

LAMINAREA MATERIALELOR METALICE SPECIALE

Partea a II-a:

BAZELE LAMINĂRII UNOR OȚELURI ALIATE CU DESTINAȚII SPECIALE

Capitolul 4	Laminarea oțelurilor pentru rulmenți.....	77
4.1	Caracteristici mecanice și structurale.....	78
4.2	Încălzirea semifabricatelor în vederea laminării.....	80
4.3	Parametrii tehnologici de laminare.....	84
Capitolul 5	Laminarea oțelurilor rapide.....	87
5.1	Caracteristici mecanice și structurale.....	89
5.2	Parametrii tehnologici de laminare.....	92
Capitolul 6	Laminarea oțelurilor inoxidabile.....	95
6.1	Caracteristici mecanice și structurale.....	96
6.2	Comportarea la deformare plastică.....	101
6.3	Parametrii tehnologici de laminare.....	103
Capitolul 7	Laminarea oțelurilor pentru electrotehnică.....	108
Capitolul 8	Laminarea unor aliaje cu proprietăți magnetice și electrorezistive.....	112
8.1	Caracteristici structurale.....	112
8.2	Parametrii tehnologici de laminare.....	112

Partea a II-a: **BAZELE LAMINĂRII UNOR OȚELURI ALIATE CU DESTINAȚII SPECIALE**

Capitolul 4

LAMINAREA OȚELURILOR PENTRU RULMENȚI

Oțelurile pentru rulmenți se deosebesc de oțelurile aliate obișnuite de construcții printr-un conținut mai ridicat de carbon, acest conținut oscilând în jurul valorii de 1 % față de maximum 0,6...0,7 % în cazul oțelurilor aliate de construcții. Aceste oțeluri sunt hipereutectoide conținând pe lângă procentul de carbon de 0,95...1,05 % și un procent de crom de ordinul 1,3...1,65 %.

Pentru fabricarea rulmenților, cu excepția celor cu destinații speciale cum sunt cei pentru sapele de foraj sau cei care lucrează în medii corosive, se utilizează oțeluri pentru rulmenți conform STAS 1456/1-89 și oțeluri pentru rulmenți tratate în vid conform STAS 11250-89 (tabel 4.1).

Tabelul 4.1

Mărci de oțeluri pentru rulmenți standardizate

STAS 1456/1-89 11250*-89	Werkstoff No	DIN 17230	NF 35551 35565	AISI	BS 970	GOST 801
RUL 1	1.3505	100Cr6	100C6	52.100	535A99	SH15
RUL 2	1.3520	100CrMn6	100CM6	-	-	SH15G
RUL 3V	1.3536	100CrMo6	100CD7	-	-	-

*La oțelurile tratate în vid, pe lângă simbolul dat în standardul românesc se adaugă și litera V.

Compoziția chimică și abaterile admisibile, pe produsul laminat față de compoziția pe oțel lichid, pentru mărcile de oțeluri pentru rulmenți sunt prezentate în tabelul 4.2.

Tabelul 4.2

Compoziția chimică a oțelurilor pentru rulmenți

Oțel	Compoziția chimică [%]								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P	Ni	Cu
RUL 1V	0,95.. ...1,1 ± 0,02	0,2...0,45 + 0,05	0,17...0,37 + 0,03; - 0,02	1,3... ...1,65 + 0,05	max 0,08 + 0,01	max 0,02 +0,002	max 0,027 +0,002	max 0,30	max 0,25
RUL 2V		0,9...1,2 ± 0,05	0,4...0,65 + 0,03; - 0,02		max 0,08 ± 0,03				
RUL 3V		1,05...1,35 ± 0,05	0,17...0,37 + 0,03; - 0,02		0,45.... ...0,6 ± 0,03			Cu+Ni max 0,4	

Dezoxidarea oțelurilor de rulmenți nu se efectuează cu ferotitan pentru a nu se introduce titan în compoziția acestor oțeluri. De asemenea, nichelul nu este recomandat în aceste oțeluri, deoarece favorizează formarea austenitei reziduale, cu efecte nefavorabile pentru duritatea oțelului după călire, iar pentru asigurarea călibilității corespunzătoare conținutul în mangan și siliciu va fi în limite obișnuite.

4.1. CARACTERISTICI MECANICE ȘI STRUCTURALE

Rulmenților (bilelor, rolelor și inelelor) li se cer proprietăți ridicate de rezistență mecanică și rezistență mare la uzură și la oboseală, pentru a suporta sarcini variabile mari și foarte mari. Caracteristica de bază a oțelurilor de rulmenți este duritatea obținută după tratamentul termic de călire-revenire, această duritate având valori impuse de minimum 61 HRC (circa 740 HB), mărimea durității fiind influențată atât de temperatura de austenitizare cât și de temperatura de recoacere. În stare recoaptă, duritatea acestor oțeluri este de 170...217 HB. În general, din oțel Rul 1 se execută bile pentru rulmenți, iar din oțel Rul 2 se execută inele și role, deci oțelurile de rulmenți se deformează prin laminare sub formă de *bare și țevi* cu secțiunea rotundă.

În funcție de prelucrările ulterioare, oțelurile de rulmenți se livrează în opt *stări de livrare* care se prezintă în continuare. Astfel, oțelul pentru prelucrare în continuare prin deformare la cald (A) se livrează brut laminat (A₁) sau laminat, recopt și cojit (A₂); oțelul pentru prelucrare prin așchiere (B) se livrează laminat și recopt pentru globulizare (B₁), laminat, recopt pentru globulizare și cojit (B₂) sau laminat, recopt pentru globulizare și tras (B₃), iar oțelul pentru deformare în continuare la rece (C) se livrează laminat, recopt pentru globulizare, cojit și netezit (C₁), laminat, recopt pentru globulizare, tras și cojit (C₂) sau laminat, recopt pentru globulizare și șlefuit (C₃). În funcție de aceste stări de livrare, duritatea maximă Brinell a oțelurilor de rulmenți se prezintă în tabelul 4.3.

Tabelul 4.3

Duritatea Brinell a oțelurilor de rulmenți

Starea de livrare	Duritatea Brinell, HB		
	RUL 1V	RUL 2V	RUL 3V
A ₁ ; A ₂ cu recoacere de înmuiere	250	250	250
B ₁ ; B ₂ ; B ₃ ; C ₁ ; C ₂ ; C ₃	207	217	229

Ca produse metalurgice obținute din oțeluri de rulmenți se disting profilurile rotunde laminate la cald cu diametre de 12...80 mm, barele trase la rece cu diametre de 6,5...50 mm, țevile laminate la cald cu diametre de 56...120 mm sau la rece cu diametre de 18...90 mm, precum și sârma trefilată cu diametre de 4,2...26 mm. În starea de călire și revenire joasă, oțelurile de rulmenți sunt caracterizate prin proprietăți ridicate de rezistență (duritate, limită de elasticitate, rezistență la rupere la tracțiune, compresiune, încovoiere și oboseală) și tenacitate satisfăcătoare. După călire și revenire joasă, la durități de 60...65 HRC

oțelul tip Rul 1, de exemplu, are rezistența la rupere $R_m=2300\ldots2600$ MPa, limita tehnică de fluaj $R_{0,005} = 1100\ldots1150$ MPa și modulul de elasticitate $E = (2,1\ldots2,15) \cdot 10^5$ MPa.

Structura oțelurilor de rulmenți depinde de starea de livrare a laminatelor. Oțelurile Rul 1...Rul 3 laminate la cald, deci în stare recoaptă, au structura constituită din perlită globulară. În cazul aplicării tratamentului termic de normalizare structura obținută este de perlită lamelară, iar după călirea și revenirea produselor finite obținute din aceste oțeluri structura este constituită din martensită mai mult sau mai puțin stabilă, în funcție de condițiile de revenire obținându-se uneori și puțină austenită reziduală.

Avându-se în vedere elementele principale de aliere, oțelul clasic de rulmenți (Rul) poate fi considerat ca un aliaj ternar Fe-C-Cr, în care faza în exces o reprezintă carburile fierului și ale cromului, precum și carburile complexe de tipul $Fe_3C(Cr)$. Carburile complexe apar în oțeluri cu concentrații mari de crom sau în zonele segregate ale oțelurilor cu conținut mai mic de crom.

La încălzirea peste $900^\circ C$ oțelurile de tip Rul au structura austenitică și, cu cât temperatura este mai ridicată, cu atât carburile se dizolvă mai intens în masa de austenită. În timpul laminării la cald, ca urmare a răcirii laminatului, o cantitate tot mai mare de carburi precipită din soluția solidă, alungindu-se pe direcția de laminare și formând structuri în benzi, care sunt nedorite întrucât acestea reduc rezistența mecanică și rezistența la uzură a acestor oțeluri. Precipitarea cea mai intensă se produce la temperaturi de $800\ldots900^\circ C$, acest interval corespunzând temperaturilor de sfârșit de laminare.

Alte aspecte structurale privind oțelurile de rulmenți precizează că microporozitatea maximă admisă la laminate cu diametre sub 80 mm trebuie să corespundă punctajului zero, iar incluziunile nemetalice admise trebuie să aibă punctajul mediu cuprins între 1,5...2,5 pentru sulfuri, oxizi și silicați fragili în șiruri și între 1,5...2,0 pentru silicați plastici și oxizi sau silicați nedeformabili. De asemenea, la oțelurile de rulmenți adâncimea maximă a stratului decarburat variază în funcție de diametrul produsului laminat, de la adâncimea de 0,25 mm pentru laminate cu diametre sub 15 mm, la adâncimea de 1,5 mm pentru laminate cu diametre de 151...200 mm.

Rezistența la deformare a oțelurilor de rulmenți scade foarte repede în intervalul de temperaturi $20\ldots500^\circ C$. Astfel, dacă la temperatura ambiantă oțelul Rul are rezistența la rupere de peste 2,5 ori mai mare decât a oțelurilor nealiat de construcții, la temperatura de $500^\circ C$ aceasta scade de circa 5 ori și este de același ordin de mărime cu rezistența oțelurilor nealiat. În diagramele din figura 4.1 se reprezintă comparativ variația rezistenței la deformare a unui oțel de rulmenți, cu a unui oțel nealiat, în funcție de temperatură, iar în cele din figura 4.2 se reprezintă rezistența la deformare a unui oțel de rulmenți comparativ cu cea a unui oțel nealiat, în funcție de reducerea relativă aplicată.

Plasticitatea oțelurilor de rulmenți este mare la cald, în intervalul de temperaturi de $900\ldots1200^\circ C$, permițând reduceri prin laminare de până la 75 %. Deci, în condiții industriale, oțelurile pentru rulmenți încălzite normal se laminează fără dificultăți, putându-se aplica reduceri mari.

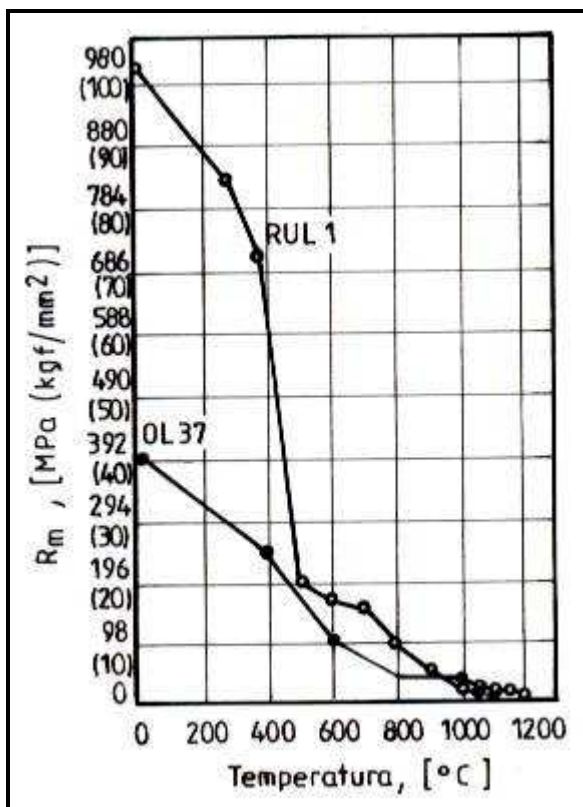


Fig.4.1. Diagramme de variație ale rezistenței la deformare ale unui oțel de rulmenți și unui oțel nealiat în funcție de temperatură.

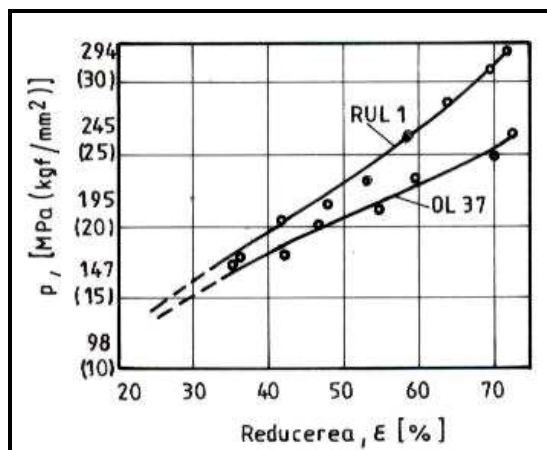


Fig. 4.2. Variația rezistenței la deformare a unui oțel de rulmenți comparativ cu a unui oțel nealiat în funcție de reducerea relativă:
H=37 mm = ct.; t=900 °C

O altă caracteristică esențială impusă oțelurilor de rulmenți este aceea de a-și păstra în exploatare dimensiunile constante, respectiv de a prezenta stabilitatea dimensională ridicată. Stabilitatea dimensională este alterată de variațiile de contracție și de dilatare care apar în cazul în care martensita, nerevenită suficient, dar și austenita reziduală, evoluează lent la temperatura ambiantă spre starea mai stabilă.

4.2. ÎNCĂLZIREA SEMIFABRICATELOR ÎN VEDEREA LAMINĂRII

Oțelurile de rulmenți destinate procesării în bare, țevi sau sârme, din care se vor realiza inelele și elementele de rulare ale rulmenților, sunt oțeluri aliate cu crom și sunt elaborate și turnate cu grijă deosebită, pentru realizarea unui grad înalt de puritate. Lingourile folosite pentru laminare sunt invers conice, având maselota cu greutate relativ mică (180...2500 kg).

Înainte de laminare, lingourile din oțeluri de rulmenți se supun unor operații pregătitoare și anume unor operații de curățire prin frezare sau prin alte procedee. Cojirea lingourilor se face prin frezare chiar și la cald – procedeu conceput inițial de firma Innocenti – în care caz nu mai este necesară recoacerea de înmuiere pentru îmbunătățirea prelucrării prin așchiere a oțelului. De asemenea, prin cojire la cald productivitatea operației este mai ridicată, consumul de energie este mai redus cu 7...10 % și pierderile de oțel sunt mici.

Cojirea poate fi substituită prin operația de *flamare* care, pe mașini moderne de flamare, poate realiza curățirea totală, prin arderea unui strat de 3...10 mm la lingouri de min.2,5 t în numai 5...6 minute. Pentru evitarea unor fenomene, cum sunt călirea superficială și apariția de fisuri ca urmare a unor modificări structurale, flamarea totală a lingourilor se va efectua înainte ca prin răcire temperatura să coboare sub 300...400 °C. Temperatura la care se execută operația depinde de valoarea coeficientului C_x numit echivalentul de carbon al compoziției oțelului.

Pentru oțeluri de tip Rul (STAS 1456/1-89) coeficientul C_x se determină cu relația:

$$C_x = (\%C) + 0,4 (\%Cr) + 0,3 (\%Si + \%Mo) + 0,16 (\%Mn) \quad (4.1)$$

și are valoarea $C_x = 1,748$ pentru oțelul Rul 1, $C_x = 1,939$ pentru oțelul Rul 2 și valoarea $C_x = 1,819$ pentru oțelul Rul 3. În funcție de aceste valori, temperatura la care se va executa flamarea completă a lingourilor din oțeluri de rulmenți va avea valori cuprinse în limitele 400...500 °C.

Dacă nu se efectuează cojirea sau flamarea completă a lingourilor, acestea se vor controla cu multă atenție pe toate fețele pentru a se descoperi și înlătura și cele mai mici defecte cum sunt fisurile și crăpăturile longitudinale sau transversale, stropi reci, sufluri, incluziuni nemetalice, etc.

Defectele de turnare se curăță cu dălți pneumatice, dacă nu au adâncimea mai mare de 5 mm de la suprafață. În cazul unor defecte mai adânci, lingourile respective se vor folosi pentru laminarea barelor de rulmenți. Operația de *dăltuire* se va efectua astfel încât prin rizurile pe care le realizează să nu se producă mascarea defectului. Pentru ca șanțurile obținute prin dăltuire să nu devină în continuare amorse de fisurare sau să nu producă suprapuneri de laminare, se recomandă ca raportul dintre adâncimea și lățimea acestora să fie de minimum 1 : 6 și aceste șanțuri să prezinte pante foarte line. În cazul curățirii defectelor de pe semifabricate de dimensiuni mici, care pot fi blumuri sau țagle, se utilizează și operația de *polizare*, mai ales dacă defectele sunt pe suprafețe mai mari. Direcția de polizare va fi perpendiculară pe direcția defectului cu scopul de a se evita ascunderea defectului printre rizurile de polizare.

Operația de cojire se recomandă a fi aplicată atunci când defectele sunt mai adânci și sunt răspândite practic pe toată suprafața semifabricatului. Prin cojire se înlătură un strat cu grosimea de 5...15 mm, ceea ce conduce la pierderi de oțel de până la 18...20 %.

Încălzirea semifabricatelor din oțeluri de rulmenți pentru laminare este o operație foarte importantă a procesului tehnologic, deoarece încălzirea incorectă va înrăutăți mult calitatea structurală a laminatelor. Unul dintre cei mai importanți parametri ai procesului de încălzire a semifabricatelor din aceste oțeluri îl reprezintă *temperatura* de încălzire care, împreună cu *timpul* de încălzire, influențează considerabil nivelul licuației carburilor. Astfel, cu cât durata de încălzire este mai mare, la temperaturi de peste 1000 °C, cu atât punctajul care caracterizează existența în oțel a carburilor libere va fi mai scăzut.

De asemenea, temperaturile mari de încălzire a oțelurilor de rulmenți pot influența calitatea laminatelor atât pozitiv, prin reducerea neomogenității carburilor, cât și negativ, prin creșterea granulației oțelului. Odată cu creșterea temperaturii de încălzire, carburile se dizolvă favorizând creșterea granulației laminatului. Creșterea deosebit de energică a grăunților începe la temperaturi de peste 1000 °C, iar la temperaturi de 1150...1180 °C se constată supraîncălzirea oțelului de rulmenți, conducând la creșterea grăunților, la scăderea rezistenței limitelor grăunților și la apariția discontinuităților (rupturilor) pe aceste limite. Oțelul supraîncălzit este inutilizabil pentru executarea rulmenților.

Temperatura ridicată de încălzire, dar și durata mare de încălzire, accentuează și procesul de *decarburare* a oțelului. Pentru combaterea decarburării oțelurilor de rulmenți, temperatura de încălzire a semifabricatelor, în special a celor care urmează în final să fie supuse trefilării, nu trebuie să depășească 1100 °C, iar durata de încălzire va fi cea minimum necesară.

Micșorarea temperaturii de încălzire a semifabricatelor influențează favorabil și structura oțelului obținută după laminare, ca urmare a temperaturii mai scăzute la care se sfârșește laminarea.

Având în vedere experiența îndelungată în practica laminării oțelurilor de rulmenți se recomandă ca, la scoaterea din cuptor pentru laminare, lingourile să aibă temperatura 1140...1160 °C, iar blumurile sau țagtele de 1060...1100°C.

Încălzirea semifabricatelor se face după diagrame și cu viteze de încălzire diferite, după cum acestea sunt reci sau calde, în special în *cazul lingourilor*. Dacă lingourile sunt reci încălzirea se face în două etape, cu viteze de încălzire diferite. Având în vedere plasticitatea redusă și tensiunile structurale ale oțelurilor de rulmenți la temperaturi sub 600 °C, precum și fenomenul de *fragilitate la albastru* din intervalul 250..500 °C sau variațiile de volum din domeniul temperaturilor la care se produc transformările structurale, care se suprapun tensiunilor termice generate de conductivitatea termică redusă, pot apare frecvent fisuri și crăpături de încălzire, dacă viteza de încălzire în intervalul de până la 700...800 °C nu este corespunzătoare. Pe măsură ce crește temperatura, apropiindu-se de 700...800°C, valoarea coeficientului de conductivitate termică se apropie de cea a oțelurilor nealiate și, începând din acest moment, gradientul de temperatură pe secțiune este mai redus, iar plasticitatea oțelului, fiind suficient de mare, încălzirea se poate continua cu viteză mult mai mare – etapa a doua de încălzire – până la limita maximă asigurată de cuptor.

În domeniul temperaturilor înalte este necesară încălzirea rapidă nu numai în scopul măririi productivității cuptorului, ci și pentru reducerea la minimum a pierderilor de oțel prin oxidare și a adâncimii stratului decarburat. Având în vedere aceste considerente, pentru încălzirea oțelurilor de rulmenți se recomandă următoarele măsuri:

- dacă temperatura mediului ambiant este sub +10 °C, lingourile se vor depozita în hala cuptoarelor cu cel puțin două zile înainte de a fi încărcate în cuptoarele adânci de încălzire;

- lingourile din oțeluri de rulmenți se vor introduce în cuptor, pe cât este posibil, numai în stare caldă, la temperaturi de 750...800 °C, iar temperatura maximă a cuptorului adânc nu trebuie să depășească 900...1000 °C;

- atunci când nu se poate asigura încărcarea lingourilor în cuptor în stare caldă, acestea se vor supune necondiționat unui tratament termic de recoacere de detensionare, în special când lingourile au mase mari, de circa 2,5 t sau chiar mai mari;

- viteza medie de încălzire pentru oțelurile de rulmenți este de 50 °C / h în etapa de preîncălzire și de 150 °C / h în etapa de încălzire (peste 800...850 °C);

- timpul de menținere pentru egalizarea temperaturii pe secțiunea lingoului va fi de 1...3 h, în funcție de secțiunea lingoului.

În funcție de temperatura suprafeței lingoului, în cazul lingourilor cu mase mari și anume de circa 2,5...4,5 t, durata de încălzire din momentul introducerii în cuptorul adânc a acestora este prezentată în tabelul 4.4.

Tabelul 4.4

Durata încălzirii lingourilor în funcție de temperatura de încărcare în cuptoarele adânci

Temperatura lingoului, °C	800	700	600	500	20
Durata încălzirii, minute	250	290	350	400	1260

În cazul încălzirii blumurilor și țaglelor, deci a semifabricatelor din oțeluri de rulmenți cu structură de deformare la cald, prescripțiile sunt mai severe, ca urmare a neomogenității structurale mai reduse și a unor dimensiuni ale secțiunii mai reduse. Astfel de oțeluri cu conductivități termice relativ mici și coeficienți de dilatare mari, dar cu plasticitate bună la temperaturi relativ joase, cum este cazul oțelurilor de rulmenți, pot fi încălzite cu viteze mari fără a se observa modificări negative ale calității produselor laminate. Astfel, semifabricatele din oțeluri de rulmenți cu latura de 100...120 mm, introduse în cuptor direct la temperatura de 1200 °C se încălzesc până în centrul secțiunii, fără apariția unor defecte caracteristice încălzirii. Aceste semifabricate fiind încălzite, în general, în cuptoare cu propulsie, apare totuși o perioadă de preîncălzire în prima parte a cuptorului, unde temperatura incintei este oricum mai joasă, ca urmare a introducerii semifabricatelor relativ reci în cuptor și a faptului că ușa de încărcare este deschisă permanent.

În ceea ce privește temperatura de încălzire a blumurilor și a țaglelor, aceasta este cu circa 60...80 °C mai redusă ca cea recomandată pentru lingouri, ca urmare a plasticității mai mari a semifabricatelor cu structură de deformare decât a lingourilor, acestea din urmă având structură neomogenă de turnare. Rezultă deci că la scoaterea din cuptor blumurile și țaglele trebuie să aibă temperatura cuprinsă între 1060 și 1100 °C, pentru ca procesul de decarburare să fie cât mai redus. În cazul în care procesul de decarburare este frânat prin

diferite mijloace, cum sunt asigurarea unei atmosfere cu activitate redusă asupra carbonului din stratul superficial al semifabricatului sau aplicarea pe semifabricate a unor acoperiri speciale, se poate mări temperatura de încălzire până la 1170...1220 °C.

În ceea ce privește durata de încălzire a semifabricatelor din oțeluri de rulmenți, aceasta depinde în special de mărimea laturii blumului sau țaglei și variază de la 1,5 h la țagtele cu latura de 70...100 mm, la circa 5...6 h pentru blumuri cu latura de 300 mm. Din acest timp total de încălzire, circa 30...80 min vor fi afectate perioadei de egalizare la temperatura finală.

4.3. PARAMETRI TEHNOLOGICI DE LAMINARE

Conform celor prezentate, rezistența la deformare a oțelurilor de rulmenți depășește considerabil rezistența la deformare a oțelurilor nealiat, la temperatura ambiantă. Odată cu creșterea temperaturii, se micșorează diferența dintre cele două rezistențe, iar la 1000 °C și mai sus, rezistența la deformare a oțelurilor de rulmenți este cu foarte puțin mai mare decât cea a oțelurilor nealiat. În intervalul 1160...1180 °C, în cazul unor reduceri considerabile, de circa 135 mm pe trecere, rezistența la deformare a oțelurilor de rulmenți nu depășește 95 MPa.

Lățirea la laminarea oțelurilor de rulmenți este mai mare decât cea de la laminarea oțelurilor nealiat și cu procent scăzut de carbon. În figura 4.3 se

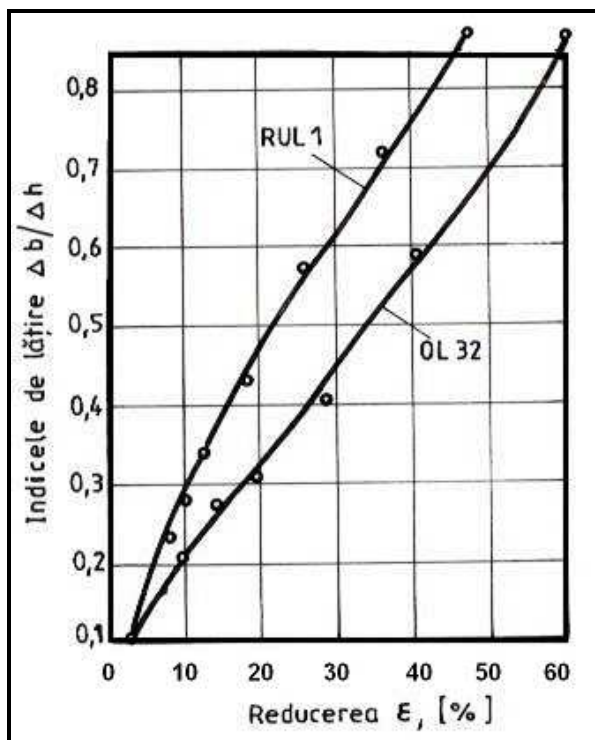


Fig.4.3. Indicii de lățire a unui oțel pentru rulmenți și a unui oțel nealiat în funcție de reducerea relativă aplicată la laminare:
H=36mm=ct; H/D=0,1; t=885 °C.

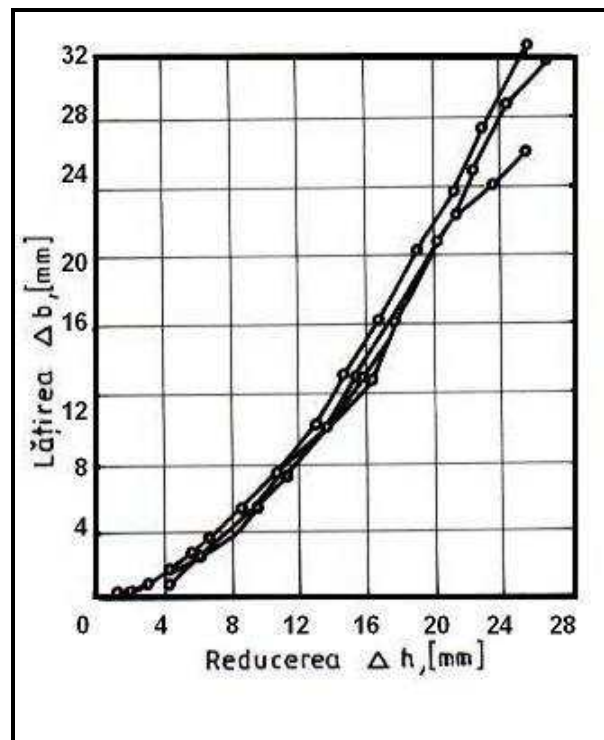
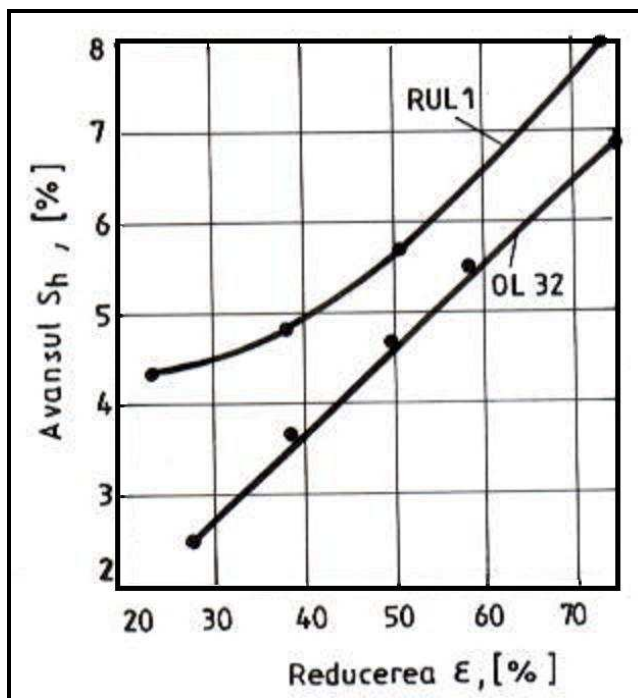


Fig.4.4. Lățirea la laminarea oțelurilor pentru rulmenți în funcție de temperatura la care se realizează deformarea:
t = 900...1200 °C

remarcă faptul că oțelurile de rulmenți se lătesc de 1,2 ori mai mult decât oțelurile nealiat și cu procent scăzut de carbon, iar în figura 4.4 se observă că nu există o diferență substanțială în ce privește lățirea oțelului pentru rulmenți în funcție de temperatura de laminare, în limitele de 900...1200 °C.

Avansul la laminarea oțelurilor de rulmenți este, de asemenea, mai mare decât cel de la laminarea oțelurilor nealiat și cu procent mic de carbon (fig.4.5).

Fig.4.5. Avansul la laminarea unui oțel de rulmenți și a unui oțel nealiat în condiții comparabile (viteza de laminare este de 1,1 m/s.



Laminarea blumurilor, a semifabricatelor și a produselor finite din oțeluri de rulmenți se desfășoară fără dificultăți, practic indiferent de masa lingourilor și de viteza de laminare, iar reducerile admisibile pe treceri pe treceri pot fi foarte ridicate, fără pericolul de a se introduce defecte de laminare. La laminarea blumurilor se pot aplica reduceri pe treceri de până la 120 mm, în funcție de posibilitățile prinderii, respectiv în funcție de diametrul calibrelor.

Laminarea profilurilor se desfășoară, de asemenea, fără dificultăți, atât pe laminoare liniare cât și pe laminoare continue, folosindu-se calibrări clasice romb - pătrat, pentru primele treceri degrosisoare, urmate de oval - pătrat până la ultima trecere, în cazul profilului rotund, cât și oval vertical - oval orizontal în trecerile intermediare.

Răcirea laminatelor finite. Oțelurile de rulmenți au tendința de a forma fulgi și, din această cauză, după laminare trebuie răcite lent sau trebuie supuse unor tratamente termice, după regimuri speciale.

În general, se recomandă regimuri speciale de răcire. Astfel, într-o primă variantă, blumurile, imediat după laminare, având temperatura minimă de 700°C, se încarcă în cuptoarele adânci neîncălzite și se mențin circa 72 h, până la temperatura de 100...200°C. După răcire, blumurile sunt supuse revenirii înalte în cuptoare cu vatra mobilă, cu viteza de încălzire de maximum 100 °C/h, până la temperatura de 720°C, urmată de menținere timp de 15...35 h, în funcție de masa încărcăturii aceasta putând fi de 20...70 t.

Se practică, de asemenea, și varianta răcirii rapide până la temperatura inferioară celei de transformare perlitică, sub 700°C, după care răcirea continuă foarte lent în cuptoare încălzite până la 700°C, temperatură la care oțelul se află în starea α pentru care hidrogenul se degajă cel mai intens. Durata de răcire a blumurilor este egală cu aproximativ jumătate din durata primei variante.

Profilurile destinate prelucrării ulterioare la cald pot fi răcite în aer, în pachete, iar profilurile ușoare pot fi, de asemenea, răcite în aer fără existența pericolului producerii fulgilor. La răcirea înceată a profilurilor, după laminare, până la 650 °C, apare pericolul de formare a rețelei de cementită. Sub 650 °C rețeaua de cementită nu se mai formează, chiar dacă răcirea este lentă. De aceea, pentru evitarea formării rețelei de cementită, răcirea profilurilor imediat după laminare, până la circa 650 °C trebuie să se facă cât mai rapid posibil, prin răcirea separată a barelor. Această răcire se poate face în bazine cu apă sau prin injectarea (pulverizarea) de apă sub presiune asupra barelor, în timp ce se deplasează pe un transportor.

Pentru evitarea formării rețelei de carburi, viteza de răcire depinde și de temperatura de sfârșit de laminare. Dacă temperatura de sfârșit de laminare este de 900...950 °C, viteza de răcire trebuie să fie de minimum 45...50 °C/min.

Aspectul produselor laminate din oțeluri de rulmenți trebuie să corespundă următoarelor cerințe:

- nu se admit fisuri, sufluri, suprapuneri sau incluziuni nemetalice vizibile cu ochiul liber; de asemenea, nu se admit în stările de livrare A1 și B1 imprimări de oxizi cu adâncimea mai mare de jumătate din abaterea limită la dimensiunea produsului laminat respectiv; până la această adâncime se admit și curățărilor locale ale defectelor prin dăltuire sau polizare;

- pe suprafața produselor cojite se admit urme ale prelucrării cu înălțimea sau adâncimea egală cu maxim jumătate din toleranța la dimensiunea produsului în timp ce la produsele șlefuite nu se admit nici un fel de defecte sau urme de prelucrare;

- abaterea de la rectilinitate a produselor laminate nu trebuie să depășească 1,5 mm / m în starea de livrare C3 și, respectiv, 3 mm / m în cazul celorlalte stări de livrare;

- ovalizarea produselor circulare nu trebuie să depășească jumătate din toleranța la dimensiunea produsului respectiv laminat.

În afara standardelor menționate care prezintă mărcile clasice de oțeluri de rulmenți, mai sunt două standarde care se referă la astfel de oțeluri. Astfel, unul din standarde, STAS 11507-80, se referă la oțelul pentru rulmenți destinați sapelor de foraj, simbolizat 55SiMoX, oțel slab aliat cu siliciu și molibden, iar celălalt standard, STAS 11525-80, se referă la oțelurile pentru rulmenți Rollway obținute prin asimilare, cooperare internațională și import, sub formă de produse deformate plastic la cald sau la rece.

Compoziția chimică a acestor oțeluri se stabilește în funcție de tipul rulmentului și va corespunde condițiilor de licență, iar caracteristicile mecanice, tehnologice și de structură vor corespunde standardului STAS 11250-80 și specificațiilor din licență.

Capitolul 5

LAMINAREA OȚELURILOR RAPIDE

Oțelurile rapide fac parte din clasa ledeburitică, fiind aliate cu un procent de 3,8...4,5 % Cr, cu max 9% Mo, max 19,5 % W, max 2,5 %V, max 5,5 % Co și cu 0,7...1,0 %C. Aceste oțeluri posedă rezistență mecanică mare și stabilitate la roșu, respectiv prezintă duritate mare la încălzirea lor la temperaturi de până la 550...600 °C. Stabilitatea la roșu a oțelurilor rapide este asigurată de influența comună a elementelor generatoare activ de carburi cum sunt V, W, Mo și Cr. Aceste elemente formează carburi foarte dure în metalul de bază stabil la revenire. Stabilitatea la roșu a oțelurilor rapide asigură posibilitatea de a se putea prelucra metalele prin așchiere cu viteză mare și sub sarcini dificile.

Oțelurile rapide se folosesc pentru executarea diferitelor tipuri de scule așchietoare cum sunt burghiele, cuțitele așchietoare, frezele etc. Sculele așchietoare se execută din oțeluri rapide laminate sau forjate. Prin laminare se obțin profiluri rotunde cu diametre de 5...45 mm, profiluri pătrate până la 45x45 mm și table având grosimea de 1,5...6,0 mm cu lățimea până la 1 m, iar prin forjare se obțin profilurile mari, cu diametre de până la 100 mm.

Utilizate inițial doar la fabricarea sculelor de așchiere, oțelurile rapide s-au impus de-a lungul timpului și la execuția unor scule pentru prelucrări fără degajări de așchii sau de pilitură ca, de exemplu, deformarea la rece prin extruziune a materialelor metalice, turnarea sub presiune a metalelor, piese de uzură și frecare la cald îndeosebi în hidraulică etc.

De la apariția lor (sfârșitul secolului trecut) și până în prezent, oțelurile rapide au cunoscut o serie de etape de dezvoltare care au dus la crearea unor familii distincte de oțeluri rapide și anume, oțeluri cu wolfram, oțeluri cu molibden, respectiv oțeluri cu wolfram și molibden. Dacă se mai ia în considerare și adaosul de cobalt și, respectiv, carbon (oțeluri cu conținuturi normale, ridicate și supracarburate) rezultă că principalele trei grupe de oțeluri menționate se pot subdivide în foarte multe subgrupe, fiecare conținând oțeluri cu unele caracteristici distincte. În tabelul 5.1 se prezintă principalele mărci de oțeluri rapide tipizate în industria noastră precum și principalele domenii de utilizare ale acestora. De multe ori, în locul mărcilor de oțel, așa cum sunt nominalizate în tabelul menționat, oțelurile rapide sunt simbolizate printr-o serie de cifre, care reprezintă media conținuturilor de wolfram, molibden și vanadiu. De exemplu, 18-0-1 reprezintă marca *Rp3* cu 18 %W, 0 %Mo și 1%V, iar 6-5-2 reprezintă marca *Rp5* cu 6%W, 5 %Mo și 2 %V.

Tabelul 5.1

Mărci de oțeluri rapide și principalele domenii de utilizare

Marca oțelului STAS 7382-88	Compoziția chimică, %							Principalele domenii de utilizare	Forme de livrare
	C	Mn	Si	Cr	W	Mo	V	Co	
<i>Rp1</i>	0,90... ...1,00	max. 0,45	0,20... ...0,40	3,80... ...4,40	9,0... ...10,5	max. 0,30	2,00... ...2,60	5,00... ...6,00	Profiluri lami- nate la cald.
<i>Rp2</i>	0,70... ...0,80	max. 0,45	0,30... 0,40	3,80... 4,40	17,0... ...18,5	max. 0,30	1,00... ...1,40	4,50... ...5,50	Oțel calibrat. Bare și blocuri forjate.
<i>Rp3</i>	0,70... ...0,80	max. 0,45	0,30... ...0,40	3,80... ...4,40	17,5... ...19,5	max. 0,60	1,00... ...1,40	-	
<i>Rp5</i>	0,75... ...0,85	max. 0,40	0,20... ...0,40	3,80... ...4,40	6,00... ...7,00	4,80... ...5,30	1,7... ...2,1	-	Produse plate. Profiluri lami- nate la cald. Bare forjate.
<i>Rp9</i>	0,95... ...1,03	max. 0,45	0,20... ...0,40	3,80... ...4,50	2,70... ...3,00	2,50... ...2,80	2,25... ...2,50	-	Profiluri lami- nate la cald. Bare și blocuri forjate.
<i>Rp10</i>	0,78... ...0,85	0,10... ...0,40	0,10... ...0,40	0,75... ...4,00	1,00... ...1,65	8,00... ...9,00	1,00... ...1,25	-	

5.1. CARACTERISTICI MECANICE ȘI STRUCTURALE

Structura oțelurilor rapide, în stare turnată, este caracterizată prin marea ei neomogenitate și prin prezența unei rețele de ledeburită. Prelucrarea prin laminare distruge rețeaua de ledeburită, structura obținută constând dintr-o masă de perlită sorbitică și benzi (șiruri) de carburi. În funcție de dimensiunea semifabricatului laminat și de marca oțelului, sunt admise diferite punctaje, conform STAS 7382-88.

În stare călită, valoarea durtății oțelurilor rapide depinde foarte mult de temperatura de călire și de durata de menținere la călire. Influențează, de asemenea, gradul segregăției dendritice, precum și durata, respectiv temperatura de recoacere. Influența temperaturii de călire asupra valorii durtății se explică prin modificările care au loc în constituția fazică a oțelului rapid și prin cantitatea de austenită reziduală. Scăderea valorii durtății, cu creșterea temperaturii de recoacere este rezultatul transformării unei părți din carbura $\text{Fe}_3\text{W}_3\text{C}$ în carburi de tipul WC și W_2C , care, practic, la încălzirea pentru călire nu se dizolvă în austenită.

Stabilitatea la cald a oțelurilor rapide depinde de gradul de aliere a soluției solide și de modificările pe care oțelurile le suferă în urma diverselor operații de încălzire. La aceeași compoziție chimică, stabilitatea la cald este influențată de gradul de dezvoltare a segregăției de carburi. Conform STAS 7382-88, se consideră că stabilitatea la cald a oțelurilor rapide este corespunzătoare dacă duritatea epruvetelor nu scade sub 58 HRC, după 4 h de revenire la temperatura de 620 °C pentru mărcile *Rp3*, *Rp5*, *Rp9* și *Rp10*, la temperatura de 630 °C pentru marca *Rp1* și la temperatura de 640 °C pentru marca *Rp2*.

Conținuturi mari de carbon conduc la creșterea stabilității austenitei subrăcite, ceea ce va impune practicarea unui tratament adecvat pentru obținerea durtății de minimum 68...70 HRC.

Ledeburita (carbura primară) care apare la turnarea și la răcirea oțelurilor rapide, se amplasează pe limitele grăunților sub forma unui înveliș, este foarte stabilă și nu trece în soluția solidă prin încălzire până la temperaturi foarte ridicate. Aceste carburi primare pot fi sfărâmate numai prin prelucrare la cald și anume prin laminare sau forjare.

Concomitent cu carburile primare se formează și carburi secundare, mai mărunte, care trec în soluția solidă prin încălzire. Rezultă de aici că structura oțelurilor rapide, în stare turnată, este foarte neomogenă.

Proprietățile de rezistență ale oțelurilor rapide sunt determinate de dimensiunile carburilor în exces și de uniformitatea repartiției acestora în materialul de bază. Oțelurile rapide sunt cu atât mai calitative cu cât carburile sunt mai mărunte și mai uniform repartizate în masa oțelului.

Plasticitatea oțelurilor rapide crește pe măsură ce temperatura de deformare este mai ridicată, atingând un maximum de circa 78 %, plasticitatea fiind determinată prin laminarea de probe în formă de pană, la temperatura de 1200 °C, temperatura de topire fiind 1320 °C. Limita minimă de plasticitate a oțelurilor rapide, de circa 55 %, apare la temperatura de 890 °C.

Rezistența la deformare a oțelurilor rapide este de circa 2 ori - la temperatura de 1100 °C - până la de 3,3 ori – la temperatura de 900 °C - mai mare decât cea a oțelurilor nealiat, ajungând la circa 130...150 MPa la laminarea la cald a lingourilor, la temperatura de 1200°C și, respectiv, la 500...700 MPa la laminarea la cald a profilurilor ușoare, în ultimele treceri.

Conductibilitatea termică a oțelurilor rapide este de aproape trei ori mai mică decât a oțelurilor nealiat, ceea ce contribuie la realizarea unui gradient mare de temperatură și, respectiv, la crearea tensiunilor termice.

Lățirea oțelurilor rapide este de 1,1 ori mai mare decât cea a oțelurilor nealiat, în timp ce *avansul* la laminarea oțelurilor rapide prezintă o variație deosebită în comparație cu cea a oțelurilor nealiat, pentru condiții comparabile (fig.5.1), în sensul că la reduceri relativ mici, avansul la laminarea oțelurilor rapide este mai mare decât la laminarea oțelurilor nealiat, în timp ce la laminarea cu grade de reducere mari, în cazul oțelurilor nealiat avansul este mai mare decât în cazul oțelurilor rapide.

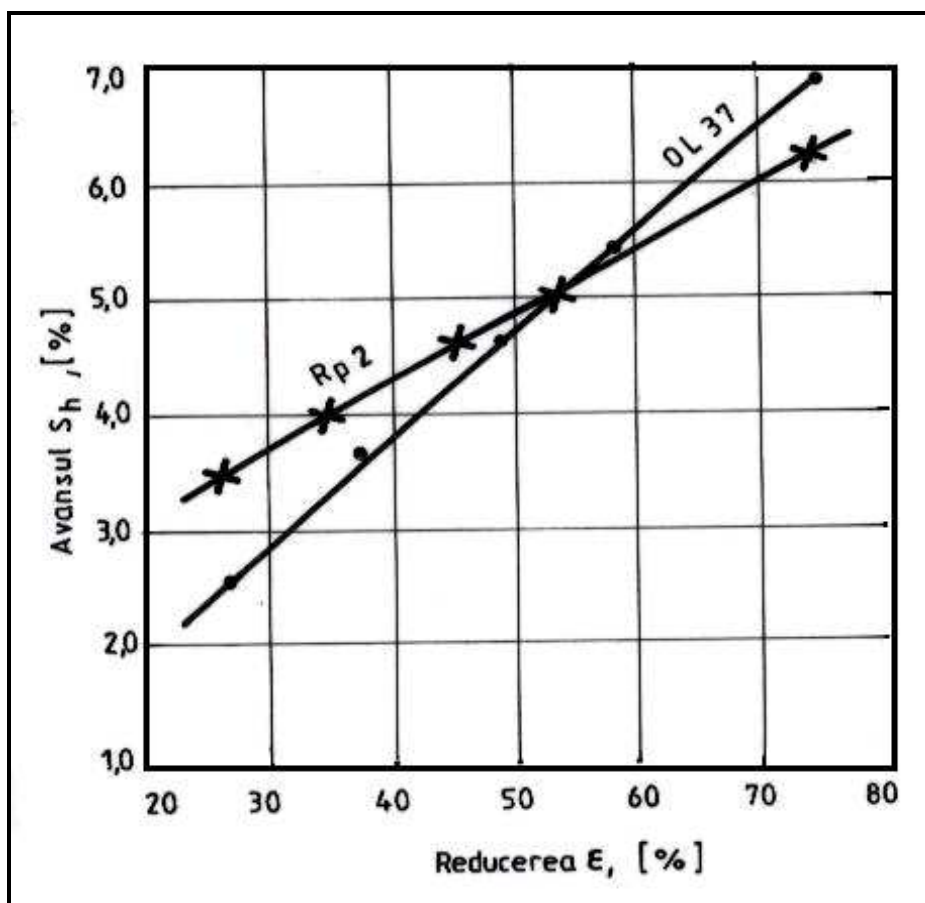


Fig.5.1. Variația avansului în funcție de gradul de reducere la laminarea unui oțel rapid și a unui oțel nealiat.

Comportarea la încălzire. Oțelurile rapide, cu conținut ridicat de carbon și elemente de aliere, trebuie să fie supuse încălzirii cu o grijă deosebită, deoarece conductibilitatea scăzută a acestor oțeluri generează tensiuni termice care pot produce fisuri și, de asemenea, în masa semifabricatului turnat, deci a lingoului, se formează porțiuni de segregatie cu eutectice care au temperaturi de topire scăzute și care, la încălzirea lingourilor la temperaturi mari în vederea

laminării, conduc la distrugerea structurală în timpul prelucrării prin presiune. Ca urmare, oțelurile rapide cu structură de turnare vor fi supuse încălzirii în vederea laminării la temperaturi ceva mai scăzute decât aceleași oțeluri care au deja structură de deformare.

Oxidarea oțelurilor rapide, la temperaturi de încălzire relativ joase, de circa 900...1100 °C, este mai redusă decât oxidarea oțelurilor nealiat, în timp ce la temperaturi de peste 1100 °C oxidarea oțelurilor rapide depășește net pe aceea a oțelurilor nealiat (fig.5.2).

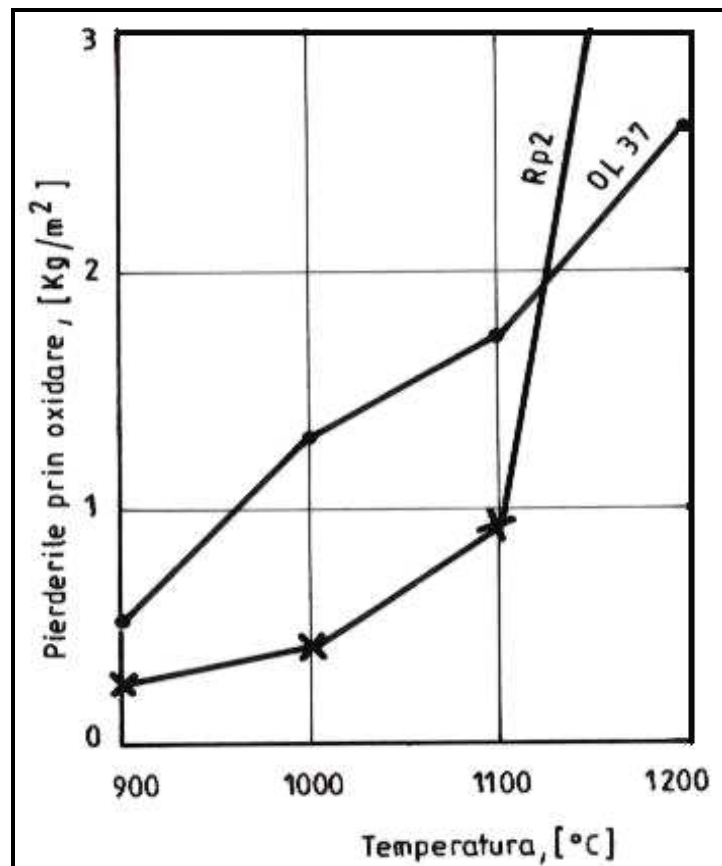


Fig.5.2. Diagrama de variație a oxidării unui oțel rapid comparativ cu a unui oțel nealiat, în condiții similare de încălzire.

Decarburarea oțelurilor rapide. Oțelurile rapide posedă o puternică tendință de decarburare, care se mărește dacă în oțel există și molibden, ceea ce conduce la scăderea durității sculelor după încălzire. Pentru evitarea decarburării în timpul încălzirii pentru laminare trebuie luate măsuri de protecție, ca de exemplu, prin realizarea unei atmosfere de protecție corespunzătoare a cuptorului sau prin protejarea suprafețelor semifabricatelor prin vopsire cu var.

Susceptibilitatea la tensiuni termice este foarte mare în cazul oțelurilor rapide, datorită conductibilității termice scăzute. Astfel, în cazul unei încălziri rapide a semifabricatelor, în special a lingourilor sau a răcirii în aer a acestora, se formează frecvent crăpături sau chiar spărturi transversale ale semifabricatelor. Din această cauză lingourile, după turnare, se vor răci foarte lent sau se vor supune unei recoaceri la temperaturi înalte.

Formarea crăpăturilor termice în oțelurile rapide se produce de obicei după un timp oarecare de depozitare a lingourilor sau semifabricatelor laminate.

De aceea se recomandă ca oțelurile rapide să fie supuse tratamentelor termice cel mai târziu la aproximativ 24 ore după răcire.

În ceea ce privește apariția tensiunilor mecanice remanente, în urma deformării, se recomandă ca laminarea să asigure astfel de condiții încât să nu apară în zona axială a semifabricatelor tensiuni de întindere generatoare de fisuri sau crăpături. Respectiv, trebuie asigurată pătrunderea deformației spre centrul semifabricatului prin grade de reducere cât mai mari.

Gradele mari de reducere asigură sfărâmarea avansată a ledeburitei și carburilor precum și distribuirea lor cât mai uniformă. Prin aceasta se asigură proprietăți superioare ale produselor obținute din oțelul deformat. În general, pentru distrugerea completă a rețelei ledeburitice, existentă în oțelul rapid cu structură de turnare, se recomandă un grad mare de reducere a secțiunii transversale.

5.2. PARAMETRII TEHNOLOGICI DE LAMINARE

Masa lingourilor utilizate pentru laminarea oțelurilor rapide variază, în general, între 200...1000 kg, cu un raport L/H variind între 2,9...4,7 aceste valori scăzând pe măsură ce masa lingoului este mai mare.

Încălzirea lingourilor se face cu viteză mică, timpul de încălzire fiind de circa o oră pentru fiecare 2 cm din diametrul lingoului. Se recomandă tratamentul termic de recoacere, după stripare. De asemenea, se recomandă ca la introducerea lingourilor în cuptor, acestea să aibă temperatura de 500...600 °C.

Semifabricatele forjate sau laminate (țagle) au conductibilitatea termică mai mare decât lingourile, ca urmare a măririi prin deformare a omogenității materialului (distrugerea structurii primare de turnare). De asemenea, secțiunea fiind mai mică, se vor reduce și tensiunile termice, ca urmare a micșorării gradientului de temperatură pe secțiune. Acestea fac ca viteza de încălzire să poată fi crescută foarte mult, mai ales că oțelurile rapide au și o puternică tendință spre oxidare și decarburare, deci nu trebuie menținute timp îndelungat la temperaturi înalte.

Temperatura de încălzire nu trebuie să depășească 1250 °C, deoarece temperatura de topire a eutecticului ledeburitic este de aproximativ 1300°C.

Laminarea lingourilor. Lingourile din oțeluri rapide se deformează, în special, prin forjare. Lingourile mai mici pot fi laminate direct, însă cele mari, înaintea laminării se vor forja pentru distrugerea structurii ledeburitice de turnare și pentru pătrunderea deformației spre centrul semifabricatului, ceea ce numai prin laminare nu se poate realiza.

Conținutul în carbon al oțelurilor rapide are o mare influență asupra comportării lor la deformarea prin laminare. Dacă la conținuturi de maximum 0,8 %C, oțelul rapid se laminează aproximativ normal, peste această valoare laminarea devine din ce în ce mai dificilă, ca urmare a scăderii plasticității și creșterii pronunțate a rezistenței la deformare, cât și a apariției frecvente a crăpăturilor și rupturilor, ceea ce conduce la creșterea cantității de rebut.

Deformabilitatea lingourilor din oțeluri rapide scade prin creșterea

dimensiunilor lor, ca urmare a creșterii corespunzătoare a dimensiunilor cristalelor primare înconjurate de o cantitate de asemenea mai mare de rețea de ledeburită, care se comportă ca niște incluziuni, micșorând plasticitatea oțelului.

Dacă prin forjare se asigură distrugerea structurii ledeburitice de turnare, laminarea se poate efectua fără probleme deosebite, dintr-un singur cald, deci fără reîncălzire, datorită posibilității aplicării prin forjare a unor reduceri mari ce pătrund spre zona centrală a lingoului și a unor timpi de răcire între etapele deformării foarte scurți, frecvența loviturilor la ciocan fiind mare. Pentru laminare, după primele 3 sau 4 treceri, lingoul trebuie reîncălzit până la temperatura de început de deformare, pentru anihilarea tensiunilor care au apărut ca urmare a distrugerii rețelei de ledeburită. Abia în timpul celei de a doua deformări începe distrugerea învelișului ledeburitic al cristalelor situate în zona centrală a lingoului. Și după această deformare este necesară o nouă reîncălzire pentru definitivarea procesului de distrugere, în toată masa lingoului, a structurii ledeburitice și a distribuirii cât mai uniforme a carburilor în masa de austenită a oțelurilor rapide. În această situație se poate considera că oțelurile rapide au căpătat deformabilitatea corespunzătoare pentru a fi laminate fără probleme până la dimensiunile profilului laminat finit.

La forjarea la ciocane apar uneori fisuri marginale care trebuiesc îndepărtate prin dăltuire pentru evitarea propagării lor și degenerării în crăpături. Aceste defecte apar în cazul deformării lingourilor prea reci și de calitate necorespunzătoare. De aceea, când temperatura lingourilor a coborât la 1000 °C (la colțuri 950°C) laminarea sau forjarea trebuie oprită și semifabricatul reîncălzit.

În cazul laminării lingourilor din oțeluri rapide, repartiția reducerilor pe treceri, viteza de deformare, regimul de temperaturi și, în special, caracterul schimbării formei laminatului prin forma calibrelor folosite (care determină raportul dintre tensiunile aplicate pe cele trei direcții asupra laminatului) au o importanță hotărâtoare asupra calității semifabricatelor obținute.

Lingourile din oțeluri rapide se laminează atât pe laminoare specializate, cu diametre ale cilindrilor de 600...800 mm, folosindu-se calibrări specifice, respectiv calibre cutie - pentru prindere ușoară și cu raze mari de racordare la colțuri - pentru evitarea răcirii accentuate, la primele treceri, în care se aplică reduceri de 20...45 mm ($\epsilon = 15...20\%$). Laminarea se continuă în calibrele rotunde sau de formă apropiată. Pentru laminarea în bune condiții se recomandă ca și cilindri să fie bine încălziți. Deoarece prinderea la laminare a lingourilor din oțeluri rapide este dificilă, datorită în special rezistenței mari la deformare, turația maximă a cilindrilor de laminare nu trebuie să conducă la viteze de laminare mai mari de 1 m/s.

Laminarea lingourilor mari din oțeluri rapide se poate efectua și la bluming, cu una sau două reîncălziri, în funcție de dimensiunea finală și de numărul de treceri în care se efectuează laminarea. De exemplu, un lingou de 1000 kg din oțel rapid, având secțiunea de 360 x 360 mm se laminează într-un blum de 160 x 160 mm în 35 treceri cu $\Delta h_{med} \approx 15\text{mm}$, în timp ce un alt lingou, de 800 kg, având secțiunea de 290 x 290 mm, se laminează în țagă cu secțiunea

de 110 x 110 mm în 17 treceri, cu o singură reîncălzire după primele 7 treceri, realizându-se o reducere a secțiunii de 46 %, prin aplicarea unei reduceri medii $\Delta h_{\text{med}} \approx 27 \text{ mm}$ ($\Delta h_i = 12...40 \text{ mm}$). Valoarea reducerii pe treceri și, respectiv, numărul total de treceri depinde, pe de o parte, de condițiile de prindere și, pe de altă parte de puterea motorului de acționare a cajei. La laminarea la bluming este obligatorie răsturnarea laminatului din două în două treceri, realizându-se un coeficient mediu de alungire $\lambda = 1,07...1,15$ valoarea unghiului maxim de prindere fiind $\alpha_{\text{max}} = 23^\circ$.

Răcirea semifabricatelor obținute la bluming se execută lent în cuptoare adânci, neîncălzite, cu viteze de 20...25 °C/h, până la temperatura de 120°C.

Laminarea profilurilor, în special rotunde și a sârmei destinată trefilării, se execută fără dificultăți deosebite, folosindu-se de obicei laminoare liniare cu sisteme de calibrare romb-romb pentru trecerile degrosisoare, urmate de sistemul pătrat-oval și, în final, oval-rotund. De exemplu, în cazul laminării sârmei cu diametrul de 6 mm., coeficientul mediu de alungire în calibrele rombice are valori $\lambda_m = 1,18...1,27$ și unghiul la vârful calibrelor rombice este $\varphi = 92...95^\circ$, iar în calibrele rotunde $\lambda_m = 1,23$. Se recomandă laminarea de semifabricate cu lungimi mici pentru a fi posibilă eventuala reîncălzire a acestora, pentru care bara nu poate fi prea lungă. În condițiile unor laminoare puternice, profilurile ușoare și sârma din oțeluri rapide pot fi laminate și pe linii continue cu calibrări obișnuite, pentru oțeluri nealiat și fără reîncălzire.

Oțelurile rapide *se laminează și în table* din care se execută, de exemplu, frezele disc. Laminarea se poate executa atât la cald, pe laminoare liniare, folosindu-se tehnologia laminării în pachete, cât și la rece.

La laminarea *la cald* se utilizează, ca semifabricate, țagtele late forjate, cu grosimi de 15...25 mm, încălzite la 1100...1150 °C și aplicându-se reduceri descrescătoare având valori între 35...25 %. Dublarea se efectuează, în general, după cea de a doua reîncălzire, când se urmărește realizarea de table cu grosimi sub 1,5 mm. Temperatura de sfârșit de laminare se admite până la 600 ... 700°C.

Pentru laminarea *la rece* a tablelor cu grosimi de 0,8...1,2 mm, semifabricatele de pornire utilizate sunt tablele laminate la cald cu grosimi de 1,25...1,35 mm sau cu alte grosimi, oricum mai mari decât grosimea tablei finite care urmează a se lamina, astfel încât să se poată asigura reduceri totale maxime $\epsilon_{\text{tot max}} = 20...30 \%$. Tablele se supun tratamentului termic de revenire la temperatura de 740...750 °C, urmată de răcire în apă sau în aer, după care se execută decaparea și spălarea în condiții normale, laminarea la rece în 5...8 treceri cu reduceri medii $\epsilon_{\text{med}} = 4...5 \%$ și, în final, recoacerea la 720 °C după care duritatea tablelor va avea valori de 179...238 HB. Pentru ușurarea condițiilor de laminare la rece semifabricatele se încălzesc la 100...400 °C înaintea deformării. De asemenea, pentru tablele din oțeluri rapide cu grosimi mai mari de 1,2 mm, se practică și laminarea *la semicald*. Pentru aceasta tablele laminate la cald folosite ca semifabricate, după recoacere, decapare și spălare se încălzesc până la 550...650 °C, în decurs de câteva minute, pentru evitarea oxidării și, în final, se laminează cu reduceri de până la 10 % pe trecere.

Capitolul 6

LAMINAREA OȚELURILOR INOXIDABILE

Convențional se numesc oțeluri inoxidabile aliajele fierului cu carbonul și cromul (Fe-C-Cr), cu minimum 12 %Cr și maximum 0,1 %C. La aceste oțeluri, cromul produce acoperirea acestora cu un strat pasiv în aer, acizi, atmosferă industrială etc., asigurându-le rezistența la oxidare și coroziune. Stratul pasiv este format, în principal, din oxid de crom care, fiind aderent, dens, impermeabil și puțin solubil, îl face rezistent la acțiunea unui număr mare de medii agresive.

În afară de crom, oțelurile inoxidabile mai conțin și alte elemente cum sunt Ni, Mo, Cu, Mn, Ti, Nb, Si, B, Al etc. care au scopul de a mări rezistența la coroziune și de a îmbunătăți proprietățile mecanice și de comportare la procesare. Influența principalelor elemente de aliere în oțelurile inoxidabile este prezentată în continuare.

Nichelul, cu concentrații de 8...25 %, este principalul element de aliere după crom, ameliorând în special rezistența la coroziune în medii acide, slab oxidante sau neoxidante, mărinđ în același timp tenacitatea oțelului și prelucrabilitatea acestuia prin deformare plastică. Adăosuri de cupru măresc influența nichelului ca element austenitizant.

Molibdenul, în concentrații de 1...3 %, îmbunătățește în special rezistența la coroziune în medii clorice și mărește proprietățile mecanice la cald ale oțelurilor inoxidabile.

Titanul și niobiul au efect alfađen și datorită afinității lor față de carbon împiedică formarea carburilor de crom, reducând astfel concentrația acestora în austenită. Au efect stabilizator, respectiv împiedică precipitarea carburilor de crom în cazul încălzirii de lungă durată a oțelurilor inoxidabile în intervalul de temperaturi de 400...700 °C.

În afara stabilității termice măresc și rezistența la coroziune intercristalină a oțelurilor. Conținutul în aceste elemente se stabilește în funcție de conținutul de carbon al oțelului, astfel: $\%Ti = 8 \times \%C$ și $\%Nb = 5 \times \%C$.

Siliciul și aluminiul măresc rezistența la temperaturi ridicate a oțelului, iar câteva miimi de procente de *bor* ameliorează comportarea la fluaj a oțelurilor inoxidabile.

Manganul și azotul sunt adăugate în oțelurile inoxidabile ca înlocuitor al nichelului, având efect gamagen, reducându-se astfel costurile ridicate ale acestor oțeluri. În oțelurile Cr-Mn, creșterea conținutului de mangan, asociată cu conținuturi mici de carbon, provoacă diminuarea rezistenței la rupere și a alungirii specifice.

Oțelurile inoxidabile aliate cu mangan prezintă însă o rezistență mai mică la coroziune comparativ cu cele aliate cu nichel. Adăsurile de azot în oțelurile Cr-Ni sau Cr-Ni-Mn conduc la durificarea austenitei, iar oțelurile prezintă proprietăți mecanice mai ridicate. Concentrația în azot nu se admite mai mare de 0,4 %, deoarece apare tendința de fragilizare a oțelurilor ca urmare a formării unor nitruri de fier care se pot separa în timpul exploatării oțelurilor inoxidabile.

6.1. CARACTERISTICI MECANICE ȘI STRUCTURALE

Structura oțelurilor inoxidabile depinde de raportul dintre elementele alifagene și cele gamagene din compoziția oțelului, respectiv de raportul dintre echivalentul în crom - element alfa și echivalentul în nichel - element gama, calculate cu relațiile:

$$E_{Cr} = \%Cr + \%Mo + 1,5x \%Si + 0,5x \%Nb \quad (6.1)$$

$$E_{Ni} = \%Ni + 30x\%C + 0,5x\%Mn + 30x\%N \quad (6.2)$$

Pe baza acestor valori, din diagrama Schaeffler (v.fig.1.10) se pot obține familiile de oțeluri inoxidabile prezentate în continuare.

Oțelurile martensitice sunt oțelurile inoxidabile aliate cu 12...17 %Cr și 0,4...1,0 %C la care, pentru mărirea rezistenței la oxidarea la cald, se adaugă circa 0,4 %Si, iar pentru mărirea tenacității se adaugă 2...4 %Ni.

Oțelurile martensitice se subîmpart în patru grupe, în funcție de conținuturile în crom și în carbon, astfel:

- grupa M_1 cu conținuturi de maximum 0,15 %C și de 12...14 %Cr; se utilizează pentru piese supuse la solicitări mecanice mari și pentru piese care lucrează în medii corosive;
- grupa M_2 cu conținuturi de 0,2...0,4 %C și 13...15 %Cr; oțelurile din această grupă au durități mari, asociate și cu tenacități apreciabile;
- grupa M_3 cu conținuturi de 0,6...1,0 %C și 14...16 %Cr; aceste oțeluri asigură durități mari, fără pretenții deosebite de tenacitate sau inoxidabilitate;
- grupa M_4 cu maximum 0,2 %C, 16...20 %Cr și 2...4 %Ni; au proprietăți mecanice bune și rezistentă la coroziune ameliorată prin prezența nichelului.

Oțelurile feritice sunt oțeluri inoxidabile cu 0,1...0,35 %C și 15...30 %Cr, caracterizate de structuri monofazice și de absența transformărilor structurale la încălzire sau la răcire. Aceste oțeluri au rezistența la coroziune superioară celor martensitice și sunt mai ieftine decât oțelurile inoxidabile austenitice.

În funcție de concentrația în carbon și crom, oțelurile feritice se împart în două grupe, astfel:

- grupa F_1 cu conținuturi de 0,08...0,12 %C; 15...18 %Cr; 0,5...1,0 %Si; 0...4 %Al și 0 ...1 %Ni;
- grupa F_2 cu conținuturi de 0,1 ... 0,35 %C; 25 ... 30 %Cr; 1 ... 4 %Ni; 0 ... 2 %Cu; 0 ... 2 %Mo și 0,12 ... 0,25 %N.

Oțelurile din grupa F_1 au rezistența bună la coroziune în acid azotic, fosforic și acetic precum și în apă de mare, iar oțelurile din grupa F_2 rezistă bine în medii oxidante și sulfuroase. Oțelurile feritice sunt insensibile la coroziunea sub tensiune, dar prezintă fragilitate după sudare. Pentru îmbunătățirea comportării la sudare se adaugă nichel, cupru, aluminiu, molibden, titan sau niobiu și se reduce conținutul de carbon.

Oțelurile austenitice conțin max.0,1%C, 12...25 %Cr și 8...30 %Ni (tabelul 6.1). Aceste oțeluri au caracteristici mecanice deosebite, rezistă bine la coroziune, se prelucurează ușor prin deformare plastică și au o comportare metalurgică bună la sudare. Se comportă foarte bine în tot intervalul de temperaturi de până la 1200°C. Au însă rezistența mică la coroziune sub tensiune, în special în medii formate din cloruri cu temperaturi ridicate.

Oțelurile austenitice se împart în mai multe grupe în funcție de principalele elemente de aliere, astfel:

- oțeluri Cr-Ni cu conținuturi de 12...25 %Cr, 8...20 %Ni și max.0,1 %C. Se mai adaugă atât siliciu pentru creșterea rezistenței la oxidare la temperaturi ridicate și pentru ameliorarea rezistenței la coroziune sub tensiune, cât și titan și niobiu pentru combaterea coroziunii intercrystaline;

- oțeluri Cr-Ni-Mo În oțelurile Cr-Ni se adaugă 2...4 %Mo, pentru mărirea rezistenței la coroziune în soluții de acid sulfuric, cloruri și acizi organici. La aceste oțeluri, creșterea rezistenței la coroziune se realizează și cu adausuri de 1...2 %Cu sau 2...4 %W;

- oțeluri Cr-Ni-Mn-N, la care adausul de mangan asigură menținerea la temperatura ambiantă a structurii austenitice formată la temperaturi ridicate, în oțelurile pe bază de crom. De exemplu, oțelul cu 12...15 %Cr, 14...15 %Mn și 0,1 %C, la temperatura de 1200...1100°C este austenitic, iar prin răcire rapidă, structura austenitică se menține. Acest oțel este sensibil la coroziunea intercrystalină la temperaturi cuprinse între 500...800 °C, iar pentru ameliorarea acestui inconvenient se recurge la adausuri de 2...6 %Ni. Adausul de azot în aceste oțeluri are scopul înlocuirii unei părți din conținutul de nichel, în vederea reducerii prețului de cost.

Oțelurile austenito-feritice se obțin prin modificarea concentrației elementelor alfa-gene și gama-gene, conform diagramei prezentată în figura 6.1. Oțelurile prezintă dificultăți de prelucrare plastică la cald și la rece, dar sunt practic insensibile la coroziunea intercrystalină și au proprietăți mecanice și fizice mai mari decât cele ale oțelurilor austenitice. Compoziția acestor oțeluri conține 0,05 %C, 8 %Ni și 20...22 %Cr. Mai pot fi aliate și cu 2...2,5 %Mo, 1,5%Cu și 3 %Mn. Adausurile de cupru și mangan reduc concentrația nichelului la 2...3 %.

Tendențele în realizarea oțelurilor inoxidabile sunt următoarele:

- reducerea conținutului de nichel, care este deficitar și scump și înlocuirea acestuia cu mangan, cupru sau azot, pentru menținerea proprietăților mecanice ale oțelurilor austenitice;

- creșterea conținutului în crom pentru îmbunătățirea caracteristicilor fizico-mecanice ale oțelurilor feritice, care sunt mai ieftine;

Tabelul 6.1

Mărci reprezentative de oțeluri inoxidabile

Mărci de oțeluri inoxidabile	C o m p o z i ț i a c h i m i c ă, %										Standard de material
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Alte elemente		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Oțeluri feritice și martensitice											
7AlCr130	max. 0,08	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	12,0... ..14,0	-	-	Al = 0,10 - 0,30	STAS 11523-87	
10Cr130 (12Cr130)	0,08... ..0,12	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	12,0... ..14,0	-	-	-	STAS 3583-87	
20Cr130	0,17... ..0,22	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	12,0... ..14,0	-	-	-	STAS 3583-87	
20MoCr130	0,17... ..0,22	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	12,0... ..14,0	max 1,00	0,90... ..1,30	-	W 1 4120 SEW	
30Cr130	0,25... ..0,35	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	12,0... ..14,0	-	-	-	STAS 3583-87	
35MoCr165	0,33... ..0,43	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	15,5... ..17,5	max 1,00	0,90... ..1,30	-	STAS 11523-87	
40Cr130	0,35... ..0,45	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	12,0... ..14,0	-	-	-	STAS 3583-87	

Tabelul 6.1 (continuare)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
90VMoCr180	0,85... ...0,95	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	17,0... ...19,0	-	0,90... ...1,30	V = 0,07...0,12	STAS 11523-87
8TiCr170	max. 0,10	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	15,5... ...17,5	-	-	Ti = min. 7x %C	STAS 3583-87
22NiCr250	0,15... ...0,23	max. 1,00	max. 1,00	0,045	0,030	16,0... ...18,0	1,5... ...2,5	-	-	STAS 11523-87
<i>Oțel ferito - austenitic</i>										
8MoNiCr250	max. 0,10	max. 2,00	max. 1,00	0,045	0,030	24,0... ...27,0	4,5... ...6,0	1,3... ...1,8	-	W 1.4460 SEW
<i>Oțeluri austenitice</i>										
2NiCr185	max. 0,03	max. 2,00	max. 1,00	0,045	0,030	17,0... ...20,0	10,0... ...12,5	-	-	STAS 11523-87
10TiNiCr180	max. 0,10	max. 2,00	max. 1,00	0,045	0,030	17,0... ...19,0	9,0... ...11,5	-	Ti = min. 5x %C	STAS 3583-87
10TiMoNiCr175	max. 0,10	max. 2,00	max. 1,00	0,045	0,030	16,5... ...18,5	10,5... ...13,5	2,0... ...2,5	Ti = min. 5x %C	STAS 3583-87

- alierea oțelurilor inoxidabile Cr - Ni cu molibden, bor, siliciu sau wolfram pentru a se obține oțeluri cu proprietăți mecanice și chimice deosebite, la prețuri mai convenabile;

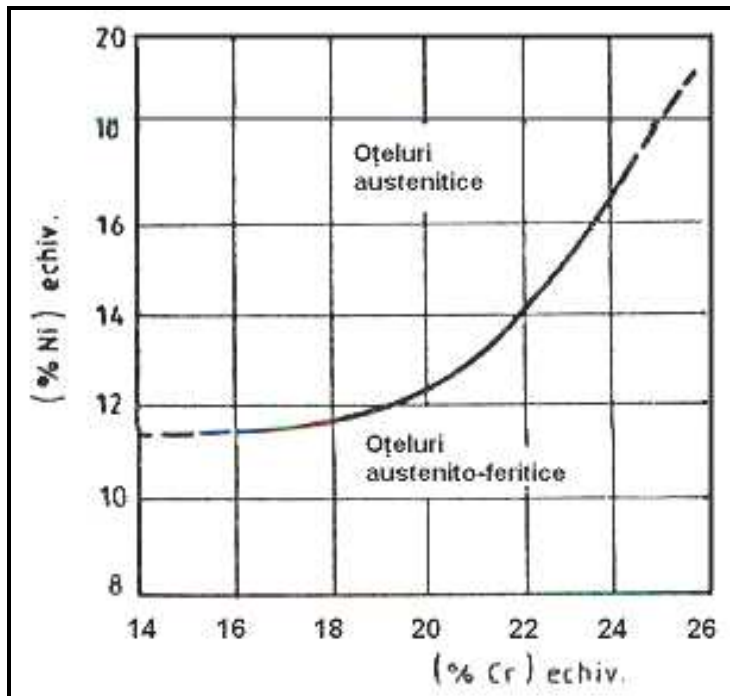


Fig.6.1. Influența elementelor alfa-gene și gamma-gene asupra structurii oțelurilor inoxidabile.

- alierea oțelurilor inoxidabile cu sulf, seleniu sau plumb pentru a le mări prelucrabilitatea prin așchiere;

- mărirea rezistenței la coroziune, în special a celei sub tensiune, prin micro-alierea cu titan și niobiu și prin aplicarea unor tratamente termice speciale de tipul celor cu durificare structurală sau termomecanice.

Prin modificări structurale la oțelurile inoxidabile, se poate obține un spectru larg de proprietăți mecanice (fig.6.2).

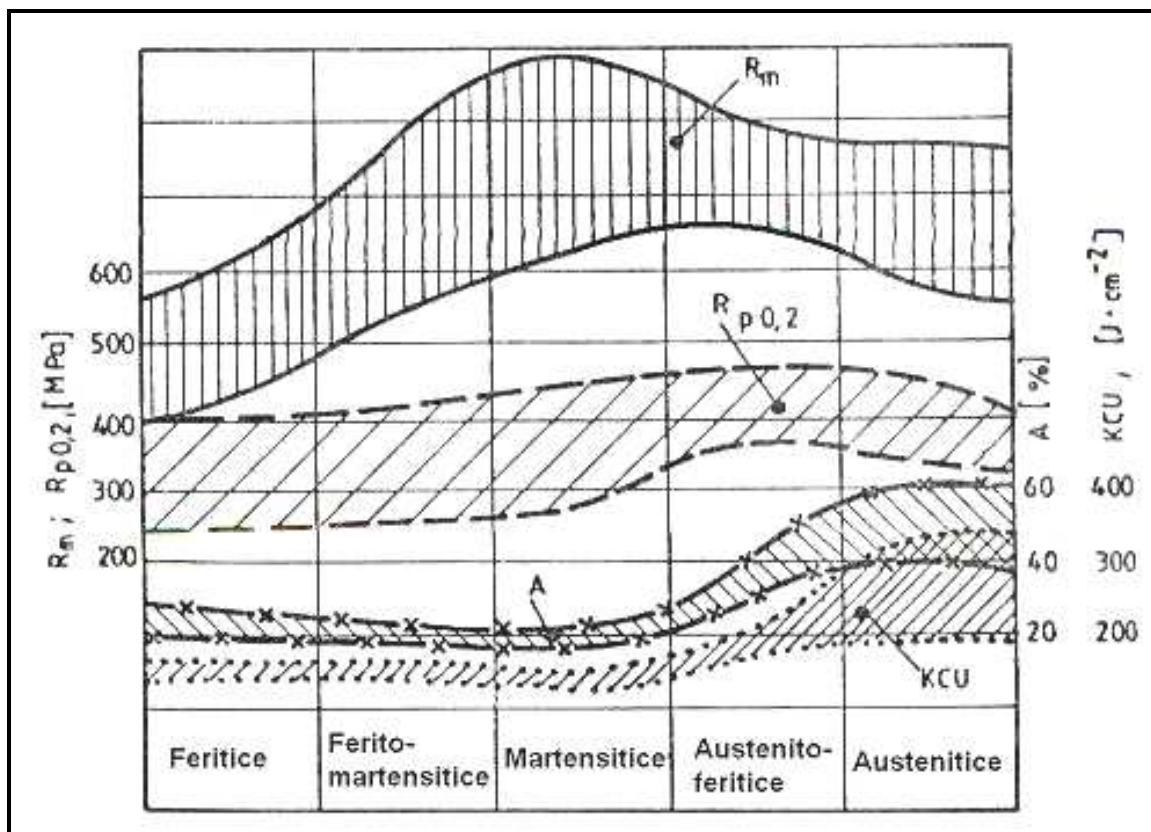


Fig. 6.2. Variația proprietăților mecanice ale oțelurilor inoxidabile.

6.2. COMPORTAREA LA DEFORMAREA PLASTCĂ

Oțelurile ferito-austenitice sunt oțeluri bifazice, iar plasticitatea lor crește odată cu scăderea cantității de fază γ . În cazul oțelurilor austenito-feritice, comportarea acestora la deformare este diametral opusă, respectiv creșterea plasticității este cu atât mai mare cu cât faza α este în cantitate mai mică.

Aceste efecte se datorează rezistenței diferite la deformare a feritei și austenitei, limita de curgere a feritei fiind considerabil mai mică decât a austenitei. De asemenea, acești doi constituenți ai oțelurilor inoxidabile se lătesc, se ecruesează și recrystalizează în mod diferit. Astfel, austenita se ecruesează mai rapid și recrystalizează mai încet decât ferita. Toate acestea conduc la o neuniformitate a deformării în masa oțelului, la apariția de tensiuni interne și, în final, prin modificări ale compactității materialului, la scăderea plasticității acestuia. Dacă se admite, de exemplu, plasticitatea unui oțel inoxidabil monofazic - feritic sau austenitic - ca fiind de 100 unități, plasticitatea oțelurilor bifazice se va modifica în funcție de proporția feritei și austenitei din structură, conform celor prezentate în figura 6.3. În general se consideră că plasticitatea este acceptabilă din punct de vedere tehnologic, dacă în oțelurile feritice sau austenitice cealaltă fază - γ , respectiv, α - nu depășește conținuturi de 20%.

În cazul oțelurilor ferito-austenitice, creșterea temperaturii de încălzire înainte de laminare, conduce la mărirea cantității de ferită și micșorarea cantității de austenită. astfel încât plasticitatea acestor oțeluri crește, comportarea lor apropiindu-se mai mult de cea a oțelurilor monofazice.

Ca și în cazul oțelurilor ferito-austenitice, în cazul oțelurilor austenito-feritice creșterea temperaturii de încălzire conduce la mărirea cantității de fază feritică, dar în acest caz efectul este contrar, respectiv plasticitatea oțelurilor scade, acestea devenind bifazice. Pe acest considerent oțelurile austenito-feritice se laminează la temperaturi relativ scăzute, de circa 1100...1150 °C. La temperaturi sub 950 °C și la durate de menținere mai îndelungate, este posibilă apariția unei a treia faze σ , care reduce substanțial plasticitatea. Din această cauză temperatura de sfârșit de laminare a oțelurilor austenito-feritice nu se recomandă să fie mai mică de 950...925 °C.

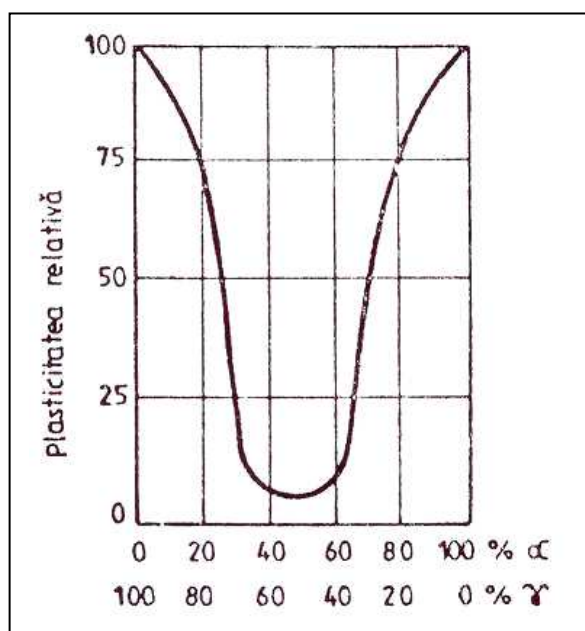


Fig. 6.3. Variația plasticității oțelurilor inoxidabile în funcție de proporția dintre ferită și austenită.

Conținutul de fază α în oțelurile austenito-feritice depinde, în special, de compoziția chimică a acestora. Astfel, pentru unul și același conținut de nichel, cantitatea de fază α se mărește o dată cu creșterea conținutului de crom din oțel, iar pentru unul și același conținut de crom, cantitatea de fază α este cu atât mai mică, cu cât cantitatea de nichel este mai mare. În general, se admite că proporția cea mai favorabilă de fază α în oțelurile Cr-Ni apare atunci când raportul dintre conținutul de crom și cel de nichel este mai mic de 1,8.

Cantitatea de fază α depinde, de asemenea și de alte elemente alifagene cum sunt titanul, siliciul sau aluminiul.

Oțelurile inoxidabile austenitice, cu fază în exces, pot fi deformate prin laminare cu rezultate foarte bune. Eventualele crăpături care apar în timpul laminării se datorează în special calității nesatisfăcătoare a lingourilor, încălzirii la temperaturi foarte ridicate sau laminării cu lățire liberă; oțelul inoxidabil austenitic prezentând lățire mare la laminare, apar tensiuni de întindere pe muchiile laminatelor care sunt generatoare de fisuri și crăpături.

Plasticitatea acestor oțeluri cu conținut mic de fază α este foarte bună, atingând valori de până la 80% la 1250°C.

Fazele în exces la aceste oțeluri inoxidabile austenitice, sub formă de carburi sau combinații intermetalice, sunt situate de obicei pe limitele grăunților, iar plasticitatea acestor oțeluri este determinată de cantitatea și de starea fazelor, care prin încălzire se modifică atât cantitativ cât și calitativ, dizolvându-se sau precipitând în și din soluția solidă cu modificări corespunzătoare ale plasticității oțelului.

În general, scăderea concentrației fazelor în exces conduce la creșterea plasticității oțelului, iar când fazele intermetalice formează prin precipitare rețele pe limitele grăunților, plasticitatea oțelului se înrăutățește vizibil.

Oțelurile feritice, ca oțeluri monofazice, nu prezintă transformări în punctele critice, iar prin încălzire nu se produce decât o creștere a granulației mult mai accentuată decât la oțelurile monofazice austenitice (fig.6.4), ceea ce

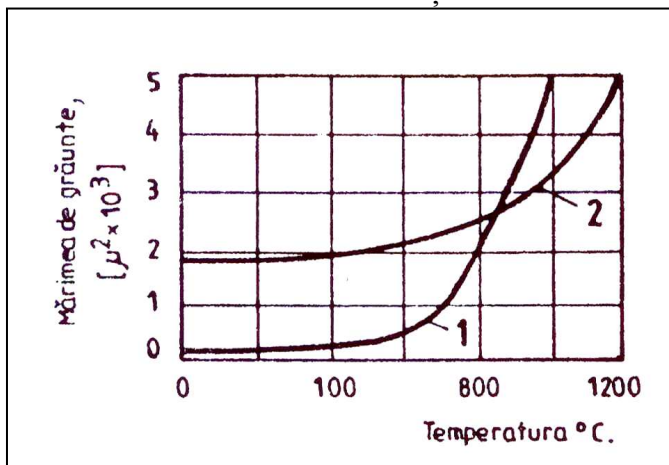


Fig. 6.4. Variația mărimii de grăunte în cazul unui oțel feritic (1) și a unui oțel austenitic (2) în funcție de temperatură.

conduce la proprietăți mecanice scăzute, devenind chiar un material fragil în cazul creșterii exagerate a granulației. Acest fenomen este cu atât mai pregnant cu cât produsul laminat are dimensiuni mai mari și temperatura în timpul deformării se menține la valori ridicate. Oțelurile feritice, fiind monofazice, corectarea structurii caracterizată de granulație mare nu este posibilă prin tratament termic și, de aceea,

trebuie asigurate condiții optime de laminare, în vederea obținerii unei granulații fine, care să asigure proprietățile mecanice cerute.

Oțelurile martensitice, într-un anumit interval de temperaturi, prezintă o structură austenitică și, ca atare, laminarea se poate realiza fără dificultăți. La trecerea oțelurilor în stare bifazică, plasticitatea acestora scade, deci încălzirea trebuie făcută la temperaturi pentru care oțelurile sunt monofazice.

Din aceleași considerente, temperatura de sfârșit de laminare trebuie să fie mai mare decât temperaturile de transformare. Astfel, temperatura de sfârșit de laminare va fi mai scăzută la oțelurile cu conținut mai mic de carbon și anume va fi de circa 850 °C și mai ridicată la oțelurile cu conținut mai mare de carbon, în acest caz fiind de circa 925°C.

Oțelurile ferito-martensitice apar după răcirea în aer, iar la temperaturi ridicate ele sunt bifazice, ceea ce determină reducerea plasticității. Ca atare, laminarea acestor oțeluri se va realiza într-un interval foarte îngust de temperaturi de deformare și anume 1250 ...1100°C.

Formarea martensitei prin răcire în aer, după laminarea la cald, mărește duritatea oțelului, îngreunează procesul de decapare și accentuează tendința acestor oțeluri de a forma crăpături și fisuri la rece.

6.3. PARAMETRII TEHNOLOGICI DE LAMINARE

Comparativ cu oțelurile nealiate sau slab aliate, oțelurile inoxidabile se comportă diferit la prelucrarea prin laminare la cald sau la rece, în funcție de regimul de temperaturi și de gradul reducerilor parțiale sau totale. Pentru a se asigura o calitate corespunzătoare laminatelor finite (table, profiluri, țevi etc.), este obligatoriu ca lingourile și sleburile să aibă suprafața perfect curată, lipsită de defecte. În acest scop se utilizează diferite *metode de curățire* a lingourilor, pentru îndepărtarea defectelor, cum sunt:

- frezarea la cald cu mașini speciale, care prelucrează toate cele patru fețe la cald, cu un ritm de 12...13 lingouri pe oră;
- flamarea, pentru îndepărtarea defectelor continue de adâncime mică;
- curățirea cu dălți pneumatice, pentru eliminarea defectelor locale;
- curățirea cu materiale abrazive, pentru îndepărtarea defectelor mici de suprafață ale lingourilor și semifabricatelor laminate; se utilizează pietre din electrocorindon sau carborund cu liant ceramic, curățirea făcându-se pe mașini manuale, semiautomate sau automate.

Se mai folosesc procedee de cojire integrală, rabotarea și frezarea, pentru care unele lingouri sau semifabricate trebuie, în prealabil, recoapte.

Încălzirea lingourilor și semifabricatelor din oțeluri inoxidabile se efectuează în cuptoare similare celor folosite la încălzirea oțelurilor slab aliate care pot fi electrice, sau cu păcură sau gaz. Încălzirea electrică poate fi cu rezistență, prin trecerea curentului direct prin lingou sau cu inducție. La cuptoarele care au încălzirea cu păcură sau cu gaz este necesar să se controleze dirijarea gazelor de combustie și atmosfera de lucru.

Oțelurile cu conținut ridicat de nichel sunt foarte sensibile față de prezența

sulfului în gaze, deoarece se pot forma sulfuri de nichel care au punctul de topire scăzut, circa 800 °C și se separă, distribuindu-se la marginile grăunților pornind de la suprafață. Prezența sulfurilor de nichel slăbește coeziunea și implicit calitățile oțelului. Atmosfera prea reducătoare în cuptor duce la carburarea oțelului, iar cea oxidantă determină decarburarea oțelului cu pierderi de crom.

La *alegerea regimului de încălzire* a lingourilor din oțeluri inoxidabile trebuie să se țină seama de o serie de factori, cum sunt: compoziția chimică și structura oțelului, rezistența la deformare la cald, tendința de supraîncălzire, tipul laminorului, greutatea și dimensiunile lingourilor, precum și de schema de laminare, de reducerea totală și de dimensiunile finale ale semifabricatului. Încălzirea se face la temperaturi de 1150...1250 °C când, rezistența la deformare fiind mică, se pot aplica reduceri mari, cu un ciclu redus de laminare. Lingourile mari cu structură feritică sau cu raportul $Cr / Ni \geq 1,8$ se încălzesc până la temperatura de 1200 °C. Cu toate acestea, blumurile și bramele laminate pot prezenta defecte de fisuri sau ruperi. Pentru a diminua acest pericol, încălzirea se face în două trepte, cu regim de palier, mai întâi la 1160...1180 °C și, al doilea palier, la 1210...1240 °C.

Oțelurile pe bază de crom au tendința de creștere rapidă a grăuntelui la temperaturi ridicate și rezistența mică la deformare la cald, astfel că trebuie încălzite lent până la temperatura de 800...900 °C, după care se încălzesc rapid până la temperatura de menținere pentru omogenizare. Pentru câteva dintre oțelurile inoxidabile standardizate în țara noastră, domeniile de temperaturi de laminare sunt: 1200...900 °C pentru oțelul 40Cr130, 1250...900 °C pentru 2NiCr185 și 1250...950 °C pentru oțelurile 20MoNiCr175 și 10TiNiCr180, în care prima temperatură, din fiecare domeniu, este temperatura de început de laminare, iar cea de a doua este temperatura de sfârșit de laminare.

La *încălzirea sleburilor* din oțeluri inoxidabile în vederea laminării trebuie să se asigure: încălzirea omogenă și la temperatura prescrisă; uniformizarea regimului de lucru în cazul alimentării laminorului de la mai multe cuptoare, astfel încât diferențele de temperatură dintre două brame de la cuptoare diferite să nu fie mai mare de 10...15 °C; urmărirea temperaturii în cuptor și după prima trecere la laminor, după îndepărtarea oxizilor; la oprirea accidentală a laminorului trebuie redusă temperatura pentru a nu se deteriora semifabricatul.

Laminarea lingourilor din oțeluri inoxidabile în blumuri sau în sleburi se execută respectând următoarele condiții:

- la stabilirea schemelor de laminare se aleg reduceri mai mici pe treceri și, implicit, se mărește numărul de treceri comparativ cu oțelurile nealiate sau slab aliate, deoarece oțelurile inoxidabile au rezistența la deformare mai mare;
- laminarea trebuie să se desfășoare în ritm alert, pentru reducerea pierderilor de căldură și asigurarea temperaturii ridicate de sfârșit de laminare;
- manipularea lingourilor în și din cuptor se va realiza în ritm intens pentru evitarea pierderii temperaturii prescrise.

În general, forțele de laminare pentru deformarea la cald a oțelurilor aliate sunt, la aceleași reduceri de secțiune, mai mari cu 25...250 % decât cele pentru

laminarea la cald a oțelurilor nealiat. Schemele de laminare se întocmesc pentru degroșarea lingourilor în mod similar cu cele pentru oțelurile nealiat, pe baza calculului forțelor și momentelor admisibile pentru utilajul respectiv de laminare, unghiului de prindere și proprietăților de plasticitate ale oțelului respectiv, corelate cu temperaturile de maximă deformabilitate. Determinarea plasticității se va face pe șarjă sau, cel puțin, pe marcă în mod statistic, pentru a avea parametrii cât mai bine controlați.

Tăierea capetelor și debitarea la dimensiuni a semifabricatelor laminate se face încă în stare caldă, la 850...800 °C, imediat după laminare. Laminoarele moderne de semifabricate sunt dotate cu foarfece puternice acționate hidraulic sau electromecanic, amplasate în fluxul de laminare. Semifabricatele din oțeluri inoxidabile austenitice și feritice se răcesc în stive, în aer, iar cele din oțeluri inoxidabile martensitice se răcesc încet în cuptoare speciale sau în gropi amenajate pentru răcire lentă, de obicei până la temperatura de 300 °C.

Laminarea țaglelor și profilurilor. Blumurile din oțeluri inoxidabile se laminează în țagle și în profiluri grele. Din țaglele pentru relaminare se obțin, în continuare prin laminare, profiluri mijlocii și profiluri mici.

Pregătirea blumurilor și țaglelor pentru laminare este necesară pentru toate tipurile de oțeluri inoxidabile. La laminare este necesar să se țină seama că lățirea oțelurilor inoxidabile este mult mai mare decât lățirea oțelurilor nealiat și, când aceasta nu este stăpânită, apar suprapuneri pe laminat. Pentru aceasta se poate asigura câte un calibraj pentru fiecare marcă de oțel inoxidabil, luându-se și măsuri deosebite pentru menținerea temperaturilor în limite stricte, în paralel cu limitarea elementelor alfa-gene în domeniile admise pentru marca respectivă.

După laminare, țaglele și profilurile din oțeluri austenitice și feritice se răcesc repede în aer, iar cele din mărci de oțeluri martensitice se răcesc lent în gropi acoperite, cu posibilități de control a temperaturii. Laminele se tratează termic pentru îmbunătățirea proprietăților mecanice și se decapează, iar la unele se îmbunătățește aspectul prin rectificare.

Laminarea la cald tablelor și benzilor. Sleafurile din oțeluri inoxidabile ajustate, curățate și fără defecte se încălzesc pentru laminare în *table groase*, la temperaturi din intervale foarte înguste și, în general, se laminează pe agregatele folosite la laminarea oțelurilor nealiat însă, având în vedere rezistențele la deformare mai mari, sunt necesare și forțe și momente mai mari. Sunt necesare deci, alte regimuri de încălzire, supravegherea cu atenție și, bineînțeles, alte scheme de laminare.

După laminare, tablele groase sunt îndreptate, răcite și ajustate sau trecute direct, fără ajustare, la tratamentul termic, de obicei de recoacere. Decaparea chimică se realizează în bazine cu soluții acide, dispunându-se de instalații speciale pentru manipulare sau se face tratament în băi de săruri topite bioxid și hidroxid de sodiu).

Laminarea la cald a *benzilor* din oțeluri inoxidabile cu grosimi finite de 3...6 mm se execută din sleburi, utilizându-se laminoare continue, semicontinue sau de tip Steckel cu caje cuarto reversibile și cu înfășurare în cuptoare.

Laminoarele continue pentru benzi late laminate la cald, utilizare și pentru

oțeluri inoxidabile sunt, în majoritate, pentru lățimi de 1600...1700 mm dar, pentru table și benzi mai late se utilizează și laminoare cu lungimea tăbliei de 2500 mm. Laminarea oțelurilor inoxidabile pe laminoare de benzi late la cald continue și discontinue se execută pe loturi condiționate de durabilitatea cilindrilor. Capacitatea mare de producție a acestor laminoare, complexitatea și volumul mare de investiții au impus îmbinarea programelor de fabricație ale oțelurilor inoxidabile cu cele slab aliate sau nealiate pe aceleași laminoare continue sau semicontinue. Deosebiri între cele două tehnologii de fabricație sunt, așa cum s-a văzut, în privința dotării, numai în sectorul de pregătire a sleburilor, în sectorul de încălzire a sleburilor și în sectorul de ajustaj și de tratament termic.

Laminarea la rece a tablelor și benzilor din oțeluri inoxidabile, la grosimi de max.3 mm, se efectuează pe utilaje și instalații speciale, similare în principiu cu cele pentru oțeluri obișnuite, dar care prezintă următoarele particularități:

- dimensionarea corespunzătoare eforturilor de laminare, impusă de rezistența la deformare a acestor oțeluri;

- sisteme de reglare cu viteze mari, adecvate schemelor de laminare specifice;

- amplasarea în planul de ansamblu, corespunzătoare fluxului tehnologic, cu depozitări interfazice și cu posibilitatea repetării laminării, tratamentului termic și decapării, pentru cât mai multe scheme tehnologice specifice.

Tehnologia de laminare la rece a tablelor și benzilor din oțeluri inoxidabile este diferită pentru oțelurile austenitice față de cele feritice sau martensitice. Pentru laminarea la rece a benzilor din oțeluri inoxidabile *austenitice* se parcurg următoarele etape:

- alimentarea cu benzi în rulouri laminate la cald, cu grosimi ale benzii de 3,0...4,5 mm sau, în mod excepțional, cu grosimi de 6,0 mm;

- pregătirea rulourilor prin sudare cap la cap a două sau mai multe rulouri și sudarea la capetele rulourilor obținute a 8...30 m bandă din oțel nealiat care se va îndepărta după ultima reducere;

- tratamentul termic de călire într-un cuptor continuu orizontal cu răcire cu abur, aer și apă, urmat de decaparea mecanică și chimică;

- prima laminare la rece pe un laminor continuu sau pe o cajă cuarto reversibilă sau policilindrică; reducerea totală este de maximum 75 % (pentru oțeluri feritice maximum 80 %), cu reduceri pe treceri de circa 20 %;

- tratamentul termic de călire și decaparea după prima laminare la rece, pe aceeași linie continuă de mai sus sau pe o linie similară;

- a doua laminare la rece, similară celei menționate, obținându-se grosimea minimă de 0,4...0,5 mm; obținerea grosimilor mai mici de 0,4 mm, se realizează prin a treia sau a patra laminare la rece după alte etape de tratamente termice de călire urmate de decapări;

- tratamentul termic final - recoacerea lucioasă – într-o linie continuă, combinată, prevăzută cu degresare în tricloretilenă, cuptor vertical cu gaz de protecție și zonă de răcire dirijată, decaparea în amestec de acizi, spălare, uscare, debitare și înfășurare cu hârtie de protecție între spire; tratamentul termic poate

fi realizat și într-o linie de călire de la temperatura de 1100...1150 °C (încălzire fără atmosferă de protecție) urmată de decapare;

- dresarea cu reducerea de 1...2 % pe un laminor de dresare cu cajă cuarto, pentru asigurarea planeității benzii și îmbunătățirea rezistenței mecanice;

- tăierea în table sau fâșierea în benzi, sortarea, lustruirea, polizarea, ambalarea și expedierea.

La laminarea benzilor din oțeluri *feritice și martensitice*, alimentarea cu benzi laminate la cald și pregătirea rulourilor este similară cu cea pentru oțeluri austenitice. Tratamentul termic în cuptoare clopot monostivă constă în recoacere sub atmosferă de protecție la temperatura de 760...780 °C cu răcire lentă pentru oțelurile martensitice și cu răcire rapidă în domeniul 400...500 °C, pentru oțelurile feritice.

Decaparea mecanică și chimică se poate face în instalații separate sau în aceeași linie continuă, combinată, de tratament termic și decapare pentru oțelurile austenitice cu trecerea prin cuptor la o temperatură mai joasă.

Laminarea la rece se execută cu tratamente termice și decapări intermediare. Tratamentul termic final, dresarea, tăierea, sortarea, lustruirea, ambalarea și expedierea sunt similare oțelurilor austenitice.

Laminarea la rece a benzilor *subțiri și foarte subțiri*, de 0,05...0,5 mm, din oțeluri inoxidabile este posibilă datorită apariției laminoarelor *policilindrice* cu 6, 12 și 20 de cilindrii, de tip Sendzimir. Față de celelalte laminoare pentru laminarea la rece, laminoarele policilindrice prezintă următoarele avantaje:

- prinderea la laminare este asigurată la unghiuri mari și reduceri mari pe treceri, comparativ cu reducerile care se realizează la o cajă cuarto;

- este posibilă laminarea oțelurilor cu rezistență mare la deformare până la grosimi foarte mici, datorită diametrului mic al cilindrilor de lucru cu deformări elastice aproape inexistente;

- rigiditatea laminorului este mare, cu cadru complet închis, cu evitarea bombamentului profilului transversal al benzii;

- se asigură o calitate superioară, dimensională și ca aspect, al suprafeței benzilor laminate pe aceste laminoare.

Laminoarele policilindrice permit realizarea de reduceri pe treceri mult mai mari decât cajele cuarto, întocmirea de scheme de laminare cu mai puține treceri și simplificarea operațiilor intermediare cu o productivitate mai mare la aceeași viteză de laminare.

Cilindrii de lucru ai laminoarelor policilindrice sunt de diametre foarte mici, 28...60 mm și se realizează din oțeluri aliate cu crom, având durități de circa 60...62 HRC. Ungerea în timpul laminării se face cu ulei mineral, recirculat pentru răcire și purificare. Cele mai răspândite laminoare policilindrice sunt cele cu o cajă reversibilă cu 12 și cu 20 cilindrii.

Laminoarele policilindrice pot fi amplasate singulare sau în trenuri continue de până la patru caje, în linie sau suprapuse pe două nivele cu câte două caje, condiționate fiind de procesul de fabricație, de reducerea totală și de capacitatea de producție a sectorului respectiv de laminare.

LAMINAREA OȚELURILOR PENTRU ELECTROTEHNICĂ

În funcție de conținutul în siliciu, de proprietățile magnetice și de proprietățile electrice, oțelurile pentru electrotehnică se produc cu grăunți orientați sau cu grăunți neorientați. Conform STAS 11508-89 oțelurile cu grăunți neorientați se realizează în trei mărci de oțeluri pentru electrotehnică și anume M43, M45 și M47B, cu grosimi de 0,5...0,65 mm și, conform STAS 11526-80, oțelurile cu grăunți orientați se produc în alte trei mărci de oțel și anume FeM 89, FeM 97 și FeM 111, cu grosimi de 0,27, 0,30 și 0,35 mm.

Conținutul în siliciu al oțelurilor electrotehnice variază între 0,8...4,8%. În general, oțelurile care conțin sub 3 %Si se folosesc pentru mașini electrice de puteri mici și medii, iar oțelurile cu peste 3 %Si se folosesc la mașini electrice de puteri mari și transformatoare electrice.

Siliciul în oțel mărește rezistența și scade pierderile magnetice, asigurând în același timp, formarea unor grăunți mari, care îmbunătățesc proprietățile magnetice ale benzilor laminate.

Plasticitatea la cald a oțelurilor silicioase se consideră bună dacă raportul $\%Mn / \%S = 23...30$, respectiv 0,14...0,15 %Mn pentru 0,005...0,006 %S. La valori mai mici ale acestui raport, oțelul s-a dovedit insuficient de plastic și, ca atare, în timpul laminării au apărut crăpături pe marginea semifabricatului.

O plasticitate nesatisfăcătoare la aceste oțeluri se datorează și unei dezoxidări insuficiente în timpul elaborării. Se consideră de asemenea că o plasticitate scăzută la aceste oțeluri este cauzată și de o structură nefavorabilă la temperatura de deformare. Astfel, existența celei de-a doua faze (α) în structura austenitică a oțelului duce la scăderea plasticității, cu atât mai mult cu cât și conținutul fazei în exces este mai mare. Oțelurile silicioase cu 0,05...0,08% C și cu un procent mai mic de 1,8 %Si sunt alcătuite, în intervalul de temperaturi de 950...1250°C, numai din austenită, iar oțelurile cu peste 1,8%Si au o structură austenitică, cu un conținut de fază α direct proporțional cu concentrația de siliciu.

Această compoziție structurală este influențată la temperatura de laminare și de concentrația carbonului, manganului, aluminiului, etc. Oțelurile silicioase pentru transformatoare au procentul de siliciu spre valoarea maximă a intervalului recomandat, au structura feritică cu o plasticitate bună, care însă scade odată cu creșterea concentrației austenitei ca fază în exces.

Indiferent de tipul oțelului silicios, cantitatea de austenită din structură crește pe măsură ce procentul de carbon este mai ridicat (același efect se

întâlnește și pentru mangan, nichel sau aluminiu) și temperatura de laminare este mai mare.

Deci motivul principal al scăderii plasticității oțelurilor electrotehnice este creșterea concentrației austenitei în baza feritică a oțelurilor de transformator și a feritei în baza austenitică a oțelului de dinam.

Plasticitatea la rece a acestor oțeluri este importantă deoarece produsul finit este reprezentat de benzi subțiri care se obțin, în final, numai prin laminare la rece.

În general oțelurile silicioase au plasticitatea scăzută la rece (fiind chiar fragile), scăderea fiind accentuată de creșterea conținutului de siliciu, în special la concentrații de peste 3,5 %, care de obicei sunt dorite ca urmare a proprietăților magnetice importante asigurate de creșterea procentului de siliciu.

Plasticitatea oțelurilor silicioase, cu un procent de siliciu mare scade și ca urmare a saturării structurii cu hidrogen în timpul procesului de decapare. Acest fenomen poate fi însă contracarat prin încălzirea după decapare a oțelului la 100...200 °C, prin care este favorizată degajarea hidrogenului și restabilirea proprietăților plastice ale oțelului.

O altă cauză a fragilității oțelurilor silicioase este separarea cementitei structural libere pe limitele grăunților, cât și arderea carbonului în cursul încălzirii, laminării la cald sau a recoacerilor după deformarea la rece a oțelului. Acest fenomen se poate evita prin recoaceri repetate în vid la 800...900°C, care au ca efect arderea în continuare a carbonului și dispariția cementitei structural liberă sau trecerea carbonului din cementită în grafit. Prin acest tratament plasticitatea oțelului silicios devine satisfăcătoare.

În ceea ce privește *rezistența la deformare* a oțelurilor silicioase, valoarea acesteia crește odată cu mărirea conținutului de siliciu, ajungând pentru oțelurile cu peste 3 %Si la de 1,4...1,45 ori mai mare decât a oțelurilor nealiate de tip OLC 08.

Fluxul tehnologic de procesare a benzilor subțiri din oțel silicios cuprinde următoarele faze (oțel cu 2,9...3,8 % Si pentru transformatori):

- încălzirea în vederea laminării la slebing cu o viteză de 40 °C / h până la 1000°C și de 60 °C / h în continuare până la 1250 °C;

- menținerea în cuptorul adânc timp de 1,5...2,5 ore în funcție de temperatura lingourilor la introducerea în celulele cuptoarelor adânci, pentru a se asigura și o decarburare a oțelului; carbonul, pe lângă scăderea plasticității reduce și permeabilitatea magnetică a oțelului, mărindu-i în același timp forța coercitivă;

- laminarea la slebing, fără răcirea cilindrilor cu apă, până la o temperatură de sfârșit de laminare de minimum 900 °C, aplicându-se reduceri moderate de 40...65 mm pe treceri ($\lambda_{med} = 1,15$), până la grosimea finală de 150 mm;

- răcirea lentă, în termostate, a sleburilor;

- îndepărtarea defectelor de suprafață;

- încălzirea sleburilor la 1250°C, în vederea laminării lor în benzi;

- laminarea pe laminorul de benzi la cald sau pe caja Stekel (cu rulourile

amplasate în cuptoare), până la grosimi de circa 2...2,8 mm și o temperatură de sfârșit de laminare de 780...800 °C;

- recoacerea neagră efectuată la 760...850 °C (fără atmosferă de protecție pentru a se continua decarburare oțelului);

- decaparea în condiții obișnuite, folosind soluție de acid sulfuric;

- laminarea la rece cu $\epsilon_{\text{tot}} = 60...70 \%$, pe un laminor continuu sau folosind doar o singură cajă cuarto, cu aplicarea de reduceri descrescătoare pe treceri în intervalul 50...10 %;

- recoacerea intermediară albă, la 750...850 °C, executată în cuptoare cu insuflare de gaz de protecție (H_2), urmată de răcire tot cu gaz de protecție. În aceste condiții procentul de carbon scade la 0,004...0,008 %C;

- laminarea la rece până la dimensiunea finală a benzii, cu un coeficient total de alungire $\lambda_{\text{tot}} \sim 50\%$ la o cajă policilindrică cu 20 cilindrii;

- recoacerea finală în vid la 1140...1180 °C și răcirea tot în vid până la 600°C, pentru creșterea granulației benzii. În prealabil suprafața benzii se acoperă cu talc sau oxid de magneziu, pentru a se evita lipirea spirelor, ca urmare a temperaturii ridicate la care se efectuează tratamentul termic;

Prin laminarea la rece se realizează texturarea benzii, astfel încât se produce o valoare mai mică a pierderilor prin histerezis și, respectiv, valori mai mari ale inducției magnetice pe direcția de laminare decât cele ale benzii semifabricat laminate la cald. De asemenea, creșterea valorilor proprietăților magnetice ale benzilor laminate la rece se datorează și dimensiunilor mari ale grăunților de ferită, care se obțin în urma tratamentului termic de recoacere la temperatură înaltă.

Din punctul de vedere al texturii realizate, oțelurile electrotehnice sunt de două tipuri, prezentate schematic în figura 7.1. În cazul oțelurilor electrotehnice cu textură Goss, caracterizată de planul cristalografic (110) în planul benzii și cu muchia cubului [100] pe direcția de laminare, proprietățile magnetice depind și de direcția de măsurare, valoarea maximă a inducției magnetice și minimă a pierderilor fiind deci pe direcția de laminare, iar în cazul oțelurilor cu textură cubică, la care planul bazal al cubului (100) este dispus în planul benzii și muchia cubului [100] pe direcția de laminare, proprietățile magnetice nu depind de direcția de măsurare (izotropie a proprietăților).

În cazul oțelurilor electrotehnice pentru mașini electrice (oțeluri de dinam), care au sub 1,8 %Si, se aplică o singură etapă de laminare la rece (fără recoacere intermediară), cu reduceri totale de până la 80 %, de preferat pe un laminor continuu.

De asemenea, recoacerea neagră aplicată benzii semifabricat laminată la cald nu se mai efectuează, iar recoacerea după laminarea la rece are loc la 850°C sub atmosferă de protecție ($N_2 + H_2$ până la 40%), iar în final se mai execută o trecere de laminare la rece pe o cajă cuarto cu reducerea de 4...5 %.

Banda finită se acoperă cu soluție de oxid de magneziu (ca și în cazul oțelului de transformator) și se efectuează tratamentul de recoacere la temperaturi înalte de 800...900 °C, folosindu-se și în acest caz gaz de protecție.

Atât la banda de oțel pentru transformatoare, cât și la cea pentru motoare,

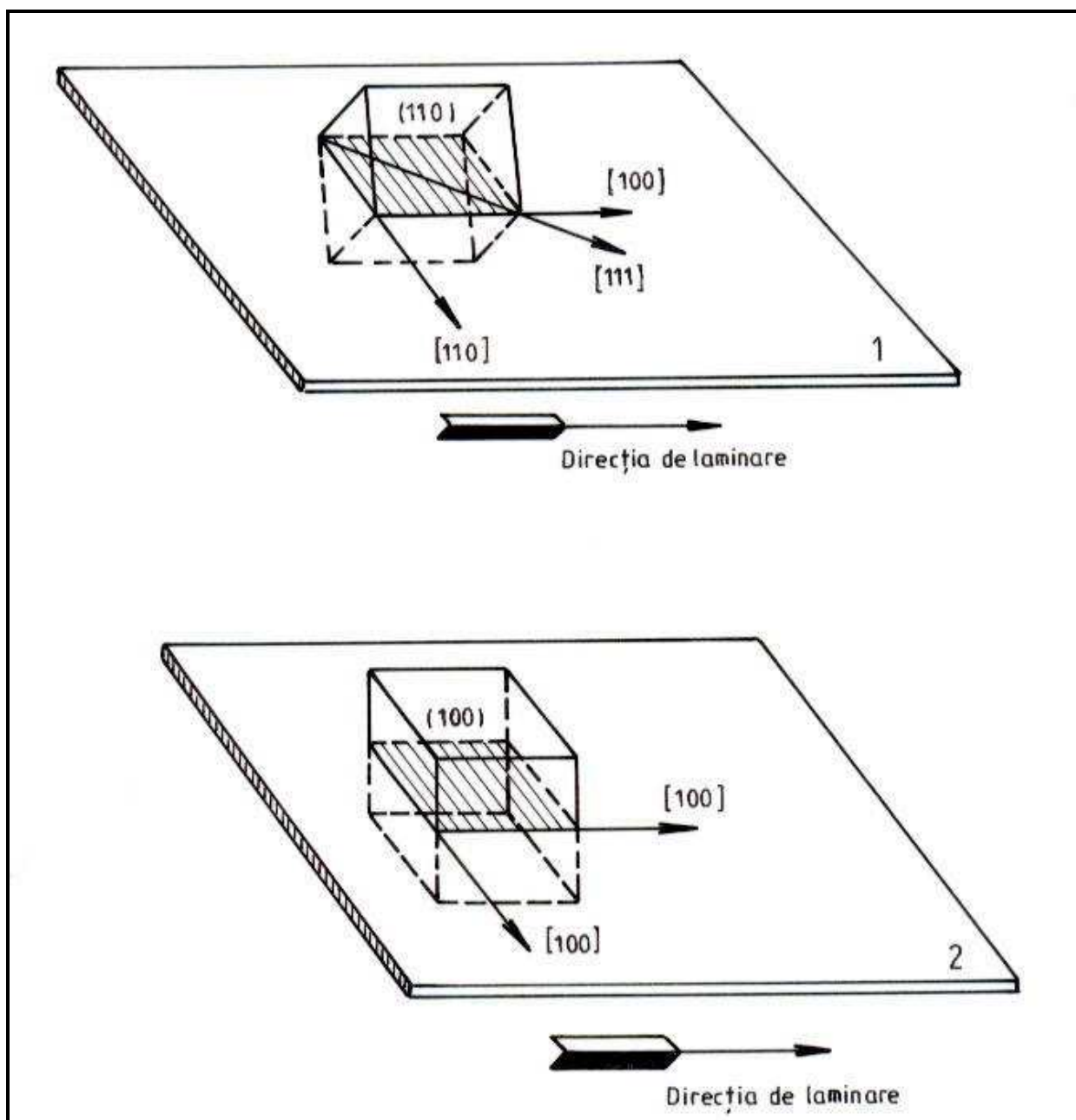


Fig. 7.1. Textura Goss (1) și textura cubică (2)
la oțelurile electrotehnice.

după recoacerea înaltă se curăță suprafața de oxidul de magneziu aplicat pentru protecție împotriva lipirii spirelor și se aplică o peliculă de izolație electrică, folosindu-se un agregat continuu, care depune o soluție de acid fosforic și silicat de magneziu, soluție care se usucă ulterior într-un cuptor continuu orizontal.

În standardul românesc de oțeluri electrotehnice cu grăunți orientați nu se prezintă compoziția chimică a acestor oțeluri. Formele și dimensiunile produselor din oțeluri electrotehnice cu grăunți orientați sunt conform cerințelor impuse de construcția aparatelor și mașinilor electrice. Oțelurile electrotehnice cu grăunți orientați se livrează sub formă de table sau benzi, cu o acoperire izolantă pe ambele fețe, în general constituită dintr-o peliculă de silicați de magneziu.

Capitolul 8

LAMINAREA UNOR ALIAJE CU PROPRIETĂȚI MAGNETICE ȘI ELECTROREZISTIVE

Aliajele cu proprietăți magnetice și electrorezistive ridicate fac parte din categoria aliajelor speciale. După denumirile comerciale, dintre aceste aliaje se menționează:

- aliajele de tip *permalloy*, care sunt caracterizate prin permeabilitate magnetică ridicată, până la 10^5 Gs/Oe și forță coercitivă mică; sunt compuse din 70...80 %Ni și 20...30 % Fe, având și adaosuri de molibden, siliciu și mangan;
- aliajele de tip *kanthal*, care sunt caracterizate de rezistivitate electrică mare, $1,35...1,45 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ și sunt compuse din 20...24 %Cr, max. 2 %Co, 4,5...6,0 %Al și restul Fe, deci este un oțel Cr-Al;
- aliajele de tip *nikrothal*, care sunt caracterizate de rezistență electrică ridicată, circa $1,1 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$; sunt compuse din 20...80 %Ni, restul fiind crom și fier.

8.1. CARACTERISTICI STRUCTURALE

Aliajele de tip permalloy, în tot intervalul de temperaturi de încălzire pentru laminare, au structura formată numai din austenită (cu fier și nichel) care, la temperatura ambiantă, este feromagnetică. Aliajele și oțelurile cu rezistivitate electrică mare sunt monofazice, cu singura diferență că aliajele Cr-Ni fac parte din clasa austenitică, iar cele Cr-Al fac parte din clasa feritică.

Aceste aliaje, în stare de turnare, sunt caracterizate de o transcrystalizare puternic dezvoltată, cristalele primare ale structurii de turnare având o mărime considerabilă și o coeziune slabă. Această structură de turnare posedă o anumită stabilitate, care se păstrează chiar și după o deformare puternică, urmată de tratamentul termic de recoacere.

Aliajele de tip kanthal sunt caracterizate de creșterea foarte intensă a grăunților la încălzirea după deformare, ca urmare a temperaturii scăzute de început de recrystalizare (700°C pentru $\varepsilon = 5...15\%$). Datorită granulației mari a aliajelor Cr-Al și coeziunii intergranulare mici, aceste aliaje au tendința de fragilizare, în special la temperaturi scăzute, respectiv la laminarea la rece.

8.2. PARAMETRII TEHNOLOGICI DE LAMINARE

Studiindu-se *plasticitatea* aliajelor permalloy la cald prin metoda laminării probelor în formă de pană, s-a constatat că aceste tipuri de aliaje au plasticitatea medie, gradul maxim de reducere, la temperaturi în jurul a 1250°C

fiind doar de 60...65 % (fig.8.1). Plasticitatea acestor aliaje depinde, în mare măsură, de conținutul în impurități. Astfel, sulfurul și oxigenul au influențe deosebit de dăunătoare asupra plasticității la cald a aliajelor permalloy.

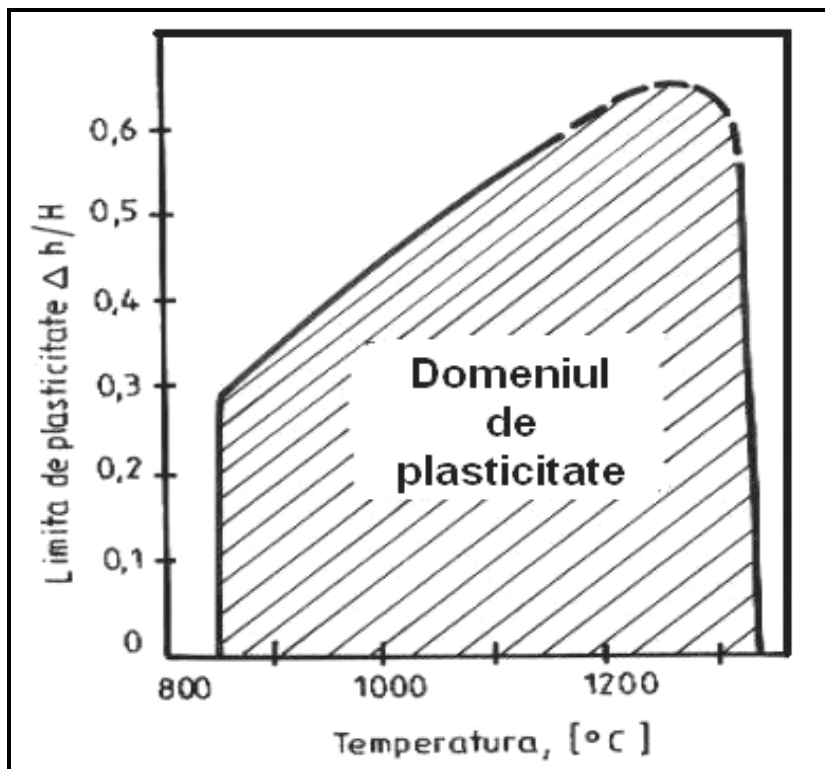


Fig.8.1. Diagrama de plasticitate a aliajului permalloy în stare turnată.

Aliajele de tip kanthal nu prezintă plasticitate ridicată, cu toate că la reduceri mari, aplicate la laminarea unei probe în formă de pană, aceasta nu prezintă fisuri. Se constată însă apariția fisurilor la reduceri mici. Această comportare la deformare nu depinde de intensitatea deformației, ci este condiționată de existența defectelor în semifabricatul turnat (înainte de deformare).

În ceea ce privește aliajul nikrothal, plasticitatea acestuia se poate considera medie, pierderea integrității structurale, respectiv apariția fisurilor la laminarea unei probe în formă de pană, are loc doar la grade de reducere de circa 60 % și la temperaturi de maximum 950 $^{\circ}\text{C}$. La temperaturi mai mari, aliajul nikrothal se laminează fără apariția discontinuităților în structură, cu grade de reducere mari, care pot să ajungă până la 70...75 %.

Rezistența la deformare. Aliajele Ni-Fe tip permalloy, fiind cu structură austenitică, au rezistența la deformare puțin mai mare decât a oțelurilor nealiat cu conținut mediu de carbon, laminate la cald. La laminarea la rece, aceste aliaje prezintă rezistență la deformare mult mai ridicată decât oțelurile nealiat.

La laminarea la cald a oțelurilor Cr-Al de tip kanthal, rezistența la deformare depinde și de gradul de reducere aplicat, fiind de 1,2...1,3 ori mai mare decât cea a oțelului nealiat tip OLC 10 (fig.8.2). Aliajele Cr-Ni (nikrothal)

posedă de asemenea rezistență la deformare mult mai mare decât a oțelurilor nealiat, laminate în condiții comparabile.

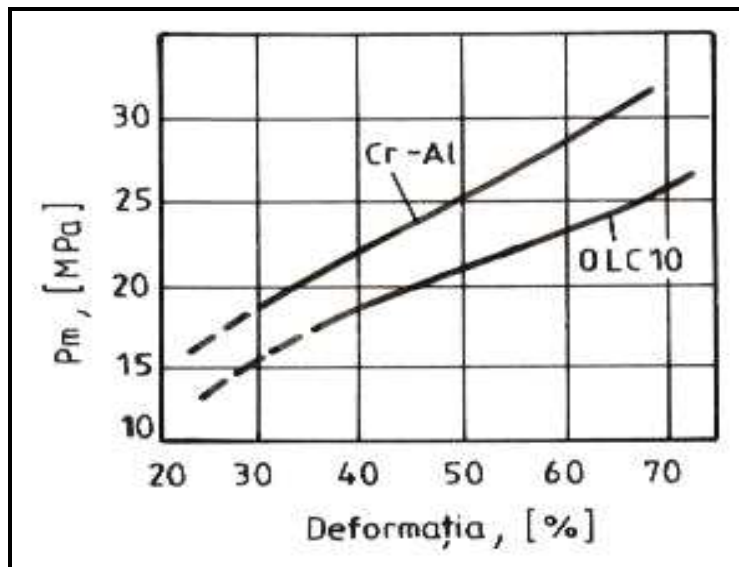


Fig. 8.2. Rezistența la deformare a unui aliaj permalloy (Cr-Al) comparativ cu cea a oțelului nealiat OLC10, la 900 °C.

Laminarea aliajelor de tip permalloy. Temperatura de încălzire a lingourilor în vederea laminării este de 1150...1200 °C, iar intervalul de temperaturi pentru laminarea la cald este cuprins între 1110...1180 °C, ca temperaturi de început de laminare și 900...800 °C, ca temperaturi de sfârșit de laminare.

Laminarea semifabricatelor obținute din lingouri se execută după încălzirea acestora la temperaturi mai scăzute (circa 1100°C). După laminarea la cald, tablele sau benzile - acestea fiind sortimentele de bază obținute din aliajul permalloy - sunt supuse tratamentului termic de recoacere de recrystalizare la temperaturi de 950...1050 °C, în funcție de calitatea aliajului, urmat de răcire în aer. În continuare, tablele sunt decapate și laminate la rece, în mai multe etape, cu tratamente termice intermediare. Reducerea totală între două tratamente termice va fi de minim 60...70 %.

Laminarea acestor aliaje se execută pe laminoare cuarto, pentru grosimi mai mari de 0,1 mm, sau pe laminoare policilindrice pentru laminarea la grosimi foarte mici (2...5 μm).

La *laminarea aliajelor tip kanthal* se ține seama de faptul că acestea posedă sensibilitate foarte mare la tensiunile interne care apar în timpul prelucrării plastice sau tratamentelor termice, aceasta fiind condiționată de conductibilitatea termică scăzută a acestor aliaje și, respectiv, de fragilitatea lor ridicată, care nu poate fi micșorată nici prin tratamentul termic de recoacere.

Pentru micșorarea sensibilității la tensiuni interne a acestor aliaje, se recomandă următoarele:

- lingourile se vor încălzi, până la temperaturi ridicate, cu viteză foarte mică de încălzire;
- pe cât este posibil, introducerea în cuptoare a lingourilor se va face numai în stare caldă;

- îndepărtarea defectelor de suprafață se va executa prin toate procedeele cunoscute, cu excepția curățirii abrazive deoarece, în zonele polizate vor apărea după decapare crăpături, ca urmare a încălzirii locale și a apariției tensiunilor termice;

- răcirea se va efectua cu viteze foarte mici.

Fragilitatea aliajelor Cr-Al în stare rece este atât de mare încât semifabricatele din acestea se sparg prin simpla cădere pe o suprafață dură. Această fragilitate va crește odată cu mărirea conținutului de aluminiu și crom în masa de fier a aliajului.

În vederea laminării la cald, lingourile cu temperatura (după solidificare) de minim 600...700 °C se introduc în cuptoarele de încălzire, unde procesul de încălzire continuă până la 1150...1200 °C, timp 3,5...4,5 h, în funcție de temperatura inițială și de masa lingoului. Blumurile obținute prin laminarea lingourilor se vor relamina în țagle, după reîncălzirea în cuptoare continue, iar în final acestea se cojesc înainte de a fi laminate în profiluri, benzi înguste sau sârmă.

Reduceri absolute aplicate la laminarea la bluming variază în limitele 35...95 mm. Reîncălzirea țaglelor, cu latura de 70...150 mm., se va executa la temperatura de 1200 °C, timp de 1...2 h. Laminarea produselor finite se efectuează folosind calibrări, care să țină seama de faptul că lățirea aliajului Cr-Al este de 1,55 ori mai mare decât cea a oțelului nealiat de tip OLC10, în special ca urmare a trecerii suprafețelor laterale pe suprafața de contact a laminatului, lățirea pe suprafața de contact Δb_k fiind neglijabilă (fig.8.3).

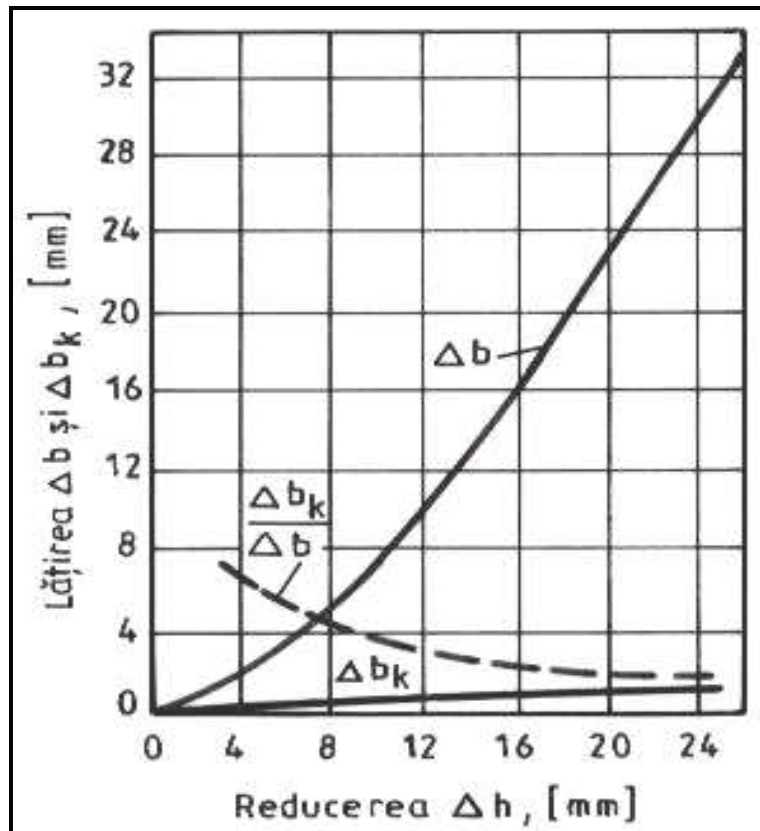


Fig. 8.3. Variația lățirii Δb a aliajului Cr-Al în funcție de reducerea absolută Δh la 1095 °C;
 Δb_k - lățirea pe suprafața de contact

Răcirea după laminare se va face foarte încet, tot datorită sensibilității oțelului la tensiuni interne, în acest caz de natură termică, folosindu-se termostate în care laminatele finite se mențin până la temperaturi de circa 100...150 °C. Această răcire lentă, care durează de obicei 24...36 ore, poate fi înlocuită cu recoacerea izotermă. Pentru aceasta, laminatele se introduc în cuptor la temperatura de minimum 600 °C, se încălzesc la 840...860 °C, se mențin la această temperatură minimum 8 ore și, după aceasta, răcirea se face cu cuptorul până la 200 °C, în minimum 24 ore, în funcție de mărimea încărcăturii.

Laminarea aliajelor de tip microthal. Aceste aliaje se deformează la cald mult mai ușor prin laminare, decât prin forjare.

Comportarea acestor aliaje la deformarea plastică depinde nu numai de temperatura de încălzire ci și de condițiile încălzirii. Astfel, pentru o bună deformabilitate la cald, se recomandă încălzirea semifabricatelor din aliaje tip microthal până la temperatura de 1180...1220 °C, urmată de răcire până la temperatura de început de laminare de 1050...1100 °C.

Temperatura de sfârșit de laminare recomandată este, în general, relativ ridicată, situându-se în intervalul 950...990°C. Rezultă de aici că, pentru aceste aliaje speciale, de tip microthal, intervalul de temperaturi pentru laminare este foarte îngust.

O influență deosebit de dăunătoare asupra plasticității acestor aliaje o are și atmosfera cuptoarelor de încălzire, în special atunci când gazele de ardere au un conținut ridicat de sulf, prin producerea fragilității la roșu a aliajului. Pentru preîntâmpinarea fragilității la roșu a acestor aliaje, în special când au un conținut ridicat de nichel, nu se va admite arderea combustibilului direct pe suprafața semifabricatelor încălzite la temperaturi ridicate.

Laminarea se efectuează, în general, din semifabricate cu secțiunea relativ mică, obținute prin forjare din lingouri cojite. Dacă lingourile nu se cojesc, obligatoriu se vor coji semifabricatele forjate înainte de a fi laminate.

Laminarea acestor materiale este mult mai dificilă decât laminarea altor aliaje înalt aliate, în special datorită dificultăților care apar la prinderea metalului între cilindrii și a supraumplerii calibrelor, ca urmare a lățirii foarte mari ce apare la aceste tipuri de aliaje, mai mare cu 60% decât a oțelurilor nealiate.

După laminarea la cald, răcirea acestor aliaje de tip Cr - Ni cu rezistivitate electrică mare, se realizează în aer.