.

Compușii definiți ai aliajelor neferoase reprezintă combinații în anumite proporții între atomii (ionii sau moleculele) elementelor componente. Proporția dintre componenți nu respectă întotdeauna legea valențelor deoarece, în aliajele metalice, legăturile dintre atomi se pot realiza și prin electronii comuni. În general, compușii definiți cei mai stabili sunt aceia formați dintr-un metal și un metaloid (C, P, S, O, N, B); mai puțin stabile sunt combinațiile realizate între metale, așa-numiții compuși intermetalici.

Compușii definiți posedă rețele cristaline specifice și diferite de cele ale elementelor componente, prezentând o aranjare ordonată a atomilor. În aliajele neferoase se întâlnesc următoarele două tipuri de compuși definiți:

- *compuși definiți cu valență normală*, ca de exemplu, Mg_2Si , Mg_2Sn , Mg_2Pb , Bi_2Mg_3 etc;

- *compuși electronici*, la care rețeaua cristalină este determinată de concentrația electronică, adică de raportul dintre numărul electronilor de valență și numărul atomilor care intră în compoziția compusului respectiv.

Astfel de combinații se formează în special între metalele Cu, Ag, Au, Fe, Co, Ni, Pt, Pd pe de o parte, cu metalele Be, Mg, Zn, Cd, Al, Ga, Si, Ge pe de altă parte. În rețeaua cristalină, atomii nu au întotdeauna o așezare ordonată, mai ales la temperaturi înalte, existând o repartizare statistică. La temperaturi mai joase se produce ordonarea, adică repartizarea ordonată a atomilor în nodurile rețelei cristaline.

Soluția solidă este formată din mai multe specii de atomi amestecate intim la scară atomică. Structura cristalină a soluțiilor solide este identică cu structura componentului de bază. Astfel, o soluție solidă se obține prin pătrunderea în rețeaua unui metal pur a unor atomi de altă natură, numiți atomi străini sau de aliere. Pătrunderea atomilor străini în rețeaua componentului de bază se realizează fie prin substituție, fie prin pătrunderea în interstiții. În primul caz, atomii străini înlocuiesc în rețeaua cristalului atomii ai componentului de bază. De exemplu, în rețeaua cuprului (*c.f.c.*) se pot înlocui atomi de cupru cu atomi de nichel, obținându-se o soluție solidă de substituție. În cel de-al doilea caz,

atomii pătrund în rețeaua cristalină în interstițiile dintre atomii componentului de bază, obținându-se soluții solide interstițiale.

O caracteristică importantă a soluțiilor solide, fie că sunt de substituție, fie că sunt interstițiale, o constituie faptul că în mod curent, atomii elementului de aliere ocupă la întâmplare locuri în celula elementară, distribuția lor în rețeaua componentului de bază făcându-se fără nici o ordine, motiv pentru care aceste soluții solide se numesc neordonate sau dezordonate. Spre deosebire de acestea, sunt și soluții solide de substituție în care atomii elementului de aliere ocupă în rețeaua componentului de bază poziții bine definite. Soluțiile solide astfel obținute sunt soluții solide ordonate, fiind cunoscute și sub denumirea de suprastructuri, faze Kurnakov sau suprarețele. Formarea soluțiilor solide ordonate produce importante modificări ale proprietăților aliajelor neferoase.

După aspectul diagramei de echilibru se pot determina fazele din aliajele respective, la diferite temperaturi. Pe baza acestor diagrame se pot urmări transformările în aliaje, la variații ale temperaturii sau ale concentrației.

Configurația diagramei de echilibru depinde de fazele formate de componenții aliajului. Proprietățile aliajului depind, de asemenea, de fazele care au fost formate de către componenții aliajului.

Domeniile de aplicare practică a metalelor și aliajelor neferoase sunt determinate, în primul rând, de proprietățile lor. *Proprietățile intrinseci* sunt acele caracteristici fizice, mecanice și chimice proprii metalului sau aliajului respectiv, iar *proprietățile de utilizare* sunt acele categorii de proprietăți puse în valoare prin diverse aplicații practice.

În funcție de dependența față de structură, proprietățile aliajelor neferoase pot fi grupate în două mari categorii:

- proprietăți *independente de structură*, care sunt determinate numai de natura și proprietățile componenților, ca de exemplu, greutatea specifică, temperaturile de topire, căldura specifică și modulul de elasticitate;

- proprietăți *dependente de structură*, care sunt determinate, atât de compoziție cât și de starea și structura aliajelor, ca de exemplu, plasticitatea, rezistența mecanică, rezistivitatea electrică, proprietățile feromagnetice, de magneto-stricțiune și rezistență la coroziune.

Întrucât proprietățile aliajelor neferoase speciale vor fi tratate în capitolele următoare, la fiecare clasă de aliaje neferoase deformabile destinate laminării, este necesar ca, în continuare, să se studieze modificările caracteristicilor structurale ale acestor aliaje în procesul de deformare plastică prin laminare.

9.3. PARTICULARITĂȚI ALE STRUCTURII ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE

Modificările caracteristicilor structurale ale aliajelor neferoase speciale în procesele de deformare plastică prin laminare și de tratament termic au în vedere următoarele caracteristici ale structurii: a) *microstructura* - forma și dimensiunile grăunților precum și orientarea acestora în raport cu direcția de laminare; b) *substructura* - construcția internă a grăunților deformați care îi

deosebește de grăunții de recristalizare; c) *textura* - modul de orientare cristalografică a grăunților.

Laminarea aliajelor neferoase speciale se realizează atât la cald cât și la rece. *La laminarea la cald* a metalelor, limita dintre laminarea la cald și laminarea la rece se află în intervalul de temperaturi de $(0,5...0,6) T_{top}$, [K], stabilit de Bocivar. La laminarea la cald a aliajelor, în majoritatea cazurilor, această limită se deplasează în zona unor temperaturi mai ridicate. De exemplu, pentru laminarea la cald a aliajelor de aluminiu, acestea se încălzesc în intervalul de temperaturi de $350...500^{\circ}\text{C}$, ($623...773$ K). Scopul încălzirii constă în îmbunătățirea deformabilității acestor aliaje și anume, prin încălzire se micșorează rezistența la deformare, apreciată, în general, prin limita de curgere R_c și se mărește plasticitatea, apreciată, în general, prin alungirea relativă A .

Laminarea la rece se face la temperatura ambiantă, fără a utiliza agregate termice. Între laminarea la rece și laminarea la cald există nu numai diferențe cantitative ci și una calitativă care își găsește reprezentarea în structură.

În procesul de laminare la rece se produc în aceste aliaje tensiuni de rezistență ale căror valori depind de gradele de reducere aplicate. Rezistența la deformare, exprimată prin limita de curgere R_c , în funcție de gradul de reducere aplicat la laminarea la rece, se determină cu relația:

$$R_c = C \cdot \varepsilon^m \quad (9.1)$$

în care: C și m sunt coeficienți; cu creșterea vitezei de deformare durificarea se micșorează, deci $m < 1$;

ε - gradul de reducere relativă, la laminarea la rece.

În procesul de laminare la cald ecruisarea se limitează la stadiul inițial. Pe măsura creșterii tensiunilor în metal se dezvoltă și se amplifică procesele de dezecruisare, de eliminare a ecruisajului, procese similare celor care are loc în cazul tratamentului termic de recoacere. Spre deosebire de acestea din urmă, statice, procesele care au loc la deformarea la cald sunt procese dinamice (restaurare dinamică, recristalizare dinamică).

La atingerea unui anumit grad de deformare, de cca. 50 %, ecruisarea va dispărea. Din acest moment limita de curgere R_c va depinde numai de temperatura de deformare T_d și de viteza de deformare u , conform relației:

$$u = A \exp\left(\frac{\beta R_c}{k T_d}\right) \exp\left(-\frac{\Delta H}{k T_d}\right) \quad (9.2)$$

în care: A și β sunt constante, dependente de structură;

ΔH - energia de activare.

În mod frecvent se observă o dependență directă între limita de curgere R_c și parametrul Zener-Hollomon Z , ($\lg Z = \lg u + \Delta H / k T_d$).

Parametrul Zener - Hollomon Z , dat de relația următoare:

$$Z = u \exp \frac{\Delta H}{k T_d} \quad (9.3)$$

stabilește acțiunea simultană a temperaturii și a vitezei de deformare asupra valorii limitei de curgere. Modificarea temperaturii influențează considerabil variațiile de viteză.

Limita de curgere R_c depinde de temperatura de deformare T_d și de viteza de deformare u din două motive. În primul rând, condițiilor date de temperatură de deformare și viteză de deformare le corespunde o anumită structură a materialului deformat. În al doilea rând, de temperatura de deformare T_d și de viteza de deformare u depinde nivelul de desfășurare al proceselor de activare termică, care înlesnesc deformarea prin laminare în cazul unei structuri date.

S-a stabilit că prima cauză este principală, adică T_d și u influențează R_c în măsura în care de acești factori depinde structura după deformare. Astfel, se constată că există o legătură strânsă între limita de curgere și caracteristicile structurale.

În cazul laminării la rece, structura acestor aliaje depinde foarte mult de gradul de deformare ε și mai puțin de T_d și u , iar în cazul laminării la cald, dimpotrivă, structura depinde mai puțin de ε și foarte mult de T_d și de u .

Microstructura de deformare a semifabricatelor laminate din aliaje neferoase speciale se formează ca urmare a două procese: transformarea succesivă a microstructurii inițiale și, respectiv, crearea unor noi elemente specifice structurii de deformare.

Primul proces constă în modificarea formei grăunților în conformitate cu schema de deformare dintr-o anumită zonă a secțiunii, iar al doilea în formarea noilor limite ale grăunților. O dovadă a faptului că prin deformare apar noi limite o constituie experiențele de laminare a monocristalelor în urma cărora, acestea s-au transformat în policristale. Influența structurii inițiale moștenite este cu atât mai slabă cu cât este mai dezvoltat procesul de formare a noilor limite. Noile limite se formează în cazul în care este îngreunată modificarea formei inițiale a grăunților în forma finală și atunci când produsul are o textură care se deosebește foarte mult față de textura semifabricatului. Formarea intensă a noilor limite se remarcă, de exemplu, la laminarea grăunților turnați, care au forma complexă sau la refularea longitudinală a semifabricatelor presate. În ultimul caz acționează ambii factori întrucât textura de presare se deosebește foarte mult de textura de refulare.

Dacă direcțiile de alungire a grăunților la prima și a doua laminare coincid (laminare fără lățire), atunci limitele noi aproape că nu apar, iar noile dimensiuni ale grăunților sunt ușor de calculat, știind vechile dimensiuni, schema de deformare și gradul de reducere. De asemenea, este puțin probabilă formarea noilor limite, atunci când grăunții din semifabricat sunt echiaxiali, iar o textură distinctă lipsește (semifabricat recristalizat).

Dacă până la deformare profilul transversal al grăunților a avut o secțiune rotundă cu raza r , atunci, după deformare, grăunții capătă forma de

elipsoid cu dimensiunile axelor a , b , și c date de relațiile:

$$a = r(1 + \varepsilon_1); \quad b = r(1 + \varepsilon_2); \quad c = r(1 + \varepsilon_3) \quad (9.4)$$

Forma grăunților în produsul deformat corespunde schemelor locale de deformație. Astfel, în cazul barelor rotunde, în centrul acestora fibrele au o secțiune rotundă, iar în apropierea suprafeței exterioare au o secțiune alungită pe circumferință. Textura și forma grăunților sunt strâns legate întrucât ambele sunt determinate de tipul schemei de deformație.

Substructura de deformare. Deformarea plastică prin laminare se realizează prin propagarea progresivă a deplasării pe planul de alunecare, care poate fi considerată ca o deplasare a defectelor lineare (dislocații) ale rețelei cristaline. Pe lângă deplasarea dislocațiilor se produce o generare continuă de noi dislocații; simultan toată partea de dislocații vechi care se mărește se blochează. Aceasta conduce la creșterea densității dislocațiilor care, la rândul său, mărește tensiunea interioară din rețea, conduce la creșterea limitei de curgere R_c . Dependența lui R_c de ε , T_d și u , menționată mai sus, e condiționată de influența parametrilor de deformare asupra densității dislocațiilor.

Între densitatea dislocațiilor și gradul de reducere la laminare există relația:

$$\rho = c \cdot \varepsilon^n \quad (9.5)$$

în care: ρ este densitatea dislocațiilor, cm^{-2} ;

ε - gradul de reducere relativă, %;

c și n - constante, $n \approx 1$.

Limita de curgere este legată de densitatea dislocațiilor prin relația:

$$R_c = R'_0 + k \rho^m \quad (9.6)$$

Din formulele (9.5) și (9.6) rezultă ecuația ecruisării (9.1).

În cazul laminării la cald, activarea termică facilitează învingerea obstacolelor de către dislocații. Pe măsura deformării la cald viteza de relaxare a tensiunilor se mărește și începe un echilibru dinamic între generarea și anihilarea dislocațiilor. Întrucât densitatea dislocațiilor nu se modifică în continuare, valoarea R_c devine, de asemenea, constantă. În acest stadiu stabilizat de deformare la cald valoarea R_c depinde numai de T_d și de u .

Ca exemplu, pentru aluminiu și pentru câteva dintre aliajele de aluminiu speciale, a fost determinată dependența dintre limita de curgere și dimensiunea d a subgrăuntelui în stadiul stabilizat al laminării:

$$R_c = R_0'' + k d^{-m} \quad (9.7)$$

unde $m \approx 1,5$.

Prin urmare, la fel ca și R_c dimensiunea subgrăuntelui depinde numai de T_d și de u și se modifică invers proporțional cu $\lg Z$:

$$d^{-1} = a + c \left(\lg u + \frac{\Delta H}{k T} \right) \quad (9.8)$$

Dacă toate dislocațiile sunt blocate în sublimite, atunci densitatea lor se determină conform formulei:

$$\rho = \frac{\bar{\varphi}}{d \cdot b} \quad (9.9)$$

în care: $\bar{\varphi}$ este unghiul de reorientare a subgrăunților;

b - vectorul Burgers; pentru aluminiu și aliajele sale $b = 2,86 \cdot 10^{-8}$ cm.

Există deci o oarecare densitate a dislocațiilor și în interiorul subgrăunților:

$$\rho = k \left(d^{-1} \right)^n \quad (9.10)$$

unde $n = 2...3$.

Deci, în cazul analizat al aliajelor de aluminiu laminate la cald, densitatea totală a dislocațiilor este de $10^9...10^{10}$ cm⁻².

De dimensiunea subgrăunțului este legată și valoarea totală a energiei de deformare $E = 2 \sigma / d$, care influențează, la rândul ei, cinetica de recristalizare (σ este energia liberă care revine pe unitatea de suprafață a sublimitei) și, de asemenea, dimensiunea subgrăunțului determină limita de curgere $R_{p0,2}$ a aliajului analizat, la temperatura camerei:

$$R_{p0,2} = R_0 + k d^{-\frac{1}{2}} \quad (9.11)$$

În prezența particulelor dispersate și la o concentrație mare a soluției solide, structura de dislocații se modifică. Cu toate că în acest caz se păstrează o structură poligonală clară, densitatea dislocațiilor în interiorul subgrăunților se mărește. Prezența fazelor de dispersie reduce de 2...3 ori unghiul de reorientare a subgrăunților.

Aceste particularități ale substructurii sunt caracteristice aliajelor neferoase speciale industriale cu concentrație ridicată a soluției solide.

Textura de deformare. Atât la laminarea la cald cât și la laminarea la rece, mecanismul elementar de deformare a metalelor și aliajelor neferoase constă în deplasarea prin alunecare pe anumite planuri și în anumite direcții. Alunecarea începe în grăunții cel mai favorabil orientați apoi, pe măsura creșterii tensiunii se extinde asupra tuturor celorlalți grăunți. Deformarea prin alunecare este însoțită de rotația firească a rețelei cristaline în raport cu forțele exterioare. În afară de aceasta, fiecare grăunte suportă acțiunea grăunților învecinați care îi obligă să-și modifice forma în conformitate cu schema de deformare a întregului produs sau a unei părți a acestuia. Ca urmare a rotațiilor convenite la un grad de deformare de 30...50 %, grăunții capătă o orientare finală care prin deformări ulterioare nu se mai modifică sau se modifică foarte puțin.

Caracterul orientării finale depinde de schema de deformare aplicată și anume, de raportul deformațiilor principale ε_1 , ε_2 și ε_3 . În virtutea simetriei procesului de deformare, grăuntele cristalin poate fi orientat cu o probabilitate egală în una din cele câteva direcții simetrice față de direcțiile principale de

deformație. Textura de deformare este descrisă, de obicei, cu ajutorul acestor orientări predominante, numite *componente ale texturii*. Această descriere este incompletă deoarece nu stabilește dispersia orientărilor care poate să ajungă la circa 20...30°.

Se deosebesc două tipuri principale de textură: textura axială și textura de laminare. *Textura axială* se observă, în general, la deformarea cu simetrie axială - alungire, comprimare, tragere, presare - dar și la laminarea barelor cu secțiunea rotundă. În acest caz grăunții sunt orientați în direcția principală de deformare prin una și aceeași direcție cristalografică. În cazul unei texturi simple, axiale, celelalte direcții cristalografice nu coincid, iar caracteristicile sunt indicate de către indicii de direcție, care coincid cu axa de deformare.

Texturii de laminare îi corespund una sau mai multe orientări preferențiale ale grăunților, fixate în raport de toate axele de deformare. Descrierea texturii de laminare se face cu ajutorul indicilor planului, care coincide cu planul de laminare și cu ajutorul indicilor direcției, care coincide cu direcția de laminare pentru toate orientările preferențiale.

De exemplu, în cazul aluminiului și pentru toate aliajele de aluminiu se observă următoarele texturi principale de deformare:

a) Laminarea tablelor și benzilor - textură dublă $\{110\} \langle 112 \rangle$ și $\{112\} \langle 111 \rangle$. Fiecare din orientările indicate este alcătuită din două componente simetrice. La aluminiu predomină orientarea $\{112\} \langle 111 \rangle$, iar la aliajele de aluminiu predomină $\{110\} \langle 112 \rangle$, întrucât volumul cu orientarea $\{112\} \langle 111 \rangle$ se reduce proporțional cu creșterea concentrației soluției solide.

b) Tragerea, presarea și laminarea barelor și sârmelor cu secțiuni rotunde - textură axială dublă $\langle 111 \rangle$ și $\langle 100 \rangle$. Majoritatea grăunților sunt orientați în lungul axei barei în direcția $\langle 111 \rangle$. Proporția corespunzătoare direcției $\langle 100 \rangle$ crește odată cu mărirea concentrației de soluție solidă (până la cca. 30 - 40 % de exemplu în cazul aliajelor de tip duraluminiu).

c) Presarea profilelor cu pereți groși și a platbenzilor groase - textură obișnuită de laminare. La benzile groase și la profile apare componenta texturii axiale care este cu atât mai accentuată cu cât este mai mare raportul dintre grosime și lățime.

d) Presarea, laminarea și tragerea țevelor - așa numitele "texturi cilindrice" care sunt de fapt texturi obișnuite de laminare, dacă țeava este tăiată pe generatoare și este desfășurată în plan.

e) Refularea longitudinală a barelor - textură axială $\langle 110 \rangle$.

Ca urmare a neuniformității deformației, textura în volumul produsului este neomogenă. În fiecare zonă, ca și la alte tipuri de prelucrare sub presiune, textura corespunde raportului dintre deformațiile principale:

$$\varepsilon_1 \gg \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \quad - \text{textură axială } \langle 110 \rangle \langle 100 \rangle;$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 > \varepsilon_3 \quad - \text{textură axială } \langle 110 \rangle;$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_3 ; \varepsilon_2 = 0 \quad - \text{textură de laminare.}$$

Astfel, în zona periferică a barelor presate se remarcă textura de laminare (mai precis textura cilindrică) $\{110\} \langle 112 \rangle$.

Capitolul 10

SEMIFABRICATE ȘI PRODUSE LAMINATE FINITE DIN ALIAJE NEFEROASE SPECIALE

10.1. SEMIFABRICATE DESTINATE LAMINĂRII

Semifabricatele din aliaje neferoase speciale destinate laminării sunt lingourile turnate de diferite dimensiuni și forme, cum sunt lingourile cilindrice (bare) sau lingourile plate (sleburile sau brame). În unele cazuri speciale, când semifabricatele turnate din anumite aliaje neferoase, posedă plasticitate mică, se execută forjarea sau presarea prealabilă, pentru distrugerea structurii de turnare și îmbunătățirea plasticității lingoului. Astfel de măsuri se iau în cazuri excepționale deoarece, în comparație cu alte forme de prelucrare, inclusiv forjarea și presarea, laminarea este un procedeu mai productiv și mai economic.

Lingourile cilindrice (barele rotunde) din aliaje neferoase se utilizează în secțiile de extrudare-laminare-tragere pentru fabricarea țevelor, caz în care pe flux apare și faza de laminare, dar și pentru fabricarea barelor, profilurilor și a sârmelor, aceste produse realizându-se numai prin extrudare și tragere, obținerea lor nefăcând obiectul prezentei lucrări. În cazul aliajelor grele, diametrele lingourilor cilindrice din sunt, de obicei, de 150...400 mm, iar în cazul aliajelor ușoare, diametrele lingourilor cilindrice pot să ajungă până la 800 mm.

În afară de lingourile cilindrice pline se pot obține și *lingouri tubulare* utilizate, în continuare, pentru laminare sub formă de țevi finite.

Lingourile plate (sleburile) din aliaje neferoase speciale sunt destinate secțiilor de laminare la cald și/sau la rece a tablelor și benzilor.

Lingourile se obțin prin turnare în lingotiere verticale sau orizontale, prin turnare semicontinuă (verticală sau orizontală) sau, cel mai modern, prin turnare continuă orizontală. Turnarea continuă, combinată cu procedee moderne de vibrație și amestecare a materialului metalic topit, este foarte răspândită la turnarea lingourilor din aliaje cupru-zinc, cupru-nichel, a aliajelor pe bază de nichel și a unor aliaje pe bază de aluminiu, iar turnarea semicontinuă este metoda principală de fabricare a lingourilor din aliaje greu deformabile cum sunt aliajele cupru-staniu și aliajele de aluminiu de înaltă rezistență.

Din punctul de vedere al producției de laminate, avantajele turnării continue și semicontinue a aliajelor neferoase se referă la micșorarea considerabilă a numărului și formelor de defecte (exfolieri, sufluri, bășici, incluziuni etc.), la îmbunătățirea omogenității structurale a aliajelor și a

proprietăților mecanice ale lingourilor, realizându-se condiții pentru stabilizarea regimului de reduceri la fiecare trecere separată, mai ales în prima perioadă de laminare, pentru distrugerea structurii de turnare.

Lingourile mari din aliaje neferoase speciale, înainte de a fi debitate în bucăți, sunt supuse tratamentului termic de recoacere de omogenizare. În acest caz, pe lângă micșorarea neomogenității structurale, se anulează și tensiunile remanente care au luat naștere în procesul de cristalizare, ca urmare a neuniformității structurale datorate răcirii bruște. Pentru micșorarea tensiunilor remanente, pereții laterali ai lingotierelor se construiesc rotunjiți.

Grosimile și greutatea lingourilor se determină în funcție de proprietățile fizico-mecanice ale aliajelor turnate și anume, de comportarea la turnare și la deformarea plastică la cald și la rece, de caracteristicile impuse produselor laminate finite, de caracteristicile utilajelor de laminare și de volumul producției de laminate. Cu cât sunt mai bune proprietățile de turnare, cu cât este mai mare intervalul de temperaturi de deformare la laminarea la cald, utilajul mai puternic și volumul producției mai mare, cu atât pot să fie mai mari, ca dimensiuni și greutate, lingourile folosite la laminare.

Lingourile mici, ca dimensiuni și greutate, se folosesc la laminarea aliajelor neferoase dure, greu deformabile sau neprelucrabile la cald, dar și la laminarea aliajelor care se pot deforma plastic la cald însă intervalul lor de temperaturi de laminare este foarte mic.

În cazul laminării la cald a aliajelor neferoase grele (de cupru, de nichel etc.) se folosesc lingouri cu grosimi de 150...200 mm, lățimi de 500...1000 mm, lungimi de 1000...2000 mm și cu greutate de 1000...2000 kg, iar în cazul laminării la rece a aliajelor neferoase grele care nu pot fi laminate la cald, lingourile se toarnă cu grosimi de 50...65 mm, lățimi de 500...900 mm, lungimi de 1000...3000 mm și greutate de până la 1200 kg.

În cazul laminării la cald a aliajelor neferoase ușoare, diversitatea de lingouri folosite este mai mare. Astfel, la laminarea aliajelor de aluminiu de înaltă rezistență (2014, 2024, 7075) se utilizează lingouri (sleburi) cu grosimi de 200...300 mm, grosimi determinate de viteza optimă de turnare. La laminarea lingourilor din celelalte aliaje de aluminiu, grosimea acestora crește odată cu trecerea spre aliaje mai plastice, până la 400...500 mm. Lățimea lingourilor din aliaje de aluminiu este de 500...2000 mm, lungimea este de 2000...7000 mm, iar greutatea lingourilor este de 1000...5000 kg. Fabricarea lingourilor din titan și aliaje de titan necesită tehnologii mult mai complexe. Pentru obținerea din buretele de titan a titanului compact și a aliajelor de titan în lingouri, se utilizează turnarea în cuptoare cu inducție sau cu arc, sub atmosferă de protecție.

În primul caz lingourile conțin 0,3...1,0 %C absorbit din creuzetul de grafit al instalației. Prezența carbonului micșorează plasticitatea acestor aliaje, astfel încât pot fi forjate la cald, dar nu se pot lamina. Aceste deficiențe sunt înlăturate în al doilea caz, prin metoda turnării în cuptoare cu arc, atunci când titanul topit apare drept unul dintre electrozi, iar electrodul consumabil poate fi wolframul. Prin această metodă se obțin lingouri cu mase de până la 3000 kg.

10.2. PRODUSE LAMINATE

Din aliaje neferoase speciale se pot obține, prin laminare, toate produsele plate și unele produse tubulare. Celelalte produse obținute prin deformări plastice, cum sunt barele, profilurile pline sau cave, sârmele și anumite produse tubulare nu fac obiectul prezentei lucrări întrucât acestea se obțin prin extrudare, tragere, trefilare sau forjare.

Produsele plate care se laminează din aliaje neferoase speciale sunt plăcile, tablele, benzile și foliile (tabelul 10.1).

Tabelul 10.1

Principalele produse laminate din aliaje neferoase speciale

| Denumire produse | Grupa de aliaje | Caracteristici dimensionale | Limite de dimensiuni (mm) | Standarde de produse |
|------------------|-------------------------|---|---------------------------|--|
| Plăci | Aliaje Cu - Zn | Grosimea Lățimea | 6,0...70,0 500 | STAS 2430 / 2 - 80 |
| Table | | Grosimea Lățimea | 0,5...5,0 500; 1000 | STAS 289 / 2 - 87 |
| Benzi | | Grosimea Lățimea | 0,1...2,0 10...560 | STAS 290 / 2 - 92 STAS 8633 - 86 |
| Table | Aliaje Cu - Sn | Grosimea Lățimea | 0,5...5,0 300; 320 | STAS 94 / 2 - 89 |
| Benzi | | Grosimea Lățimea | 0,2...2,0 10...320 | |
| Table | Aliaje Cu - Ni - Zn | Grosimea Lățimea | 0,5...5,0 300 | STAS 1178 - 83 |
| Benzi | | Grosimea Lățimea | 0,2...2,0 20...300 | |
| | Cu - Ag | Grosimea Lățimea | 0,1...4,0 10...140 | STAS 8903 - 87 |
| Table groase | Aliaje de aluminu | Grosimea Lățimea | 6,0...100 1500...3500 | SR EN 485 - 2 : 1995 |
| Table | | Grosimea Lățimea | 0,2...6,0 20...1500 | |
| Benzi | | Grosimea Lățimea | 0,2...5,0 20...2600 | SR EN 485 - 4 : 1995 |
| Folii | Al99,5; AlE | Grosimea Lățimea | 0,006...0,30 20...1000 | SR EN 546 - 3 : 1998 |
| Țevi | Aliaje Cu - Zn | Diametrul exterior Grosime perete | 5,0...70 1,0...6,0 | STAS 521 / 2 - 80 STAS 522 / 2 - 80 |
| | Aliaje de aluminu | Diametrul exterior Grosime perete | 5,0...80 0,5...15,0 | STAS 524 / 2 - 90 |

Tablele din aliaje neferoase speciale sunt produse laminate plate cu secțiunea transversală dreptunghiulară, cu grosimea constantă, mai mare sau egală cu 0,10 mm, care se livrează la lungimi drepte, cu margini debitate la

foarfecă sau la fierăstrău. Grosimea unei table este mai mică decât o zecime din lățimea acesteia. Dimensiunile tablelor din aliaje neferoase (grosime, lățime, lungime), caracteristicile mecanice și alte proprietăți specifice, trebuie să corespundă cerințelor și condițiilor tehnice prevăzute în standardele de produse.

În cazul aliajelor neferoase grele, tablele se laminează de obicei în grosimi de 0,5...5,0 mm, cu lățimi de 10...1000 mm și cu lungimi de 1000...6000 mm. În situații speciale, menționate în standarde, se pot lamina table și cu grosimi și lungimi mai mari. Este cazul *plăcilor* din aliaje Cu-Zn, care pot atinge grosimi de 70 mm sau chiar mai mult, greutatea acestor plăci ajungând la peste 3000 kg.

Tablele din aliaje neferoase ușoare se laminează în gama de grosimi de 0,2...6,0 mm, cu lățimi de 20...1500 mm și lungimi de 2000...4000 mm. În cazul *tablelor groase* laminate la cald, grosimea poate să atingă valoarea de 100 mm sau chiar mai mult.

Benzile din aliaje neferoase speciale sunt produse laminate plate cu secțiunea transversală dreptunghiulară, cu grosime constantă, mai mare sau egală cu 0,1 mm, care se livrează în rulouri, în mod obișnuit cu marginile tăiate. Grosimea benzii este mai mică decât o zecime din lățimea acesteia. Grosimea și lățimea benzilor corespund strict anumitor standarde (tabelul 10.1). Lungimea maximă a benzilor nu este stipulată în standarde, iar lungimea minimă este determinată de necesitățile consumatorului și trebuie să fie cât mai mare în scopul micșorării cantității de deșeuri la fabricare și la utilizare. Grosimea minimă a benzilor din aliaje neferoase speciale este de 0,1...0,2 mm, iar grosimea maximă a benzilor diferă de la aliaj la aliaj și este, în cele mai multe cazuri, de 2 mm.

Foliile sunt table și benzi din aluminiu tehnic sau aluminiu rafinat, cu grosimi mai mici de 0,1 mm. Grosimea foliilor obținute prin laminare poate fi de 0,1...0,006 mm, sau chiar mai mică.

Țevile din aliaje neferoase speciale sunt produse cave, cu secțiuni transversale constante, cu o singură cavitate închisă pe toată lungimea fiecărui produs și cu grosimea de perete constantă. Se obțin din semifabricate cilindrice turnate, prin procesele tehnologice de extrudare, laminare și tragere, utilizându-se toate aceste trei etape tehnologice sau numai unele dintre ele. Țevile laminate, obținute din semifabricat extrudat, au diametre exterioare de 5...80 mm și grosimi de perete de 0,5...15 mm. Forma secțiunii transversale este rotundă și se livrează la lungimi drepte sau în colaci.

Țevile cu secțiunea transversală ovală, pătrată, dreptunghiulară, triunghiulară sau poligonală precum și profilurile, cave sau pline, de diferite forme și dimensiuni se obțin, în general, prin extrudare sau, în unele cazuri, prin extrudare urmată de tragere la rece și nu fac obiectul prezentei lucrări.

10.3. MĂRCI DE ALIAJE NEFEROASE SPECIALE FOLOSITE PENTRU LAMINARE

Cea mai largă utilizare la fabricarea produselor laminate din aliaje neferoase speciale o prezintă aliajele metalelor neferoase grele și anume, aliajele

Cu-Zn-X (alamele speciale), aliajele Cu-Sn-X (bronzurile speciale) și aliajele speciale Cu-Ni-X, în care X poate fi unul sau mai multe dintre elementele de aliere ca aluminiul, siliciul, plumbul manganul, beriliul etc. acestea fiind *adaosuri speciale de aliere*. De asemenea, sunt mult utilizate, ca produse laminate și aliajele speciale pe bază de aluminiu, de magneziu sau de titan.

Produsele laminate plate (table sau benzi) și produsele tubulare (țevi) din aliaje speciale pe bază de cupru se execută din aliaje speciale cupru-zinc conform STAS 95-90, din aliaje speciale cupru-staniu conform standardului internațional adoptat ca standard românesc SR ISO 427 : 1996 și din aliaje speciale cupru-aluminiu conform SR ISO 428 : 1996. Produsele laminate din aliaje de aluminiu se realizează din aliaje Al-Cu, Al-Mn, Al-Si, Al-Li, Al-Mg, Al-Mg-Si, Al-Zn-Mg(-Cu) și Al-Fe conform standardului european adoptat ca standard românesc SR EN 573-4 : 1995.

Principalele mărci de aliaje neferoase utilizate pentru laminarea produselor plate și tubulare sunt prezentate în tabelul 10.2.

Tabelul 10.2

Principalele mărci de aliaje neferoase utilizate pentru laminare

| Grupe de aliaje | Mărci de aliaje | Standarde de material |
|---------------------|---|-----------------------|
| Aliaje Cu - Zn | CuZn10; CuZn15; CuZn20; CuZn30 CuZn36; CuZn37; CuZn40Pb1 CuZn39Pb2; CuZn31Si; CuZn28Sn1 | STAS 95-90 |
| Aliaje Cu - Sn | CuSn2; CuSn4; CuSn5; CuSn6; CuSn8 CuSnZn2; CuSn4Pb4Zn3; CuSn4Pb4Zn4 | SR ISO 427 : 1996 |
| Aliaje Cu - Al | CuAl5; CuAl7; CuAl8; CuAl7Fe3Sn CuAl7Si2; CuAl8Fe3; CuAl9Ni3Fe2 | SR ISO 428 : 1996 |
| Aliaje Cu - Ni - Zn | CuNi18Zn20; CuNi12Zn24 CuNi10Zn27; CuNi10Zn28Pb1 | SR ISO 430 : 1995 |
| Cu - Ag | CuAg0,07; CuAg0,1 | STAS 11527- 88 |
| Aliaje Al - Cu | AlCu4SiMg (2014); AlCu4MgSi (2017) AlCu4Mg1(2024); AlCu2Li2Mg1,5(2091) | SR EN 573-4 : 1995 |
| Al - Mn | AlMn1Cu (3003); AlMn1Mg0,5 (3005) | |
| Al - Si | AlSi1Fe (4006); AlSi1,5Mn (4007) | |
| Aliaje Al - Mg | AlMg1 (5005); AlMg1,5Mn (5040) AlMg2 (5251); AlMg3 (5754) | |
| Aliaje Al - Mg - Si | AlMg1Si0,8 (6003); AlMg1SiCu (6061) AlMg0,7Si (6063); AlSi1MgMn (6082) | |
| Aliaje Al-Zn-Mg(Cu) | AlZn4,5Mg1 (7020); AlZn5Mg3 (7022) AlZn1 (7072); AlZn5,5MgCu (7075) | |
| Aliaje Al-Fe; Al-Li | AlFeSi (8011) AlLi2,5Cu1,5Mg1 (8090). | |

PARICULARITĂȚILE PROCESULUI TEHNOLOGIC DE LAMINARE A ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE

11.1. CONSIDERAȚII PRIVIND DEFORMABILITATEA ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE

Având în vedere că diferitele procedee de deformare plastică prezintă scheme mecanice de deformare specifice și că diferiți factori au influență diferită asupra plasticității și rezistenței la deformare a metalelor și aliajelor neferoase supuse deformării, până în momentul de față nu s-a reușit să se găsească o metodă universal valabilă de determinare a valorilor absolute cu aplicabilitate directă pentru calculul plasticității și rezistenței la deformare. Din această cauză, astăzi încă se mai recurge la diferite metode indirecte de simulare pentru studiul deformabilității. Valorile astfel obținute pot fi folosite numai pentru compararea comportării relative la deformare a diferitelor materiale metalice analizate.

Până în prezent, pentru *studiul deformabilității* au fost deja experimentate o serie de metode, printre care tracțiunea, compresiunea, încovoierea, laminarea etc. unor epruvete de diverse forme și dimensiuni. Actualmente încercarea prin torsiune la cald, care este un mijloc eficace de studiu a aptitudinii la deformare plastică a metalelor și aliajelor, pare a fi considerată, în urma experienței, ca unul dintre cele mai bune teste de deformabilitate.

Avantajul principal al încercării prin torsiune rezidă din posibilitatea de a obține deformații importante realizate la viteze constante într-un punct dat al epruvetei, fără perturbații ale curgerii materialului metalic deformat. Atât viteza de deformație u și gradul de deformare \mathcal{E} cât și temperatura T_d de deformare pot fi impuse. Astfel, încercarea prin torsiune permite simularea unui ciclu termomecanic complet, corespunzător unei laminări continue și să se analizeze atât aspectul mecanic cât și aspectul metalurgic al uneia sau a mai multor deformații.

Încercarea prin torsiune la cald permite să se studieze direct plasticitatea aliajului analizat și rezistența la deformare.

Plasticitatea aliajelor neferoase speciale, fiind capacitatea acestora de a se deforma plastic sub acțiunea unor forțe exterioare, este influențată de o serie de

factori caracteristici de material (compoziția chimică, structura) și de alți factori caracteristici condițiilor de deformare (temperatura, gradul și viteza de deformare, schema mecanică aplicată).

Compoziția chimică a aliajelor neferoase speciale influențează plasticitatea și rezistența la deformare a acestora, atât prin natura și repartiția elementelor de aliere cât și prin transformările de fază pe care le produc. Cu creșterea gradului de aliere scade plasticitatea și crește rezistența la deformare a acestor aliaje.

Pentru exemplificare, se prezintă o succintă analiză a aliajelor de aluminiu speciale din sistemele Al-Cu-Mg, de tip dural și Al-Zn-Mg-Cu de tip zical.

La aliajele de tip *dural* structura constă din grăunți de soluție solidă α cu baza de aluminiu și o serie de faze intermetalice binare, ternare sau complexe, solubile în soluția solidă, (Al_2Cu , Al_2CuMg , Al_3Mg_2) sau insolubile în soluția solidă (AlFe_3SiMn , AlFeCuSi , Al_3Mn).

În cazul acestei grupe de aliaje neferoase speciale o influență considerabilă asupra plasticității și rezistenței la deformare o are modificarea raportului între conținutul de cupru și cel de magneziu, la o valoare constantă a sumei acestor conținuturi ($\text{Cu} + \text{Mg} = 8\%$), creșterea conținutului de magneziu micșorând plasticitatea aliajelor de tip dural (fig. 11.1).

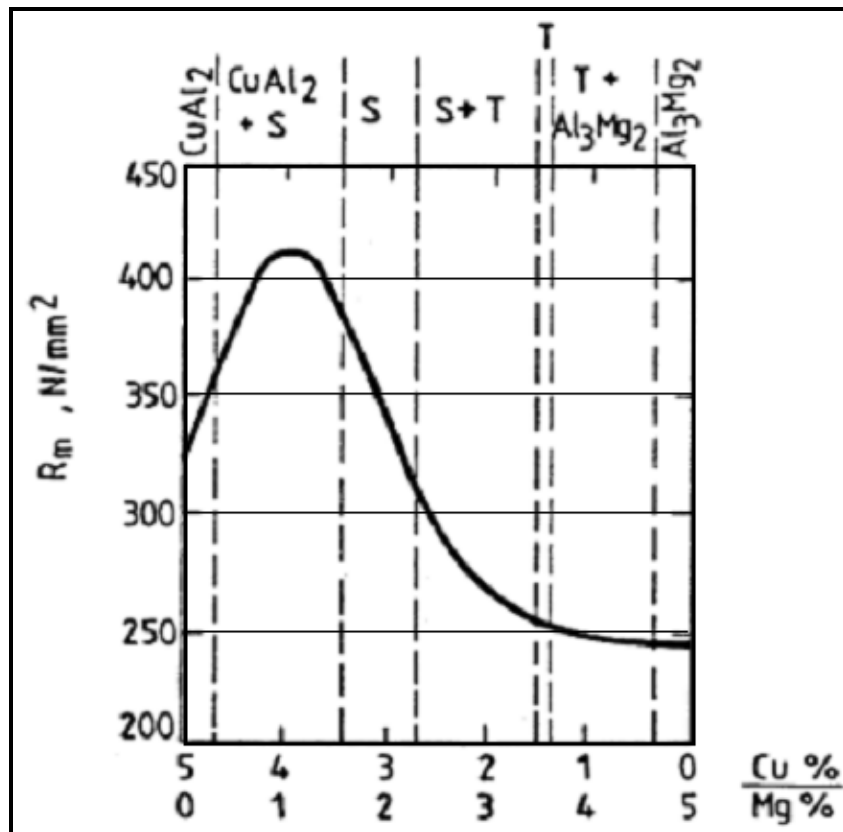


Fig. 11.1. Variația rezistenței la rupere a aliajelor Al-Cu-Mg în funcție de raportul Cu / Mg.

Cea mai mare plasticitate, dar cea mai mică rezistență la cald o au aliajele Al-Cu-Mg slab aliate, în special cele cu raportul Cu / Mg = 19, în care faza durificatoare este Al_2Cu ; aliajele cu raportul Cu / Mg mic (ex. Cu/Mg=1,3...2,7

pentru aliajele 2014 și 2024) au cea mai mare rezistență, dar au plasticitatea mult mai mică; aliajele celelalte, cu raportul $Cu/Mg=6...8$ ocupă poziții intermediare.

Este foarte important conținutul în impurități de fier (max. 0,2%) și de siliciu (max. 0,1%) care micșorează plasticitatea, adaosurile de mangan (circa 1%) neutralizând influența dăunătoare a fierului și măbind rezistența la coroziune și durificarea.

În cel de-al doilea caz, al aliajelor speciale din sistemul Al-Zn-Mg-Cu de tip *zicral*, durificarea se realizează prin precipitarea formelor de tranziție ale fazei $MgZn_2$. În figura 11.2 se prezintă diagrama de existență, la temperatura de $460^\circ C$, a tuturor fazelor izomorfe ale acestui sistem de aliaje speciale de aluminiu. Fazele indicate cu simbolurile T și M sunt amestecuri de faze izomorfe.

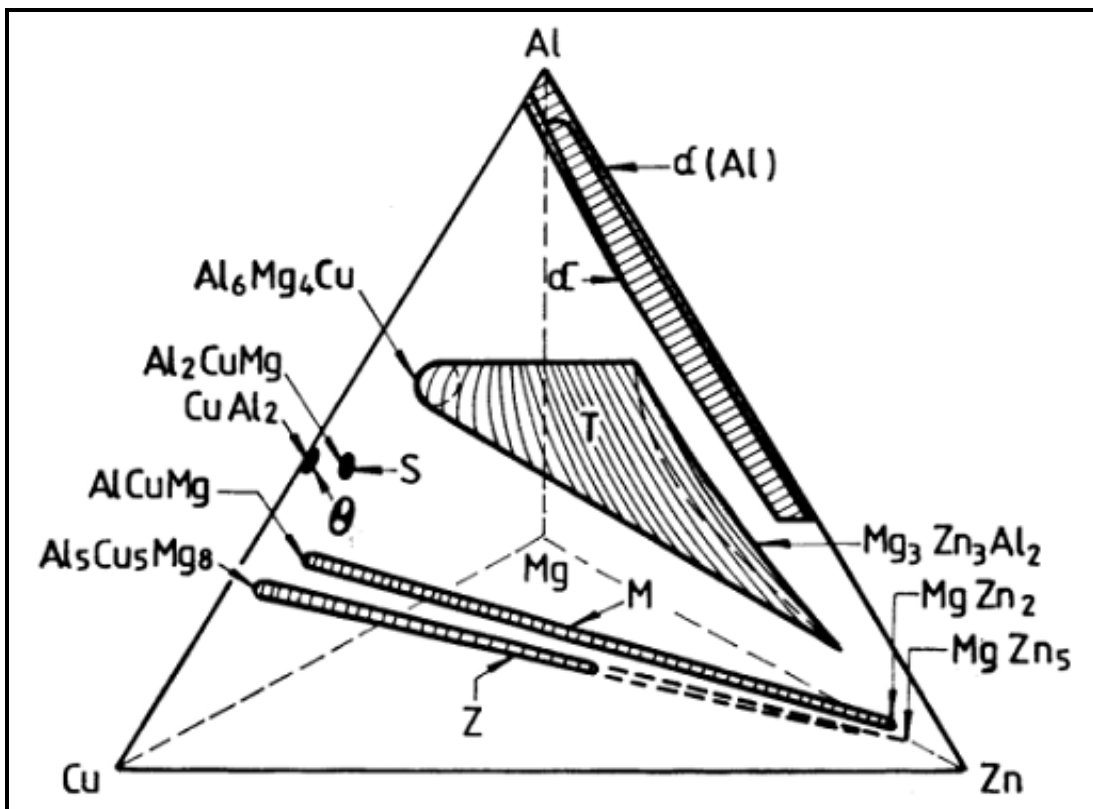


Fig. 11.2. Diagrama de existență a fazelor izomorfe în sistemul de aliaje Al-Zn-Mg-Cu la temperatura de $460^\circ C$.

Cercetările efectuate au arătat că atât plasticitatea cât și rezistența la coroziune fisurantă sub sarcină a aliajelor Al-Zn-Mg-Cu sunt corespunzătoare la procente de Zn și Mg care satisfac relațiile: $Zn+Mg = \text{max.}6\%$; $Zn/Mg=2...4 \%$.

Impuritățile de fier și siliciu formează compuși solubili în soluția solidă α sub formă de particule dure și fragile care reduc plasticitatea precum și proprietățile finale ale aliajelor; adaosuri mici de titan, bor și zirconiu în aliajele Al-Zn-Mg-Cu conduc la creșterea plasticității.

În diagrama din figura 11.3 se prezintă cantitativ influența condițiilor inițiale de omogenizare asupra caracteristicilor de deformabilitate și asupra comportamentului la recristalizare în cazul aliajului $AlZn_{5,5}MgCu$ (7075), reprezentativ pentru sistemul de aliaje de aluminiu speciale Al-Zn-Mg-Cu.

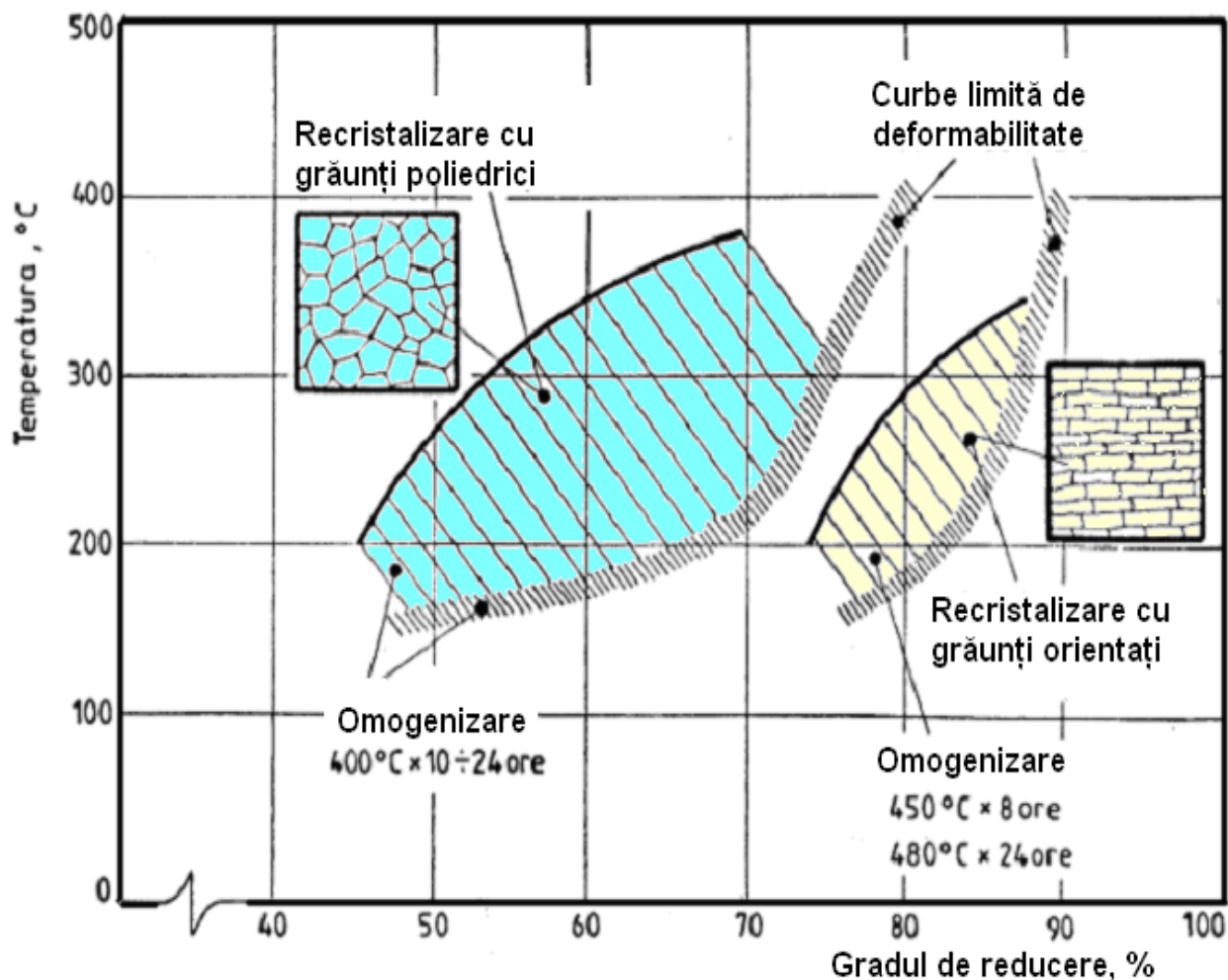


Fig. 11.3. Influența condițiilor inițiale de omogenizare asupra caracteristicilor de deformabilitate și asupra procesului de recrystalizare a aliajului AlZn5,5MgCu: tratamentul termic de recrystalizare s-a efectuat la temperatura de 475°C timp de 2 h.

Din diagramă rezultă că posibilitățile de deformare sunt mai limitate când materialul este parțial omogenizat, datorită dizolvării incomplete a segregațiilor intercrystaline; din alt punct de vedere, recrystalizarea care apare într-un material complet omogenizat, caracterizat de prezența unui precipitat fin dispersat conținând crom, are un caracter parțial echiaxial, consecință a rolului antirecrystalizant exercitat de particulele bogate în crom.

Aceste rezultate constituie baza selectării unor grupări de condiții de deformări plastice și de tratamente termice (tratamente termomecanice), în scopul constituirii unui proces de recrystalizare cu grăunți poliedrici.

La încercarea prin torsiune la cald, plasticitatea este caracterizată de numărul de rotații realizate de epruvetă până la rupere. Diagramele din figura 11.4, care prezintă rezultatele încercării prin torsiune la cald a unui aliaj special din sistemul Al-Cu-Mg (AlCu4Mg1 sau 2024) arată că plasticitatea la cald crește cu creșterea temperaturii în domeniul 300...450/475°C și scade, la o temperatură dată, când viteza de deformație crește.

Acest efect nefavorabil unei viteze mari de deformație, se accentuează prin creșterea temperaturii. În urma acestor rezultate se poate deduce că, în practică, pentru a se profita de o plasticitate maximă a aliajului va trebui, pe de o

parte să se lamineze la 450°C, dacă viteza de deformare este ridicată și la 475°C, dacă viteza este scăzută, iar pe de altă parte să se evite vitezele mari de deformare în cazurile în care se laminează cu grade mari de reducere.

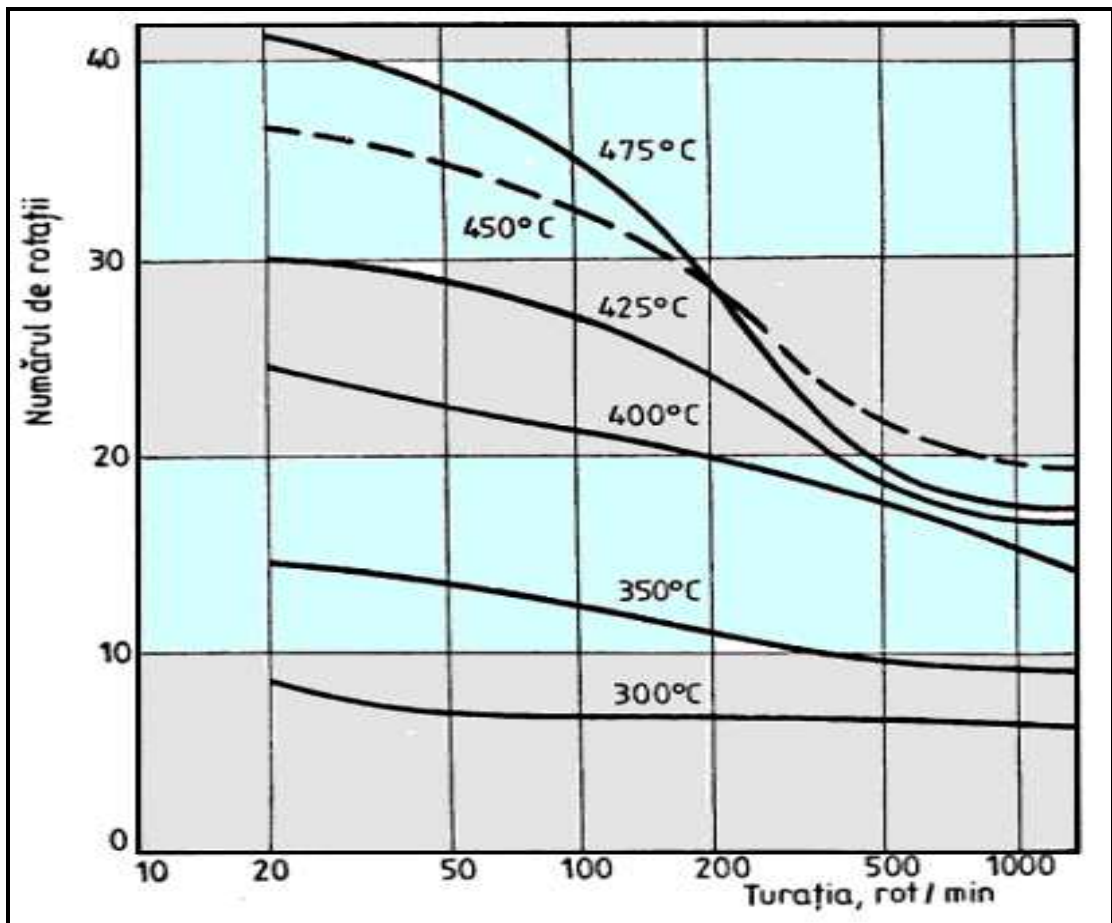


Fig. 11.4. Influența temperaturii și a vitezei de deformare asupra plasticității aliajului AlCu4Mg1 la încercarea prin torsiune la cald.

Rezistența la deformare a aliajelor neferoase este rezistența pe care o opun aceste materialele metalice deformării plastice în condițiile concrete ale procesului de prelucrare plastică prin presiune (condiții de frecare, temperatură, grad și viteză de deformare, schema mecanică a deformării).

În cazul testării prin torsiune această proprietate poate fi caracterizată prin momentul maxim de torsiune sau, făcându-se apel la teoria plasticității, prin tensiunea σ corespunzătoare valorilor date ale deformăției ε , vitezei de deformare u și temperaturii de deformare T_d , astfel încât $\sigma = f(\varepsilon, u, T_d)$. De aici se constată că deformările la cald sunt caracterizate prin relații între σ , u și T_d în care nu intervine ε .

Pentru a se prezenta o imagine de ansamblu asupra mărimii rezistenței la deformare a aliajelor neferoase este necesar să se reprezinte, comparativ, rezistența la deformare a mai multor astfel de aliaje și rezistența la deformare a unor oțeluri aliate.

În figura 11.5 se prezintă, comparativ, rezistența la deformare a unor aliaje de aluminiu, a unor aliaje de titan, a unor aliaje de molibden și a unor oțeluri aliate.

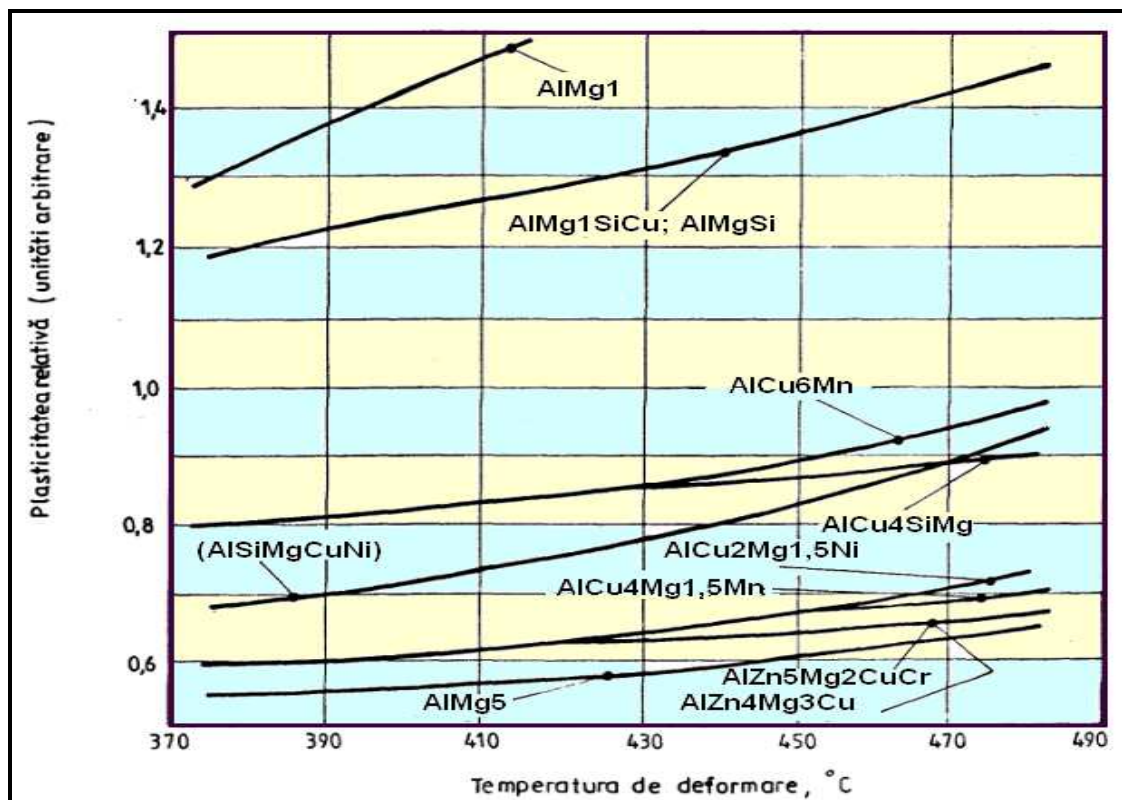


Fig. 11.5. Reprezentarea comparativă a rezistenței la deformare a unor aliaje neferoase și a unor oțeluri aliate.

Rezistența la deformare indicată în ordonată este exprimată prin presiunea de deformare necesară pentru a realiza o reducere de 10 % prin compresiune uniaxială.

Din figura 11.5 se poate observa comportamentul relativ apropiat, la temperaturile corespunzătoare de deformare, a aliajelor de aluminiu speciale și a unor oțeluri analizate. Se constată, de asemenea, că rezistența la deformare a aliajelor pe bază de titan este mai mare decât cea a aliajelor de aluminiu, fiind comparabilă cu cea a oțelului 12NiCr180, cu unele valori chiar mai ridicate, iar aliajul pe bază de molibden ocupă o poziție intermediară. În același timp, pentru toate materialele metalice analizate, cu excepția aliajului pe bază de molibden, se regăsește scăderea rezistenței la deformare cu creșterea temperaturii.

Dintre aliajele metalelor neferoase grele, comportarea la deformarea prin laminare a *bronzurilor cu staniu* (aliaje Cu-Sn) este 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 cu staniu este intervalul mare de temperaturi la care are loc cristalizarea și, ca urmare, aceste bronzuri prezintă tendință accentuată spre segregatie 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, mărind astfel plasticitatea aliajului în stare turnată.

La temperaturi ridicate, bronzurile cu staniu au plasticitatea scăzută, insuficientă pentru laminarea la cald, acest procedeu de prelucrare aplicându-se 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 recristalizare, 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 aliajelor speciale cupru-staniu cu structură de deformare, recristalizată și pe măsură ce grosimea semifabricatului se micșorează pe parcursul operațiilor de laminare la rece.

11.2. CARACTERISTICI ALE LAMINOARELOR PENTRU LAMINAREA ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE

Analizând problema dezvoltării mondiale a sectoarelor de laminare a aliajelor neferoase speciale, de la bun început trebuie luat în considerare faptul că aceasta depinde de tipul și mărimea producției. În cazul unei producții mari, de peste 150 000 t/an, se construiesc sisteme convenționale de laminare dotate cu un laminor cuarto reversibil degrosisor, cuplat direct cu trei caje de laminare la cald în tandem sau cu un laminor cuarto reversibil, cu înfășurător pentru livrare imediată după cajă.

Sistemele din primul tip au o productivitate foarte mare, iar produsul finit este banda laminată la cald cu grosimea minimă de 2,5 mm și lățimea maximă de 3 000 mm. În sistemul convențional de laminor pot fi produse laminate din toate mărcile de aliaje neferoase deformabile. În cazul unui program de producție mai mic, sub aspect economic sunt mai avantajoase sistemele neconvenționale care utilizează, ca materie primă pentru laminoarele la rece, benzile obținute prin turnare continuă sau benzile obținute de la o instalație de turnare continuă a benzilor cuplată cu un laminor la cald.

În ceea ce privește progresul tehnic mondial în construcția laminoarelor pentru *table și benzi late la cald* din aliaje neferoase speciale se constată, în ultima vreme, o însemnată rămânere în urmă a SUA față de Japonia și țările UE.

Primele laminoare continue de benzi late din aliaje neferoase au fost montate, în special, pentru asigurarea cu semifabricate a laminoarelor de benzi la rece. Creșterea în salturi a parametrilor principali ai noilor laminoare continue pentru benzi late a determinat în SUA apariția laminoarelor de *a doua generație*. Una dintre particularitățile laminoarelor din a doua generație o constituie laminarea benzilor în caje finisoare cu accelerare. Prin mărirea vitezei de laminare se produce încălzirea benzii și egalizarea temperaturii acesteia pe întreaga lungime, fiind posibilă laminarea la cald a benzilor subțiri.

În deceniul opt au apărut noi laminoare la cald pentru benzi late, laminoare din *generația a treia*, la început în Japonia, apoi în țările UE (Italia, Germania, Franța). Pe aceste laminoare se laminează benzi cu grosimi de la 0.8...1,2 mm până la 16...27 mm și cu lățimi de 2 000...2 400 mm. Deocamdată nu s-a construit, în totalitate, nici un laminor de a treia generație. La laminoarele

existente grupurile degrositoare se compun din patru sau cinci caje, iar cele finisoare din șapte caje. Mărirea grupului finisor până la opt sau nouă caje nu este întotdeauna indicată, benzile cu grosimea de 0,8 mm putând fi laminate din sleburi relativ ușoare pe laminoarele existente cu grupuri finisoare cu șapte caje, fapt confirmat de experiența Japoniei. Grosimea minimă a benzilor indicată să se lamineze pe laminoarele pentru benzi late este de 1,2 mm întrucât nu necesită mărirea grupului finisor până la opt-nouă caje, iar productivitatea va crește.

La crearea noilor laminoare la cald de benzi late din *generația a patra*, cele mai importante lucrări de construcție s-au concentrat asupra principalelor subansambluri ale laminoarelor care răspund cerințelor privind simplitatea funcționării, siguranța maximă, rapiditatea și simplitatea înlocuirii lor.

Construcția modernă a cajei finisoare a laminorului la cald de benzi late din aliaje neferoase include următoarele sisteme: instalație combinată de susținere a cilindrilor de sprijin și de lucru care asigură o formă simplă a cuzineților cilindrilor de sprijin superiori, permițând înlocuirea ușoară a cilindrilor; sistem fix de schimbare a cilindrilor care dă posibilitatea ca în cazul înlocuirii acestora să nu se decupleze furtunurile de alimentare cu ulei; sistem hidraulic de centrare a cilindrilor; sistem mecanic auxiliar pentru compensarea modificării diametrelor cilindrilor; dispozitiv de înlocuire a cilindrilor; dispozitiv pentru răcirea cilindrilor și a benzii; sistem automatizat de comandă a operațiilor tehnologice de așezare și scoatere a sleburilor din cuptoare, de încălzire a sleburilor în cuptoare, de reglare a laminorului, de reglare a grosimii benzilor laminate, de răcire reglabilă a benzilor laminate, de înfășurare a benzilor în ruloare etc.

În ceea ce privește evoluția laminoarelor continue pentru *benzi late la rece* din aliaje neferoase speciale se precizează că în SUA se constată tendința lărgirii sortimentului de table și benzi laminate, în sensul creșterii lățimii acestora și micșorării concomitente a grosimii, în țările UE se manifestă aceeași tendință de creștere a lățimii și de scădere a grosimii, dar într-o măsură mai mică decât în SUA, în timp ce în Japonia nu se constată această tendință.

Pentru laminarea la rece a tablelor și benzilor în Japonia se utilizează laminoare relativ înguste, cu lungimea tăbliei cilindrilor de până la 1750 mm. În Germania și în alte țări ale UE, paralel cu laminoarele continue sunt răspândite laminoarele cuarto reversibile cu o singură cajă montate, de obicei, în combinație cu laminoare reversibile pentru laminarea la cald.

Productivitatea medie a unui laminor la rece japonez este de 1350 mii t/an a unui laminor vest-european este de 1000 mii t/an, iar a unui laminor american este de 650 mii t/an. Productivitatea mare a laminoarelor la rece japoneze este în mare măsură urmare a încărcării lor excesive, circa 90 %. Trebuie amintite o serie de soluții tehnice avansate aplicate la unele laminoare japoneze care influențează creșterea productivității acestora, ca de exemplu, creșterea masei rulourilor laminate, instalarea în fața laminorului a două instalații de decapare-spălare, aplicarea laminării fără sfârșit etc.

În ultimii ani, la laminoarele de benzi la rece din aliaje neferoase speciale

s-a extins utilizarea cajelor pretensionate cu rigiditate reglabilă și dispozitive hidraulice pentru reglarea deschiderii dintre cilindrii. În comparație cu dispozitivele de reglare electromecanice, cele hidraulice cu servoreglare sunt foarte rapide și au precizie mare.

Comanda noilor laminoare este *automatizată* aproape total, inclusiv comanda mecanismelor de introducere a rulourilor în laminor, centrarea rulourilor pe axul laminorului, îndepărtarea de rulou a benzii rulate, îndoirea capătului anterior al benzii din rulou, introducerea capătului anterior al benzii în laminor și ghidarea lui pe laminor până la rulo, potrivirea capătului anterior pe tamburul rulo, îndepărtarea rulo de pe rulo etc. Sunt automatizate, de asemenea, comanda reglării laminorului și a procesului de laminare, reglarea grosimii benzii atât la viteză constantă de laminare, cât și la viteză variabilă, în cazul pornirii sau opririi laminorului. Vitezele de laminare utilizate depășesc 2000 m/min, iar rulourile pot ajunge la mase de peste 10 000 kg.

La fel ca și în cazul instalațiilor de laminare, un progres mare se remarcă în sfera *utilajelor auxiliare* ale laminoarelor pentru laminarea aliajelor neferoase speciale: linii de finisare, instalații de dresare și strecherizare, instalații de prelucrare mecanică a suprafețelor benzilor (periere, netezire, etalonare) sau de prelucrare chimică (lăcuire, oxidare anodică sau eloxare).

Un capitol separat îl constituie instalațiile și tehnologiile de *tratament termic* al tablelor și benzilor din aliaje neferoase speciale. Din ce în ce mai frecvent se utilizează sistemele continue pentru recoacerea, omogenizarea sau chiar punerea în soluție și precipitarea benzilor din aceste aliaje. La aceste tehnologii sunt utilizate cuptoare cu atmosferă de protecție și cuptoare cu posibilități de programare a proceselor de tratament termic (controlul vitezei de încălzire și de răcire a încărcăturii), acordându-se o deosebită importanță calității suprafeței tablelor și benzilor.

11.3. RECOACEREA DE OMOGENIZARE ȘI ÎNCĂLZIREA PENTRU LAMINARE

La turnarea și solidificarea lingourilor din aliaje neferoase speciale, datorită complexității compoziției acestora, se formează un număr mare de compuși intermetalici, în care caz componentele și adăsurile speciale de aliere se combină nu numai cu metalul de bază al aliajului respectiv ci și între ele.

Vitezele mari de cristalizare la turnarea continuă și semicontinuă conduc la dezvoltarea segregățiilor intercrystaline, adică la o puternică *eterogenitate* structurală și chimică a lingourilor turnate din aceste aliaje. Structura lingourilor este alcătuită din dendrite ale căror axe cresc primele în timpul cristalizării și conțin relativ puține componente de aliere, în timp ce spațiile dintre axe sunt considerabil îmbogățite cu acestea. Se formează astfel o rețea formată din compuși fragili care determină scăderea drastică a plasticității lingourilor și creșterea rezistenței la deformare.

Recoacerea de omogenizare se execută pentru micșorarea eterogenității structurale și chimice și pentru anularea tensiunilor termice remanente care iau

naștere în timpul turnării continue sau semicontinue a lingourilor, cu răcire bruscă. În urma recoacerii de omogenizare are loc creșterea considerabilă a plasticității lingourilor, devenind astfel apte pentru prelucrarea prin laminare la cald. Tehnologia tratamentului termic de recoacere de omogenizare constă în încălzirea lingourilor la temperaturi mai mici cu 20...40 °C decât temperatura de topire a eutecticelor ușor fuzibile ale aliajului respectiv și menținerea la aceste temperaturi timp de câteva ore. În timpul încălzirii componentele solubile trec în soluția solidă și, ca rezultat al difuziei, are loc egalizarea concentrației componentelor de aliere la limitele de grăunte. Componentele cu solubilitate mică în soluția solidă rămân în principal între ramurile dendritelor, însă acestea au tendința de sferoidizare și aglomerare în particule de dimensiuni mai mari, cu pierderea structurii aciculare.

În timpul răcirii care urmează, soluția solidă se descompune, însă compușii chimici se separă finisați și uniform distribuiți în toată masa aliajului, iar la următoarea încălzire acești compuși se dizolvă ușor.

Se supun tratamentului de recoacere de omogenizare atât aliajele neferoase grele, care au plasticitatea mică și intervalul îngust al temperaturilor de laminare cum sunt, de exemplu, bronzurile cu staniu, cât și aliajele neferoase ușoare, greu deformabile, cum sunt, de exemplu, aliajele speciale de aluminiu de înaltă rezistență mecanică. Astfel, bronzurile cu staniu se omogenizează prin încălzire la 750...780 °C și menținere timp de circa 6 h, urmată de răcire lentă cu cuptorul. Aliajele speciale de aluminiu de tip dural (2014, 2017, 2024) se mențin pentru omogenizare la temperatura de 480...510 °C timp de 4...12 h, iar cele de tip zical (7075, 7079) la temperatura de 445...470 °C timp de 8...24 h. Lingourile de aluminiu pentru fabricarea foliilor (care se laminează din eboșe cu grosimea de 0,7 mm până la grosimea de 0,006 mm fără recoaceri intermediare) se supun recoacerii de omogenizare la temperatura de 560 °C timp de 24 h.

În cazul aliajelor neferoase cu plasticitate medie sau mare și cu rezistență la deformare medie sau mică, recoacerea de omogenizare se combină cu încălzirea pentru laminarea la cald. În acest caz înainte de scoaterea lingourilor din cuptoare este necesar să se micșoreze temperatura, deoarece temperatura maximă la care se poate efectua laminarea se stabilește în funcție de structura lingoului (slebului). Eutecticele complexe ușor fuzibile prezente în aceste aliaje condiționează laminarea la temperaturi mai joase pentru evitarea apariției defectelor de laminare (crăpături la cald). Pentru aliajele neferoase foarte plastice, la care această delimitare lipsește, se admit temperaturi mai înalte.

Dacă se va ține seama de cele prezentate, încălzirea lingourilor în vederea laminării trebuie efectuată *la temperaturi maxime*, la care aliajul posedă cea mai mare plasticitate. *Limita inferioară* a acestor temperaturi este condiționată prin aceea că plasticitatea slebului turnat scade rapid odată cu micșorarea temperaturii de laminare. Temperaturile joase sunt neadmisibile, mai ales la primele treceri, când lingoul are structura încă nedeformată. În procesul de laminare scăderea temperaturii nu provoacă defecte deoarece structura aliajului a devenit deformată.

Condițiile de temperatură și viteză a laminării la cald determină structura

eboșei laminate, adică dimensiunea și orientarea grăunților, ceea ce, la rândul său influențează proprietățile de plasticitate și rezistență la deformare ale eboșei după recoacere. Pentru obținerea stabilității acestor proprietăți este foarte necesar să se mențină laminarea în limitele temperaturilor admisibile.

În tabelul 11.1 se prezintă intervalele de temperaturi de laminare la cald a unor aliaje neferoase speciale. Temperaturile de încălzire ale lingourilor indicate între paranteze apar, din punctul de vedere al plasticității, admisibile, însă atingerea acestor temperaturi nu este de dorit, întrucât cresc mult pierderile de metal prin oxidare. Căderile de temperaturi de laminare sub temperaturile de sfârșit de laminare, specificate în paranteze în coloana din dreapta a aceluiași tabel, provoacă ecrusarea bruscă și înrăutățirea calității produsului laminat.

Tabelul 11.1

Intervalele de temperaturi de laminare la cald a unor aliaje neferoase

| Denumirea și marca aliajelor | Temperatura de încălzire a lingourilor pentru laminare, [°C] | Temperatura de sfârșit de laminare, [°C] |
|------------------------------|--|--|
| Aliaje Cu-Zn: | | |
| CuZn10; CuZn15 | 850...870 (900) | 700 (650) |
| CuZn20 | 830...850 (870) | 700 (650) |
| CuZn30; CuZn40Pb1 | 820...840 (860) | 750 (700) |
| Aliaje Cu-Sn; Cu-Al: | | |
| CuSn5 | 680...700 (720) | 550 (500) |
| CuAl5 | 840...860 (870) | 650 (600) |
| CuAl8 | 820...840 (850) | 650 (600) |
| Aliaje de nichel: | 980...1030 (1050) | 900 (850) |
| Aliaje de aluminiu: | | |
| 2014; 2017; 2024 | 400...445 | 315 |
| 3003; 3005 | 400...500 | 150 |
| 6061; 6063 | 400...445 | 370 |
| 7075 | 400...440 | 315 |

O deosebită importanță asupra procesului de laminare la cald și asupra calității laminatului obținut o are *caracterul și compoziția atmosferei* din spațiul de lucru al cuptorului. În funcție de compoziția aliajului și de caracterul atmosferei, în timpul încălzirii pot să se producă, mai mult sau mai puțin, *oxidarea* uniformă sau selectivă a aliajului, *reducerea oxizilor* care se află în aliaj provocând “boala de hidrogen” sau *sublimarea* (evaporarea) uniformă sau selectivă a unor elemente chimice din aliaj. Oxidarea și evaporarea uniformă duc la creșterea pierderilor de metal, de multe ori nerecuperabile, însă influența lor asupra calității laminatului este relativ mică. Reducerea, oxidarea și evaporarea selectivă duc la apariția diferitelor defecte de suprafață, iar ultimele două fenomene modifică, în afară de aceasta, compoziția chimică a stratului de suprafață a lingoului destinat laminării.

Pe lângă caracterul atmosferei din cuptor (reducătoare, neutră, oxidantă) într-o serie de cazuri exercită influență mare *compoziția* atmosferei. Oxidul de carbon, hidrogenul și hidrocarburile pot să fie cauza “bolii de hidrogen”. În practică este foarte posibil să apară, în combustibilul folosit la încălzirea cuptoarelor, a adaosului de sulf și a compușilor sulfuroși. În acest caz, la încălzirea aliajelor cupru-nichel sau a nichelului, sulfurul difuzează în straturile superficiale ale lingoului și formează sulfura de nichel care determină apariția crăpăturilor și a pojghițelor în timpul laminării la cald.

Gradele de evaporare, de oxidare și de difuzie a oxigenului, hidrogenului, sulfurului și a altor gaze în aliajele neferoase speciale sunt determinate nu numai de temperatură ci și de *durata* încălzirii. La scurtarea bruscă a timpului de încălzire fenomenele enumerate se constată într-un grad considerabil mai mic; urmările lor se îndepărtează complet prin frezarea laminatului.

Scurtarea timpului de încălzire nu trebuie să excludă *uniformitatea* încălzirii. Încălzirea neuniformă și laminarea ce îi urmează conduc la ecrusarea neuniformă a laminatului, la neomogenitatea structurii și la înrăutățirea proprietăților fizico-mecanice. Pentru egalizarea temperaturii lingoului, în unele cazuri cum sunt bronzurile cu aluminiu, alamele cu plumb și alamele cu mangan, se efectuează mențineri cu timpi mai mari (așa-numitele temperări) ale aliajelor în cuptor. La construcțiile moderne de cuptoare uniformitatea încălzirii se obține prin încălzirea directă a fiecărui lingou separat, fără a fi așezat în pachet. Arzătoarele asigură, în acest mod, arderea completă și intensivă a gazului, cu flacăra practic uniform distribuită pe toată suprafața lingoului.

Lingourile destinate laminării din aliaje neferoase din producția de masă se încălzesc în cuptoare de înaltă productivitate și anume în cuptoare continue cu împingător, de tip carusel și cu vatră pășitoare, iar lingourile din aliaje neferoase speciale, având regimuri foarte diferențiate de încălzire, se încălzesc în cuptoare tip cameră. Pentru încălzirea cuptoarelor continue, cu temperaturi de regim de 750...1200°C se folosește gazul (natural sau de generator) și combustibilul lichid (păcura). Pentru arderea gazelor în cuptoare se instalează arzătoare cu injecție care posedă o serie de avantaje (ardere totală a gazelor, menținerea automată a coeficientului de exces de aer, lipsa ventilatorului etc.).

În cazul aliajelor speciale recoacerea de omogenizare și încălzirea pentru laminare a lingourilor se face în cuptoare electrice cu rezistență, sub atmosferă de protecție, sau prin inducție, cu curenți de frecvență industrială.

Încălzirea prin inducție a lingourilor din aliaje neferoase speciale, cu curenți de frecvență industrială, are mai multe avantaje, cum sunt: scurtarea timpului de încălzire de 4...10 ori și, în mod corespunzător, micșorarea gradului de oxidare, ardere și volatilizare a aliajelor; simplitatea și precizia reglării încălzirii lingourilor de diferite aliaje speciale cu mari posibilități de automatizare; lipsa pierderilor de timp și a energiei pentru preîncălzire; simplitatea trecerii de la o dimensiune la alta a lingourilor prin înlocuirea inductorilor; micșorarea spațiilor de producție. Utilizarea acestei metode este limitată de valori mari ale puterii instalate și de consumuri mari de energie electrică.

11.4. PARAMETRII TEHNOLOGICI AI PROCESULUI DE LAMINARE A ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE

Laminarea la cald a aliajelor neferoase speciale este determinată, în mare parte, de complexitatea compoziției lor fazice. La solidificarea acestor aliaje se formează un mare număr de compuși intermetalici, duri și fragili, care se topesc la temperaturi relativ joase, deteriorând omogenitatea lingoului. Prin complexitatea compoziției fazice a aliajelor neferoase speciale destinate laminării se explică *particularitățile* de pregătire a lingourilor și de prelucrare prin laminare la cald, proprii acestor aliaje, care sunt prezentate în continuare.

Recoacerea de omogenizare a lingourilor este necesară, așa cum s-a arătat anterior, pentru anularea tensiunilor care au luat naștere în timpul turnării și pentru îndepărtarea segregăției intercrystaline care apare la solidificare.

Următoarea etapă de pregătire constă în *frezarea suprafeței lingourilor* pentru îndepărtarea peliculei de licuație care se dezvoltă în timpul solidificării, în urma prezenței în compoziția acestor aliaje a fazelor ușor fuzibile și a eutecticelor. În cazul anumitor aliaje neferoase speciale, cum sunt, de exemplu, aliajele de aluminiu de înaltă rezistență mecanică, este necesar să se execute *placarea lingourilor* înaintea laminării la cald cu aluminiu tehnic pur deoarece compoziția fazică complexă a acestor aliaje creează o mare cantitate de microelemente galvanice. Sub acțiunea mediilor agresive (umiditate, atmosferă marină) începe coroziunea, urmată de o bruscă scădere a rezistenței mecanice, iar aluminiul, ca material de placare, are rol de protecție împotriva acțiunii de corodare, dar și rol tehnologic în procesul de laminare la cald.

O altă particularitate a pregătirii și prelucrării prin laminare la cald a acestor aliaje constă în *necesitatea unui control strict al temperaturii* din timpul încălzirii ca urmare a sensibilității mari la supraîncălzire. Supraîncălzirea provoacă un început de topire a eutecticelor ușor fuzibile dispuse la limitele de grăunți, fapt urmat de crăpături la cald și de scăderea bruscă a proprietăților mecanice ale produselor laminate. De asemenea, înainte de laminarea la rece se efectuează *recoacerea urmată de răcire foarte lentă* care este necesară creșterii fazelor dure și disperse, care precipită în totalitatea lor în timpul prelucrării la cald și care provoacă călirea parțială.

Din cele prezentate se constată că procesul tehnologic de fabricație a produselor laminate din aliaje neferoase speciale constă din operațiile de laminare, la cald sau la rece și din alte operații, din care fac parte prelucrarea mecanică a suprafeței lingoului (frezare, rabotare, strunjire, șabăruire etc.), tratamentul termic (recoacerea, călirea, îmbătrânirea și altele), curățirea chimică, electrochimică, chimico-mecanică și mecanică a suprafețelor de oxizi și impurități (decapare, spălare, albire, mătuire), precum și tăierea, îndreptarea, îndoirea, roluirea și altele. În funcție de proprietățile fizico-mecanice și chimice ale aliajului care se laminează, de dimensiunile și de destinația produselor finite, de tipul și de puterea utilajului utilizat, unele operații se pot repeta de câteva ori, în timp ce altele, în afară de operația de laminare, pot să lipsească în totalitate.

Laminarea la cald a aliajelor neferoase speciale constă în obținerea benzilor laminate la cald cu grosimi de 2...8 mm, utilizate în continuare ca eboșe (semifabricate) pentru laminarea la rece, prin transformarea lingourilor turnate sau a eboșelor forjate, cu grosimi inițiale de 200...300 mm, în cazul aliajelor ușoare și cu grosimi inițiale de 150...200 mm, în cazul aliajelor grele.

Aliajele neferoase grele, utilizate în industrie pentru laminarea produselor plate se pot împărți în două grupe.

Din prima grupă fac parte aliajele care prezintă interval larg de temperaturi de laminare și au plasticitate bună în timpul laminării la cald. În această categorie intră majoritatea aliajelor pe bază de cupru cum sunt alamele α binare cu conținuturi limitate de elemente dăunătoare (Bi, Pb etc.), alamele $\alpha+\beta$ și o serie de alame și bronzuri speciale, aliajele pe bază de nichel și aliajele cupru-nichel. Din aceeași grupă fac parte metalele care au temperatura de recristalizare apropiată de temperatura camerei sau chiar mai coborâtă, care se pot lamina fără încălzire prealabilă și nu se ecrusează; un astfel de fenomen are loc la laminarea plumbului, a plumbului placat cu staniu etc.

Din grupa a doua face parte un număr mai mic de aliaje care nu prezintă plasticitate suficientă la încălzire, necesară procesului de laminare la cald și se laminează la rece. Astfel, din această categorie fac parte alamele α impurificate cu elemente dăunătoare, în special cu plumb, bronzurile fosforoase și bronzurile cu plumb și zinc.

Aliajele neferoase ușoare nedurificabile prin tratament termic, cum sunt aliajele Al-Mn, Al-Mg sau Al-Mg-Mn, au rezistența mecanică medie sau mică, au deformabilitatea bună la laminare și, de obicei, nu are loc crăparea marginilor în timpul laminării și nu se formează crăpături de suprafață chiar la grade de reducere de până la 60 %.

În cazul aliajelor neferoase de înaltă rezistență mecanică, durificabile prin tratamente termice, cum sunt, de exemplu, aliajele de aluminiu de tip Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Cu sau Al-Mg-Si, mărimea reducerii la laminare este limitată, pe de o parte, prin fenomenul de formare a crăpăturilor și, pe de altă parte, prin efecte energetice determinate, la rândul lor, de rezistența cajei și de momentul dezvoltat de motorul de acționare. Efectul primului factor este amplificat în perioada incipientă a laminării, iar al celui de-al doilea, în decursul întregului ciclu de laminare.

Gama de operații la laminarea la cald se întocmește astfel încât să fie folosită la maximum puterea motorului laminorului (la încărcarea motorului în primele trei treceri și la totala presiune a metalului pe cilindrii la ultimele treceri) și plasticitatea aliajului. La primele treceri când aliajul este încălzit la temperatura maximă, încărcarea motorului, de regulă, nu este mare și mărimea reducerii este limitată de unghiul de prindere și de plasticitatea aliajului. Unghiul de prindere este mărit artificial datorită șlefuirii grosolane a cilindrilor și a prezenței muchiilor teșite la capătul anterior al lingoului.

Laminarea cu reduceri maxime, în limitele puterii motorului de acționare și a rezistenței cajei, conduce nu numai a creșterea productivității și a altor

indici tehnico-economici ai laminorului, ci și la folosirea deplină a proprietăților tehnologice ale aliajului laminat. Cu cât sunt mai puține treceri și durata de laminare este mai mică, cu atât este mai mic gradul de răcire a semifabricatului laminat, avându-se în vedere și efectul termic al deformării plastice și cu atât este mai îngust intervalul de temperaturi în care are loc laminarea. Deosebit de importantă este micșorarea intervalului de temperaturi în care se desfășoară laminarea, deoarece majoritatea aliajelor neferoase au intervalul de plasticitate limitat. Scăderea temperaturii sub limita inferioară a intervalului de plasticitate duce la formarea crăpăturilor, la neomogenitatea structurii și la scăderea proprietăților fizico-mecanice ale produselor laminate.

În ceea ce privește viteza de laminare, se precizează că în primele treceri nu se recomandă a se folosi viteze de laminare peste 1,0...1,2 m/s, mai ales la reduceri mari, deoarece din cauza aderenței intense o mare parte a suprafeței exterioare a benzii laminate se poate acoperii cu crăpături.

În continuare, mărimea reducerii la laminare se limitează numai în funcție de mărimea unghiului de prindere și de mărimea forțelor care iau naștere în timpul laminării. De aceea reducerile pe treceri se distribuie, de obicei, astfel ca la începutul laminării acestea să aibă valori de circa 8...10 %, apoi se măresc pe măsura finisării structurii și creșterii plasticității semifabricatului, ajungându-se la reduceri de 45 % sau chiar mai mult.

Prin laminarea degrositoare la cald se obțin semifabricate (eboșe) pentru laminarea în continuare la rece sau pentru laminarea la cald continuă. În primul caz tehnologia obișnuită constă în laminarea benzilor la cald la grosimi de 6 mm, tăierea marginilor și a capetelor și înfășurarea în rulou. În al doilea caz, când eboșul este laminat pe laminorul continuu, laminarea la cald pe laminorul degrositor se termină la grosimi de 15...25 mm, în funcție de numărul cajelor din grupul continuu, iar după laminorul continuu se obține eboșul de circa 3 mm.

În cazul laminatelor din aliaje neferoase speciale cu grosimi de circa 0,4...0,5 mm, fiind necesar să se obțină o calitate superioară a suprafeței acestora, mai ales în cazul acelor aliaje speciale care au tendința de a se satura cu gaze și de a forma pelicule de oxidare, se execută frezarea laminatului după laminarea la cald sau la rece. Grosimea laminatului înainte de frezare este de 9...15 mm, iar grosimea stratului frezat este de 0,25...0,40 mm de pe fiecare parte a laminatului. După frezare, defectele minore dispartate se pot îndepărta la controlul benzilor cu șabărul manual sau cu mașini pneumatice sau electrice.

După laminarea la cald sau laminarea degrositoare la rece, laminatul trece mai departe la laminarea pregătitoare, intermediară și finisoare. Într-o serie de cazuri etapele pregătitoare și intermediară pentru dimensiuni mai subțiri apar în același timp ca etape intermediare și finisoare pentru grosimi mai mari de semifabricate.

Laminarele moderne pentru aliaje neferoase prelucrează benzi cu lățimi de circa 650...1200 mm și cu greutatea de la 600...1000 kg până la 6000...8000 kg, cu reduceri mari pe treceri. Eboșele mari, cu greutatea de până la 6...8 t se obțin prin sudarea cap la cap a laminatelor eboșe în formă de bandă.