

LAMINAREA MATERIALELOR METALICE SPECIALE

Partea I-a:

CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND PROCESUL TEHNOLOGIC DE LAMINARE A OȚELURILOR ALIATE

Capitolul 1	Noțiuni de bază referitoare la constituția și structura oțelurilor aliate destinate laminării.....	9
1.1.	Constituția fizico-chimică a oțelurilor ca aliaje fier-carbon.....	10
1.2.	Delimitarea tehnologică între aliajele fier-carbon deformabile (oțeluri) și cele nedeformabile (fonte).....	16
1.3.	Efectele proprietăților și proporției fazelor constitutive din oțeluri asupra rezistenței la deformare a acestora.....	19
1.4.	Efectele ereditare ale structurii lingourilor de oțel asupra proprietăților produselor laminate.....	24
1.5.	Influențe generale și specifice ale elementelor de aliere din oțeluri.....	27
Capitolul 2	Semifabricate și produse laminate finite din oțeluri aliate.....	41
2.1.	Semifabricate destinate laminării.....	42
2.2.	Produse laminate plate.....	43
2.3.	Produse laminate lungi.....	45
2.4.	Produse laminate tubulare.....	48
2.5.	Oțeluri aliate folosite pentru laminare.....	52
Capitolul 3	Particularitățile procesului tehnologic de laminare a oțelurilor aliate.....	61
3.1.	Considerații privind comportarea la deformare a oțelurilor aliate.....	62
3.2.	Caracteristici ale laminoarelor pentru laminarea oțelurilor aliate.....	65
3.3.	Parametrii termici și temporali ai procesului de încălzire la laminarea oțelurilor aliate.....	66
3.4.	Parametrii tehnologici ai procesului de deformare la laminarea oțelurilor aliate.....	72

Partea I-a: CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND PROCESUL TEHNOLOGIC DE LAMINARE A OȚELURILOR ALIATE

Capitolul 1

NOȚIUNI DE BAZĂ REFERITOARE LA CONSTITUȚIA ȘI STRUCTURA OȚELURILOR ALIATE DESTINATE LAMINĂRII

Utilizarea practică a materialelor metalice implică aplicarea unor procedee tehnologice de prelucrare prin care se obține forma cerută a semifabricatelor sau a produselor finite. În cursul operațiilor tehnologice efectuate în acest scop cum sunt turnarea, laminarea, forjarea, sudarea etc., se produc modificări de constituție în materialul metalic (transformări de fază) și modificări de structură (în special în structura microscopică a fazelor, dar și în structura reticulară și în macrostructura la nivelul întregului produs). Aceste schimbări de constituție și de structură determină modificări ale proprietăților materialului metalic prelucrat.

Transformările de fază, atât cele care implică schimbarea stării de agregare și care se produc la operația de turnare, cât și transformările în stare solidă care se produc în cursul deformărilor plastice și tratamentelor termice, se realizează prin deplasări ale atomilor la scara rețelei cristaline, prin anumite mecanisme care determină viteza transformării și caracteristicile mecanice și structurale ale noilor faze rezultate prin transformare. Transformările în stare solidă care au loc în constituția și structura aliajelor, deci a materialelor metalice alcătuite din două sau mai multe specii atomice numite componenți ai aliajelor, se utilizează pentru modificarea proprietăților produselor metalice solide (semifabricate sau produse finite). În comparație cu transformările de fază de la solidificarea aliajelor, transformările fazice și structurale în fază solidă se pretează la o intervenție mult mai importantă în condițiile lor de desfășurare. Acest fapt stă la baza influențării proprietăților materialelor metalice prin diferite procedee de deformări plastice și tratamente termice.

Proprietățile mecanice, care caracterizează comportarea materialelor metalice sub acțiunea unor forțe exterioare, stau la baza celor mai importante utilizări ale acestora. În același timp, proprietățile mecanice intervin ca proprietăți tehnologice în cadrul procedeelor practice prin care se realizează forma produselor metalice, cum sunt laminarea, forjarea, așchierea ș.a.

Modificarea proprietăților materialelor metalice supuse solicitărilor mecanice depinde de tipul legăturilor interatomice, de aranjamentul structural al atomilor și de tipul și numărul imperfecțiunilor din acest aranjament. Datorită acestei dependențe de structură, proprietățile mecanice ale metalelor și aliajelor sunt foarte sensibile la efectul procedeelor de fabricație, ceea ce poate conduce la caracteristici variabile pentru unul și același material de compoziție chimică dată. Această dependență structurală a proprietăților mecanice permite o intervenție deliberată în ajustarea valorilor lor, prin alegerea unei scheme de fabricație a produsului metalic care să-i asigure acestuia proprietățile de utilizare cele mai adecvate destinației. De exemplu, chiar în cazul cel mai simplu al unui aliaj monofazic de tip soluție solidă, proprietățile mecanice de rezistență și plasticitate pot fi modificate în limite largi intervenind în gradul de aliere al soluției solide, în gradul de deformare plastică aplicat și în dimensiunea grăunților rezultată prin efectul combinat al prelucrărilor prin deformări plastice și al tratamentelor termice.

1.1. CONSTITUȚIA FIZICO-CHIMICĂ A OȚELURILOR CA ALIAJE FIER – CARBON

Fiind dată compoziția chimică a unui aliaj, diagrama de echilibru fazic indică, pentru orice temperatură, constituția fizico-chimică a aliajului, adică natura fazelor care îl alcătuiesc, compoziția acestor faze și proporția lor. În cazul în care diagrama de echilibru fazic a sistemului de aliaje conține amestecuri mecanice de cristale de faze diferite (eutectice sau eutectoide), noțiunile de fază și constituent metalografic devin distincte. În acest caz poziția compoziției aliajului pe diagrama de echilibru fazic a sistemului permite determinarea naturii și proporției constituenților aliajului.

Constituția aliajelor, stabilită pe baza diagramei de echilibru fazic, permite o serie de deducții privind proprietățile acestora, în special proprietățile mecanice. Aceste indicații date de diagrama de echilibru fazic trebuie completate cu informații privind structura aliajelor întrucât în determinarea proprietăților acestora intervine cu o pondere considerabilă și structura (perfecțiunea rețelei cristaline, structura microscopică și macroscopică). În afară de acest interes major pe care îl prezintă diagramele de echilibru fazic privind determinarea constituției aliajelor, informațiile furnizate de diagramele de echilibru fazic indică temperaturile la care se produc modificările de constituție sau transformările de fază care stau la baza proceselor de deformare plastică și tratament termic.

Cele mai importante aliaje tehnice, din punct de vedere al cantității produse și al varietății de utilizări, sunt aliajele fierului cu carbonul (oțelurile și fontele). Aliajele fierului cu alte elemente reprezintă o categorie de materiale produse în cantități mai mici decât aliajele fier-carbon, însă majoritatea dintre acestea sunt destinate unor utilizări speciale importante.

Oțelurile și fontele sunt considerate aliaje fier-carbon, deși procesele tehnologice utilizate industrial pentru obținerea lor introduc în compoziție

numeroase elemente cum sunt sulful, fosforul, manganul, siliciul, oxigenul, azotul, hidrogenul și altele, denumite *elemente însoțitoare*. Sulful și fosforul sunt impurități provenite din minereu și din cocs, manganul este introdus la elaborare în principal pentru a contracara efectele dăunătoare ale sulfului, siliciul este introdus pentru acțiunea sa dezoxidantă. Alte elemente ca, de exemplu, nichelul și cuprul apar ca elemente reziduale introduse cu fierul vechi utilizat la elaborarea oțelului. Numeroase elemente (Cr, Mo, V, Ni, Cu, Mn, Si etc.) sunt introduse intenționat în compoziția aliajelor fier-carbon pentru a influența proprietățile materialului în sensul dorit. Rezultă că oțelurile și fontele, chiar nealiate, nu sunt aliaje binare fier-carbon ci aliaje complexe. Cu toate acestea, influența impurităților normale și a elementelor de aliare (în afară de cazul când concentrația lor este considerabilă) este constantă și relativ mică asupra constituției și structurii de echilibru a aliajelor fier-carbon. Din aceste considerente diagrama de echilibru fazic a sistemului binar fier-carbon este utilizată pentru interpretarea constituției, structurii și proprietăților oțelurilor și fontelor nealiate; chiar și pentru oțelurile și fontele aliate această diagramă a sistemului binar oferă punctul de plecare pentru interpretarea constituției, structurii și a comportării la deformare plastică și la tratament termic.

1.1.1. Proprietățile fierului tehnic pur

Fierul de puritate tehnică conține aceleași elemente însoțitoare ca și oțelurile (tabelul 1.1), dar în proporții considerabil mai mici, ca rezultat al aplicării unor metode de rafinare după reducerea oxizilor: rafinare electrolitică, oxidare selectivă în stare lichidă, recoacere sau retopire în vid înaintat, topire zonală.

Tabelul 1.1

Varietăți tehnice de fier pur

Nr. crt.	Denumire	Conținut de impurități, %					
		C	Si	Mn	P	S	O ₂
1	Fier pudlat	≤ 0,02	0,15	0,03	0,12	0,02	zgură 3,00
2	Fier Armco	0,015	0,01	0,02	0,01	0,02	0,15
3	Fier carbonil	0,010	urme	-	urme	0,004	0,5
4	Fier electrolitic	0,008	0,007	0,002	0,006	0,003	-
5	Fier retopit sub vid	0,001	0,003	-	0,0005	0,0026	0,0004
6	Fier purificat prin topire zonală	suma impurităților este de ordinul ppm (1 ppm = o parte per milion = 0,0001%)					

Fierul pudlat este un amestec intim de fier relativ pur și zgură; în prezent nu mai prezintă decât un interes istoric. Fierul Armco (denumire prescurtată de la primul producător *American Rolling Mill Company*) se utilizează în electrotehnică ca material cu permeabilitate magnetică mare și pentru elaborarea anumitor oțeluri speciale.

Fierul Armco are o structură constituită în totalitate din poliedri fără macle (tipică pentru metalele cu rețea CVC); din acest punct de vedere se deosebește de oțelurile moi la care conținutul de carbon depășește valoarea de 0,02%C și, ca urmare, în structură pe lângă poliedrii de ferită apar mici cantități de eutectoid.

Fierul carbonil obținut în stare pulverulentă prin descompunerea termică a unui compus - pentacarbonilul de fier, $\text{Fe}(\text{CO})_5$ - se utilizează în metalurgia pulberilor; sinterizarea pieselor în atmosferă de hidrogen sau vid contribuie la micșorarea în continuare a conținutului de carbon, sulf, oxigen, azot din particulele de fier.

Fierul electrolitic se obține în cantități mici pentru utilizări în electrotehnică.

Fierul purificat prin topire zonală este destinat numai pentru cercetări științifice, nefiind utilizat tehnic.

Fierul pur (99,98...99,99%) are punctul de topire la temperatura de 1538°C. La încălzire și la răcire fierul suferă o serie de transformări reversibile. Transformările alotropice $\alpha \rightarrow \gamma$ la temperatura de 912°C și $\gamma \rightarrow \delta$ la temperatura de 1392°C, reprezintă particularități ale fierului, neîntâlnite la alte metale, care se explică prin variația cu temperatura a energiei libere a fierului α și δ cu rețea cristalină CVC și a fierului γ cu rețea cristalină CFC. Principala deosebire între fierul γ cu rețea CFC și fierul α sau δ cu rețea CVC este capacitatea mult mai mare a fierului γ de a dizolva carbonul în interstițiile rețelei cristaline. În cazul aliajelor fierului, elementele de aliere care stabilizează rețeaua CVC a fierului produc, peste un anumit conținut, eliminarea soluției solide γ și contopirea soluțiilor solide α și δ cu rețele CVC.

Caracteristicile mecanice și fizice ale fierului tehnic pur sunt prezentate în tabelul 1.2.

Proprietățile mecanice, fiind sensibile la structură, variază cu dimensiunile grăunților cristalini și cu puritatea; pentru fierul Armco aceste proprietăți variază între următoarele limite:

- limita de elasticitate: 80...130 MPa;
- rezistența la rupere: 150...220 MPa;
- alungirea la rupere: 40... 50%.

Constantele de elasticitate sunt insensibile la structură, dar prezintă o pronunțată anizotropie în monocristale, anizotropie care se transmite și materialului policristalin texturat.

Modulul de elasticitate longitudinal are următoarele valori:

- $E = 135\,000$ MPa în direcția $\langle 100 \rangle$;
- $E = 290\,000$ MPa în direcția $\langle 111 \rangle$;
- $E = 216\,000$ MPa în direcția $\langle 110 \rangle$;

Rezistența la coroziune a fierului este dată de poziția acestuia în seria potențialelor normale de electrod; față de hidrogen, fierul prezintă o poziție anodică (potențial de + 0,42 V) fiind mai nobil ca zincul, dar mai puțin nobil decât cuprul. Rezultă că fierul se corodează în apă și în medii acide. În medii puternic oxidante (de exemplu HNO_3 concentrat) fierul se pasivizează datorită

formării unei pelicule de oxid. O pasivizare durabilă se obține chiar în medii cu conținut scăzut de oxigen dacă fierul este aliat cu elemente care formează oxizi protectori ca de exemplu cromul; acest fenomen stă la baza obținerii și utilizării oțelurilor inoxidabile.

Tabelul 1.2

Caracteristicile mecanice și fizice ale fierului

Nr. crt.	Proprietate	Valoare	Unitate de măsură
1	Rezistența la rupere la tracțiune	180...290	MPa
2	Limita de elasticitate	100...170	MPa
3	Alungirea la rupere la tracțiune	40...50	%
4	Stricțiunea	70...80	%
5	Duritatea Brinell	45...55	HB
6	Modulul de elasticitate	210 000	MPa
7	Greutatea atomică	55,85	g/atom · g
8	Volumul atomic	7,1	cm ³ /atom · g
9	Parametrul rețelei cristaline		
	$a_{Fe\alpha}$ la ~ 910°C	2,866	Å
	$a_{Fe\delta}$ la 1 425°C	2,94	Å
	$a_{Fe\gamma}$ la 950°C	3,656	Å
10	Greutatea specifică la 20°C	7,87	g/cm ³
11	Punctul de topire	1 538	°C
12	Căldura specifică		
	pentru $Fe\alpha$ (între 20° și 700°C) pentru $Fe\gamma$ (între 25° și 1 500°C)	0,1075...0,23 0,122...0,71	cal/g · °C cal/g · °C
13	Căldura latentă de topire	64,9	cal/g
14	Coeficientul de dilatare liniară		
	pentru $Fe\alpha$ (între 100° și 600°C) pentru $Fe\gamma$ (între 900° și 1 100°C)	$10^{-6} \times (12,6...16)$ $\sim 10^{-6} \times 23,4$	(°C) ⁻¹ (°C) ⁻¹
15	Conductibilitatea termică (între 0° și 800°C)	0,18...0,07	cal/cm · °C · sec
16	Rezistivitatea electrică (între 0° și 900°C)	9,8...11,4	μohm · cm
17	Punctul Curie	770	°C

1.1.2. Proprietățile și influența carbonului ca element de aliere în oțeluri

Carbonul, ca element de aliere în fier, poate să formeze cu metalul de bază următoarele faze:

- soluții solide rezultate prin dizolvarea atomilor de carbon în interstițiile rețelei fierului;
- cristale de carbon elementar (grafit);
- compuși intermetalici (carburi de fier).

Carbonul liber sub formă de *grafit* nu apare decât în aliajele industriale ale fierului relativ bogate în carbon (fonte). Temperatura de topire a grafitului nu este cunoscută, dar este în orice caz foarte ridicată, întrucât peste 4 200°C se produce sublimarea.

Rețeaua cristalină a grafitului este hexagonală simplă; straturile atomice

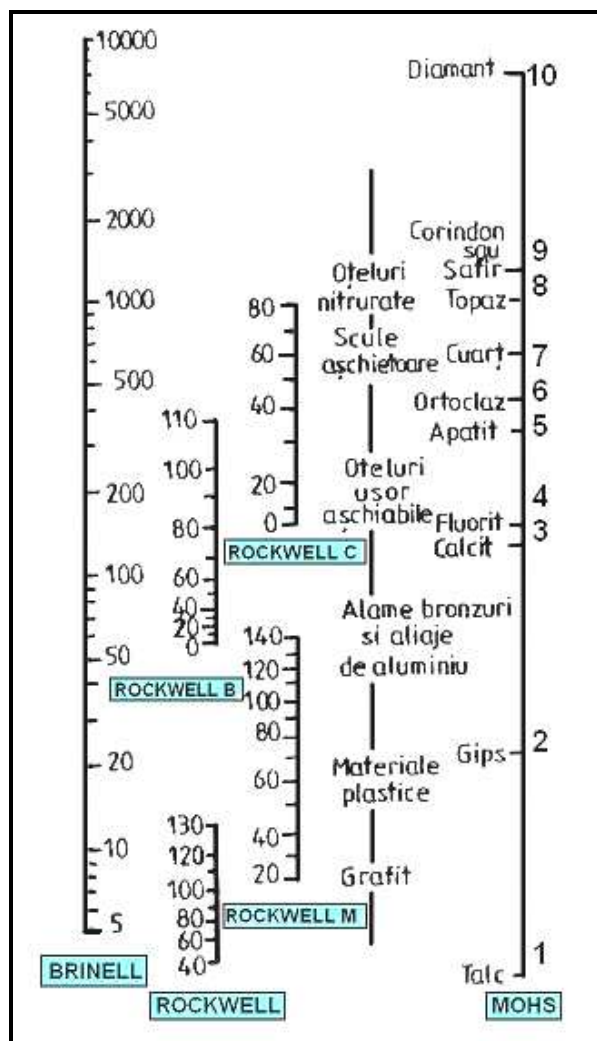


Fig. 1.1. Amplasarea durității diverselor materiale și compararea scărilor de duritate

compacte ale rețelei hexagonale sunt legate prin forțe slabe de tip *van der Waals*, astfel încât alunecarea între straturi este ușoară, ceea ce conferă grafitului caracteristici foarte scăzute de rezistență mecanică (așa cum rezultă din amplasarea grafitului la limita inferioară a scării duriților materialelor – fig.1.1). Proprietățile mecanice intrinseci foarte scăzute ale grafitului se manifestă ca atare în cristalele de grafit care apar în constituția aliajelor feroase.

Dintre carburile de fier, singura care poate coexista în echilibru (un echilibru metastabil și nu un echilibru termodinamic) cu soluțiile solide interstițiale ale carbonului în fier este carbura cristalizată în sistemul ortorombic Fe_3C sau *cementita*. Alte carburi cu rețele cristaline și formule diferite (ca de exemplu carbura epsilon Fe_2C cristalizată în sistemul hexagonal), apar numai în urma anumitor tratamente termice în oțeluri, în stare în afară de echilibru și se transformă în cementită la temperaturi mai mari de 300°C.

Cementita are o structură cristalină complexă și prezintă unele componente nemetalice în legăturile interatomice. Din această cauză cementita se caracterizează prin duritate foarte ridicată (de circa 800 HB), rezistență neglijabilă la solicitarea mecanică de tracțiune și absența totală a proprietăților de plasticitate.

1.1.3. Fazele constitutive din oțeluri

Soluțiile solide din sistemul fier-carbon se formează prin dizolvarea carbonului în interstițiile rețelei fierului. Dimensiunea diferită a interstițiilor în rețeaua cristalină CFC a fierului γ față de cea din rețeaua CVC a fierului α (respectiv a fierului δ) are ca efect o solubilizare diferită a carbonului în solvent.

Distorsiunea rețelei solventului este considerabil mai mare la dizolvarea carbonului în fierul cu rețea CVC (fier α , fier δ) decât în fierul cu rețea CFC (fier γ). Consecința este solubilitatea limitată a carbonului, considerabil mai mică în fier α și fier δ (0,02%, respectiv 0,1%) decât în fier γ (2%).

Luând în considerare cele două forme sub care poate apare carbonul în aliajele fierului cu carbonul, rezultă că diagrama de echilibru fazic a sistemului fier-carbon se prezintă sub două aspecte:

- diagrama fier-cementită (diagrama metastabilă);
- diagrama fier-grafit (diagrama stabilă).

În figura 1.2 sunt reprezentate ambele aspecte ale diagramei de echilibru fazic ale sistemului fier-carbon. Se remarcă o ușoară deplasare a liniilor sistemului metastabil spre conținuturi mai mari de carbon și spre temperaturi mai joase. Pentru exemplificare, în figura 1.2 au fost indicați numai constituenții din sistemul stabil fier-cementită, subînțelegându-se că în sistemul stabil fier-grafit se formează constituenți analogi în care însă faza cementită este înlocuită prin faza grafit.

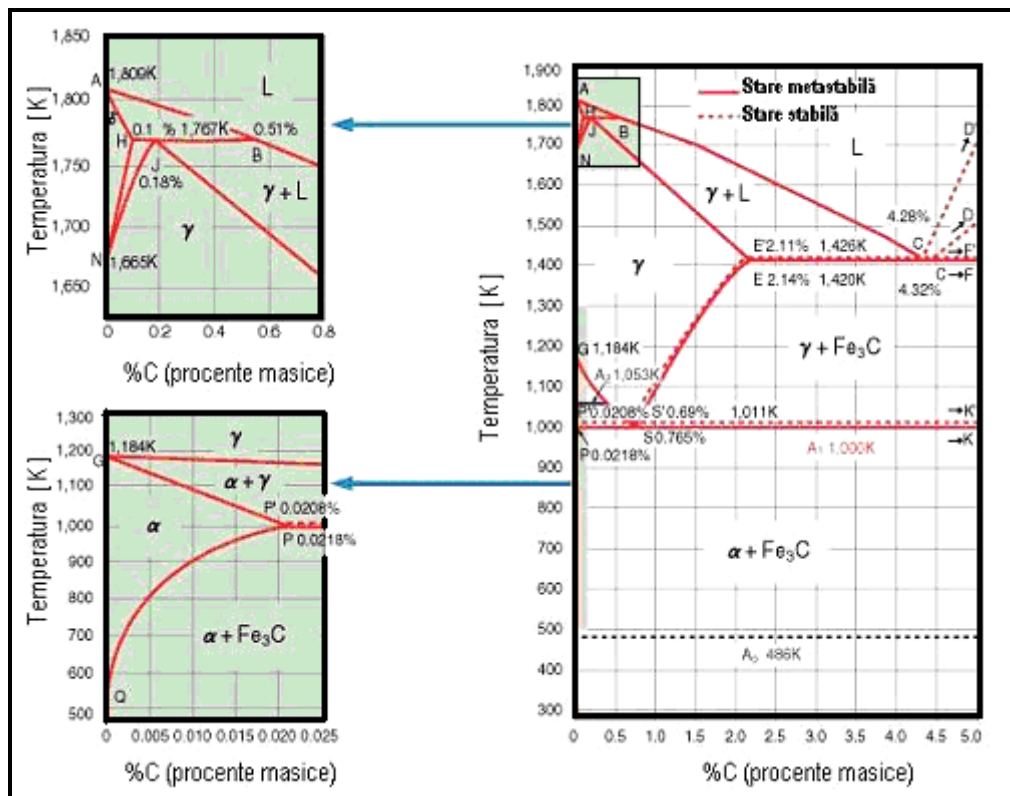


Fig. 1.2. Diagrama de echilibru fazic a sistemului fier-carbon

Diferența între caracterul stabil și metastabil al sistemului de aliaje fier-carbon este relativă. Gradul de stabilitate este influențat de numeroși factori, în special temperatura și elementele de aliere.

În cazul aliajelor fier-carbon cu conținuturi de carbon sub 2% (oțeluri) forma stabilă a carbonului, grafitul, nu apare decât în mod excepțional în prezența unor anumite elemente de aliere. Din motive de cinetică de reacție cementita (Fe_3C), deși instabilă termodinamic, se menține în oțeluri în echilibru

metastabil fără a se descompune în grafit. Rezultă că pentru oțeluri constituția este descrisă de diagrama de echilibru fazic metastabil Fe-Fe₃C.

În cazul aliajelor fier-carbon cu conținuturi de carbon mai mari de 2% (fonte) constituția poate fi determinată atât de sistemul stabil cât și de sistemul metastabil. Apariția carbonului sub formă de grafit sau sub formă de cementită este puternic dependentă în acest caz de viteza de răcire și de elementele de aliere, care pot avea efect grafitizant favorizând reacția de descompunere a cementitei ($\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow \text{C} + 3\text{Fe}$), sau pot avea efect antigrafitizant frânând această reacție.

Utilizarea tehnică a diagramei de echilibru fazic a sistemului fier-carbon a creat o terminologie specială pentru descrierea fazelor, a constituenților și a transformărilor de fază. Denumirile speciale care au fost date fazelor și constituenților din diagrama metastabilă de echilibru fazic (v. fig. 1.2) sunt următoarele:

- ferita alfa ($\text{F}\alpha$ sau α) = soluția solidă a carbonului în fierul α ;
- ferita delta ($\text{F}\delta$ sau δ) = soluția solidă a carbonului în fierul δ ;
- austenita (A sau γ) = soluția solidă a carbonului în fierul γ ;
- cementita (Fe_3C sau Cem) = carbura de fier ortorombică Fe_3C ;
- perlita (P) = eutectoidul constituit din ferită și cementită;
- ledeburită (Led) = eutecticul constituit din austenită și cementită;
- ledeburită transformată (Led_tr) = eutecticul constituit din cementită

și perlita rezultată din descompunerea austenitei.

Notățiile cu literele alfabetului din figura 1.2 permit identificarea liniilor de transformare fazică ale diagramei de echilibru fazic; notațiile cu indicele “prim” (tabelul 1.3) se referă la acele linii de transformare fazică care apar deplasate în diagrama de echilibru stabil fier-grafit în raport cu diagrama de echilibru metastabil fier-cementită.

1.2. DELIMITAREA TEHNOLOGICĂ ÎNTRE ALIAJELE FIER-CARBON DEFORMABILE (OȚELURI) ȘI CELE NEDEFORMABILE (FONTE)

Examinând figura 1.2 se observă că, sub ambele aspecte, diagrama de echilibru fazic a sistemului fier-carbon se prezintă ca o diagramă cu solubilitate nelimitată în stare lichidă. În stare solidă sistemul prezintă un eutectic între soluția solidă pe bază de fier și faza bogată în carbon (grafitul liber în sistemul stabil, respectiv, cementita în sistemul metastabil). Solubilitatea carbonului în fier fiind limitată și variabilă cu temperatura, la răcirea aliajelor, din soluțiile solide se separă precipitate bogate în carbon (grafit sau cementită).

Transformările alotropice ale fierului introduc în regiunea bogată în fier a diagramei de echilibru fazic linii de transformare care indică recrystalizarea fazică sau descompunerea soluțiilor solide la temperatură înaltă. În faza bogată în carbon (grafit sau cementită) insolubilitatea fierului este totală. Ramura C' D' a curbei lichidus din sistemul stabil fier-grafit urcă abrupt spre punctul de topire al grafitului (peste 3 500°C).

**Coordonatele punctelor importante din diagrama de echilibru fazic
a sistemului fier-carbon**

Punct	Temperatura, °C			Conținutul de carbon, % gr.		
	Hansen (anul 1958)	SR EN 10.052: 1996	Metals Handbook ASM (vol. 8)	Hansen (anul 1958)	SR EN 10.052: 1996	Metals Handbook ASM (vol. 8)
A	1 534	1 536	1 538	0	0	0
B	1 493	1 493	1 495	0,51	0,5	0,5
C	1 147	1 147	1 148	4,3	4,3	4,3
C'	1 153	1 153	1 154	4,25	-	4,26
D	-	-	-	6,67	6,67	6,67
E	1 147	1 147	1 148	2,06	2,04	2,11
E'	1 153	1 153	1 154	2,03	-	2,08
F	1 147	1 147	1 148	6,67	6,67	6,67
G	910	911	912	0	0	0
H	1 493	1 493	1 495	0,10	0,10	0,10
J	1 493	1 493	1 495	0,16	-	0,16
K	723	723	727	6,67	6,67	6,67
L	500	400	400	6,67	6,67	6,67
M	768	769	770	-	-	-
N	1 390	1 392	1 394	0	0	0
O	768	769	770	-	-	-
P	723	723	727	0,02	-	0,0218
Q	500	400	400	0,006	-	0,002
S	723	723	727	0,80	0,80	0,77
S'	738	738	738	0,69	-	0,68

Din punct de vedere practic această pantă abruptă reprezintă saturarea rapidă în carbon a soluției lichide, ceea ce pentru temperaturile uzuale din metalurgia fierului limitează conținutul maxim de carbon în topitură la circa 5%. În sistemul metastabil în care panta curbei lichidus CD este mai puțin abruptă (punctul de topire al cementitei fiind mai scăzut, mai apropiat de al fierului), la aceleași temperaturi industriale le corespunde saturarea în carbon a topiturii ceva mai mare; aceasta limitează domeniul de interes practic al diagramei fier-cementită la concentrația de 6,67%C corespunzătoare cementitei.

Delimitarea tehnologică între aliajele fier-carbon deformabile plastic (oțeluri) și aliajele fier-carbon nedeformabile plastic (fonte) este indicată de punctul E, corespunzător unei concentrații de circa 2%C, al diagramei de echilibru fazic, punct care corespunde solubilității maxime în stare solidă a carbonului în fier.

Aliajele cu conținuturi de carbon sub 2% sunt oțeluri pentru că prin încălzire cristalele fragile de carbură de fier se dizolvă, rețeaua cristalină CFC a fierului γ permițând dizolvarea integrală a carbonului prezent în aliaj. Aliajele cu conținuturi de carbon peste 2% sunt fonte. Acestea nu pot fi aduse prin încălzire în totalitate în stare de soluție solidă aptă pentru deformare plastică, deoarece conținutul lor de carbon depășește limita maximă de solubilitate în fier; excesul de carbon este prezent în fonte sub formă de cristale de fază fragilă (cementită în fontele albe și grafit în fontele cenușii). Puternica depresiune a temperaturii de

topire a fierului produsă de dizolvarea carbonului în topitură, cu un minimum la compoziția eutectică, recomandă fontele ca materiale cu proprietăți convenabile de turnare (fluiditate mare a topiturii și temperaturi de turnare relativ scăzute în raport cu oțelurile).

Din punct de vedere practic aliajele cu compozițiile din regiunea punctului E de demarcație între oțeluri și fonte nu sunt utilizate. Conținutul de carbon al oțelurilor de *interes industrial* nu depășește în mod obișnuit 1,2%, iar conținutul de carbon al fontelor utilizate practic nu scade decât foarte rar sub 2,25%.

De remarcat că diagrama de echilibru fazic a celor mai importante aliaje tehnice (aliajele sistemului fier-carbon) are o serie de particularități neuzuale, prezentate în continuare.

a) Diagrama reprezintă relațiile de echilibru fazic între fier (un metal) și carbon (un nemetal); aproape toate celelalte diagrame de echilibru fazic de interes industrial se referă la sisteme de componenți metalici.

b) Cu toată importanța considerabilă a sistemului de aliaje fier-carbon, numai o porțiune restrânsă a diagramei de echilibru fazic și anume până la 6,67% C este studiată și cunoscută complet (diagrama parțială fier-cementită). La temperaturile foarte ridicate din extremitatea bogată în carbon a diagramei, carbonul nu se topește ci sublimază, aliajele fiind dificil de preparat și fără utilitate tehnică.

c) Diagrama de echilibru fazic fier-cementită este bazată pe presupunerea eronată că cementita este o fază stabilă în aliajele fierului cu carbonul. De fapt cementita este o fază metastabilă care se descompune în grafit și soluție solidă de carbon în fier. Reacția de descompunere se produce la mențineri îndelungate chiar la temperaturi relativ joase, de circa 540°C. La temperaturi înalte și în prezența anumitor elemente de aliere ca siliciul și nichelul, reacția de descompunere a cementitei este atât de rapidă încât nu poate fi împiedicată, ceea ce explică prezența grafitului în constituția majorității fontelor.

În oțeluri grafitizarea cementitei nu se produce decât în cazuri de excepție, forma normală în care se separă excesul de carbon nedizolvat în fier fiind cementita, aflată în echilibru metastabil cu soluțiile solide ale fierului.+

d) Transformările alotropice ale fierului produc o complexitate a diagramei de echilibru fazic în zona aliajelor fier-carbon bogate în fier (oțeluri). Dintre transformările de fază din această zonă cea mai importantă este reacția eutectoidă de descompunere a soluției solide a carbonului în fierul γ . Suprimarea parțială sau totală a acestei reacții stă la baza proceselor de deformare plastică (efectuată la temperaturi prea mari în domeniul austenitic), de tratament termic, de turnare sau de sudare. Rezultă de aici că diagrama de echilibru fazic fier-carbon este utilizată nu numai pentru deducerea constituției de echilibru a aliajelor, ci mai ales pentru explicarea și prevederea abaterilor de la echilibru, provocate intenționat în cursul proceselor de deformări plastice și tratamente termice.

1.3 EFECTELE PROPRIETĂȚILOR ȘI PROPORȚIEI FAZELOR CONSTITUTIVE DIN OȚELURI ASUPRA REZISTENȚEI LA DEFORMARE A ACESTORA

Punctele critice de transformare în stare solidă a oțelurilor A_1 , A_2 , A_3 , A_{cem} (v. fig. 1.3) sunt temperaturi dependente de compoziție la care se produc transformările de fază în oțeluri.

La temperaturi inferioare temperaturii descompunerii eutectoide a austenitei, deci sub punctul critic A_1 , toate aliajele fier-cementită (oțeluri și fonte albe) sunt constituite din fazele stabile la temperaturi joase - ferita și cementita - prezente sub formă de constituenți monofazici sau asociate în amestecuri mecanice. În figura 1.4 a este prezentată variația cu conținutul de carbon a proporției fazelor, iar în figura 1.4 b, variația proporției constituenților în aliajele sistemului fier-cementită la temperatura ambiantă.

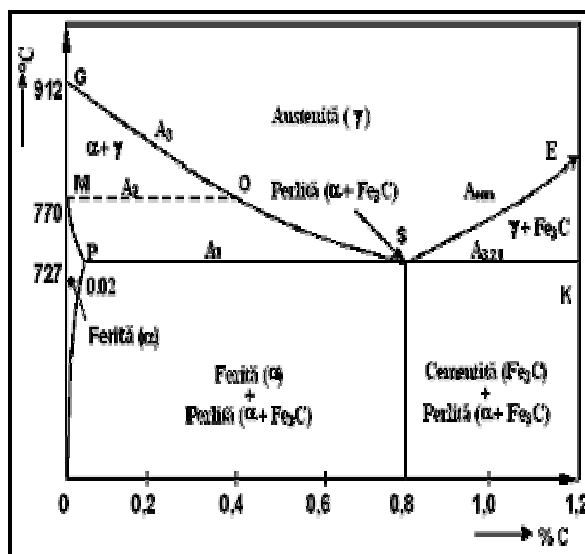


Fig. 1.3. Punctele critice de transformare în stare solidă a oțelurilor.

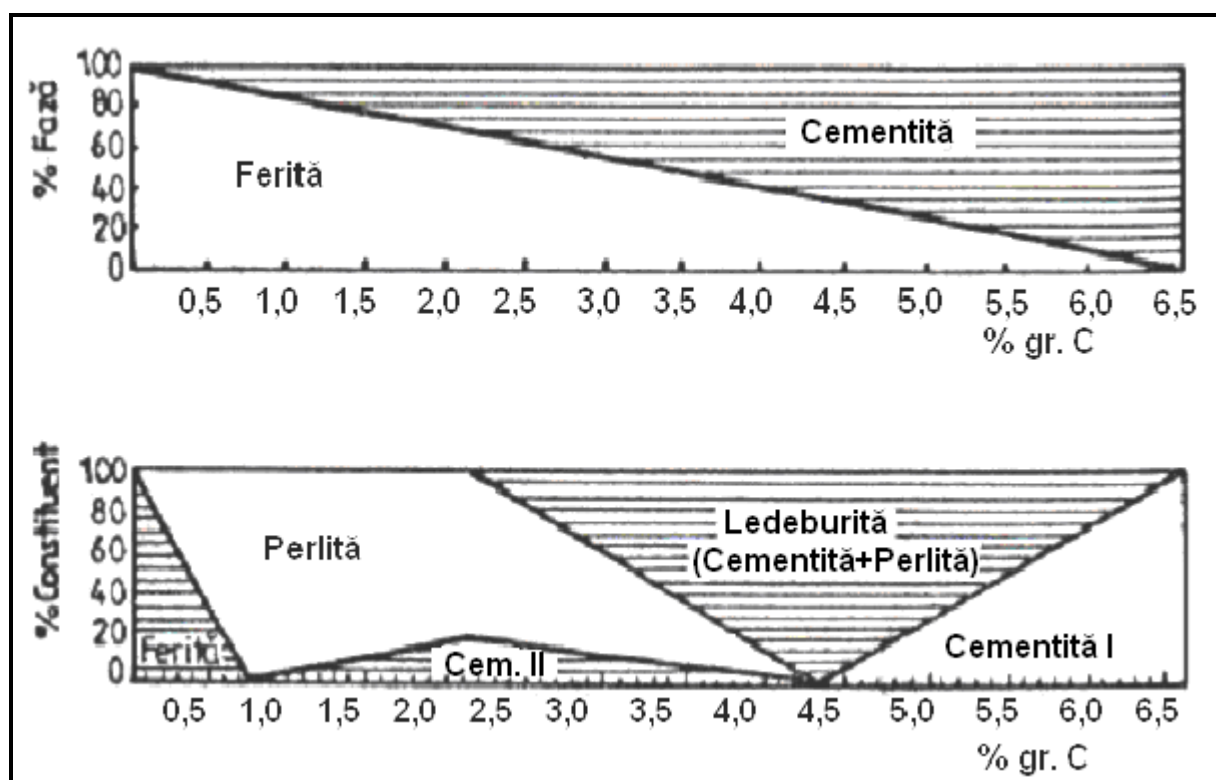


Fig. 1.4. Variația cu conținutul de carbon a proporției fazelor (a) și constituenților (b) în oțeluri și fonte.

Proprietățile mecanice ale aliajelor plurifazice sunt determinate în primă instanță de proprietățile fazelor constitutive și de ponderea participării fiecărei faze în constituția aliajului. Pentru fazele constitutive din oțeluri – ferita și cementita – proprietățile mecanice pot fi caracterizate prin valorile din tabelul 1.4.

Tabelul 1.4

Proprietățile mecanice ale constituenților

Constituentul	Rezistența la rupere [MPa]	Duritatea [HB]	Alungirea [%]
Ferita	280	80	50
Cementita	35*	800	0
Perlita (88% F + 12%Cem)	800	200	10

* Valoare incertă din cauza fragilității cementitei.

Anumite proprietăți ale fazelor din aliajele plurifazice (majoritatea proprietăților fizice) sunt aditive și, în acest caz, proprietățile aliajului sunt reprezentate prin media ponderată a proprietăților fazelor constitutive.

Proprietățile mecanice nu fac însă parte din această categorie. Proprietățile mecanice ale amestecului de faze nu sunt întotdeauna intermediare între proprietățile fazelor constitutive deoarece în amestec fazele își potențează reciproc *rezistența la deformare*, realizându-se efectul de durificare sau de ranforsare a aliajului prin deformarea neuniformă a fazei plastice (ferita) în prezența particulelor de fază dură (cementita). Particulele fin dispersate ale fazei mai rigide și mai puțin plastice împiedică deformarea uniformă a fazei plastice din amestec.

În oțeluri proporția fazelor în amestec (eutectoid) este fixă, fiind determinată de relațiile din diagrama de echilibru fazic și poate să nu coincidă cu valoarea la care s-ar putea obține efectul durificator maxim. Amestecul de faze prezent în microstructura de echilibru a oțelurilor (dar și a fontelor albe) este *perlita*, la care se constată din datele din tabelul 1.4 că asocierea fazelor produce un efect de ranforsare remarcabil, rezistența la deformare a perlitei fiind mult mai mare decât a fiecăreia din fazele constitutive.

În diagramele din figura 1.5 este prezentată variația cu conținutul de carbon a principalelor proprietăți mecanice ale oțelurilor carbon în stare recoaptă; în figură sunt indicate și valorile proprietăților mecanice pentru fonta albă cu 3,2...3,6% C (compoziții uzuale în aplicații).

Din figura 1.5 se remarcă faptul că apariția masivă a cementitei libere (neasociată în perlită) în oțelurile hipereutectoide cu conținut mare de carbon (și mai ales în fontele albe) produce o scădere puternică a rezistenței mecanice și a tenacității, singura proprietate influențată favorabil de creșterea cantității de cementită liberă fiind duritatea.

Curbele de variație cu compoziția a proprietăților mecanice ale oțelurilor (fig. 1.5) se corelează cu diagrama de variație a cantității de constituenți (fig. 1.4, b), dar nu și cu diagrama variației cantității fazelor (fig. 1.4, a).

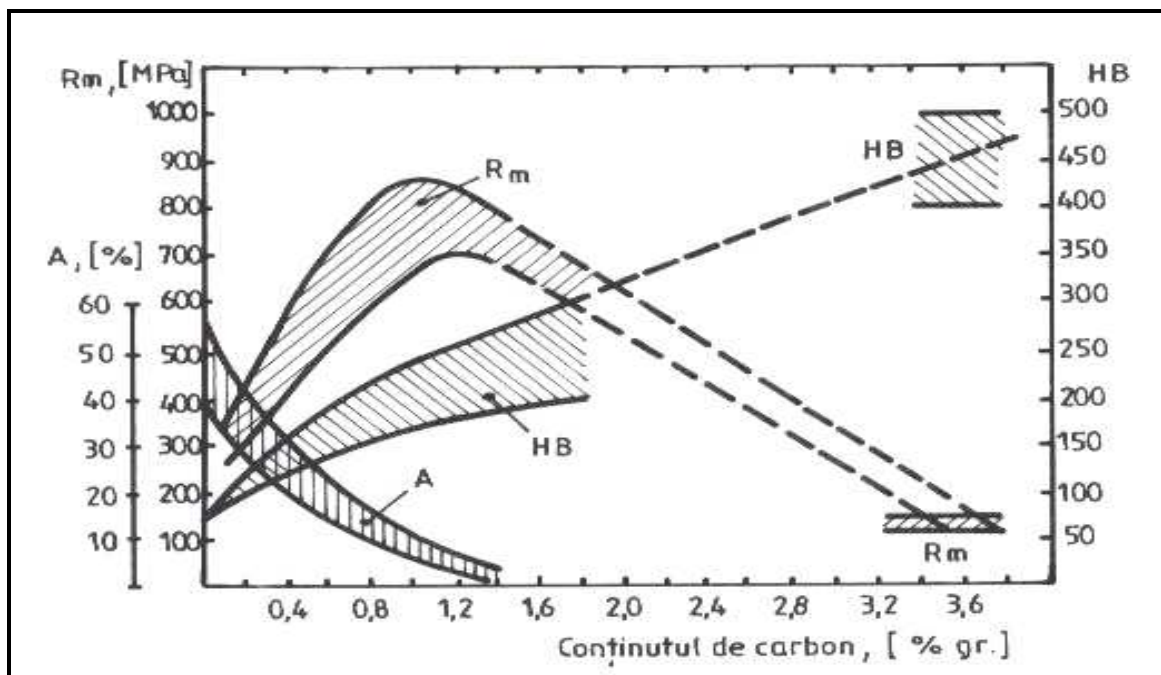


Fig. 1.5. Variația cu conținutul de carbon a proprietăților mecanice în oțeluri

Rezultă că pentru proprietățile mecanice sensibile la structură, care caracterizează rezistența la deformare și plasticitatea oțelurilor, aditivitatea acționează în funcție de valorile caracteristice constituenților și nu în funcție de valorile caracteristice fazelor. În capitolele următoare se va arăta că, datorită dependenței de structură, pot fi modificate în limite largi și proprietățile mecanice de rezistență la deformare și plasticitate ale constituenților, intervenindu-se în gradul de aliere al oțelurilor, în gradul de deformare plastică prin laminare și în dimensiunea grăunților rezultată prin efectul combinat al deformărilor plastice și al tratamentelor termice.

1.4. EFECTELE EREDITARE ALE STRUCTURII LINGOURILOR DE OȚEL ASUPRA PROPRIETĂȚILOR PRODUSELOR LAMINATE

Procedeul de laminare este cel mai răspândit procedeu de deformare plastică a materialelor metalice. Preponderentă și reprezentativă în acest sens este siderurgia, unde peste 75% din cantitatea de oțel turnat este destinată laminării.

Structura primară de solidificare a oțelului turnat influențează proprietățile produselor laminate prin particularitățile micro sau macrostructurale generate, pe de o parte, de *eterogenitatea structurală* (forma, mărimea și orientarea grăunților în diferite zone cristalizate) și, pe de altă parte, de *eterogenitatea chimică* (segregații ale elementelor însoțitoare, incluziuni nemetalice conținând elementele însoțitoare insolubile, gaze etc.). În cazul lingourilor de oțel eterogenitatea structurală este eliminată prin operațiile de laminare și tratament termic, dar influența acesteia se menține indirect în produsul laminat prin relațiile sale cu eterogenitatea chimică, eterogenitate care nu se elimină decât parțial în cursul proceselor de prelucrare.

1.4.1. Eterogenitatea structurală din lingouri

Eterogenitatea structurală se referă la volumul relativ al zonelor de cristalizare (crustă, zona cristalelor columnare, zona cristalelor echiaxe) și la volumul și amplasarea discontinuităților (retasuri, porozități, sufluri). Aceste

caracteristici de eterogenitate structurală se manifestă în mod diferit în funcție de regimul termic de solidificare a lingourilor, determinat de temperatura de turnare, de materialul și forma lingotierei și de dimensiunile lingourilor turnate.

Turnarea oțelurilor în lingouri se execută de la temperaturi de circa 1 450°C în lingotiere de fontă cu cavitatea în formă de trunchi de piramidă (fig.1.6, a). Lingotiera este prevăzută la partea superioară cu o maselotieră izolată termic care va asigura formarea cavității de retasură în maselotă, adică în porțiunea superioară a lingoului, care se elimină prin tăiere înainte de laminare. Forma, dimensiunile și proporțiile lingotierelor sunt determinate, pe de o parte, de exigențele privind forma optimă a lingoului pentru operația de laminare și, pe de altă parte, de exigențele privind asigurarea unei macrostructuri care să reducă la minimum anizotropia lingoului solidificat.

Forma optimă a secțiunii transversale a lingoului este cea pătrată (pentru laminarea profilelor), și cea dreptunghiulară (pentru laminarea tablelor și benzilor). Forma circulară se pretează greu la operația de laminare și, în plus determină o macrostructură nefavorabilă deoarece, în acest caz, cristalele columnare converg toate spre axa lingoului și toate sunt de aceeași dimensiune ceea ce diminuează efectele structurale favorabile ale procesului de laminare. Pentru lingourile cu secțiune pătrată sau dreptunghiulară se aplică o curbare a laturilor și muchiilor lingotierei (fig. 1.6, a). În acest

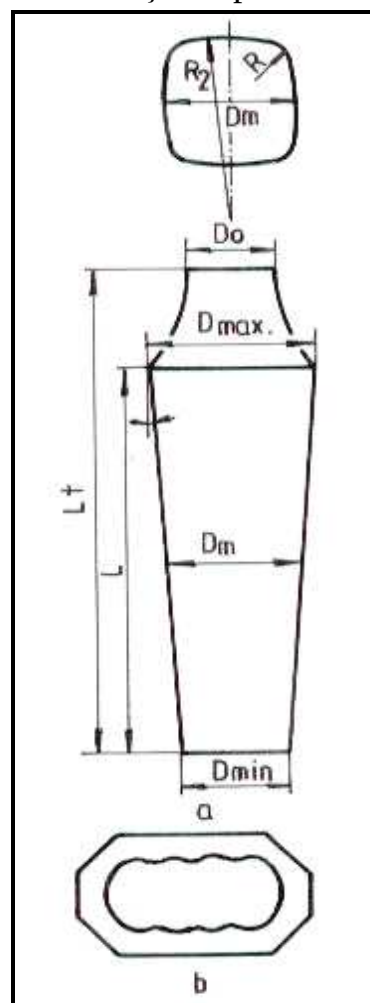


Fig. 1.6. Forme de lingotiere pentru turnarea oțelului:
a-lingotieră de uz curent pentru oțeluri aliate și nealiate;
b-lingotieră cu fețe ondulate.

mod se obține o dispunere a cristalelor columnare (fig. 1.7, a) care evită apariția în secțiunea transversală a lingoului a diagonalelor de slabă rezistență mecanică (fig. 1.7, b) provocate de îmbinarea imperfectă a vârfurilor cristalelor columnare care se desprind prin contracție.

Pentru lingourile cu secțiune mare (în greutate de peste 2 t) o diminuare a anizotropiei în zona cristalelor columnare se obține prin utilizarea lingotierelor cu fețe ondulate (fig. 1.6, b) ceea ce conduce la o variație a direcției cristalelor columnare pe conturul lingoului.

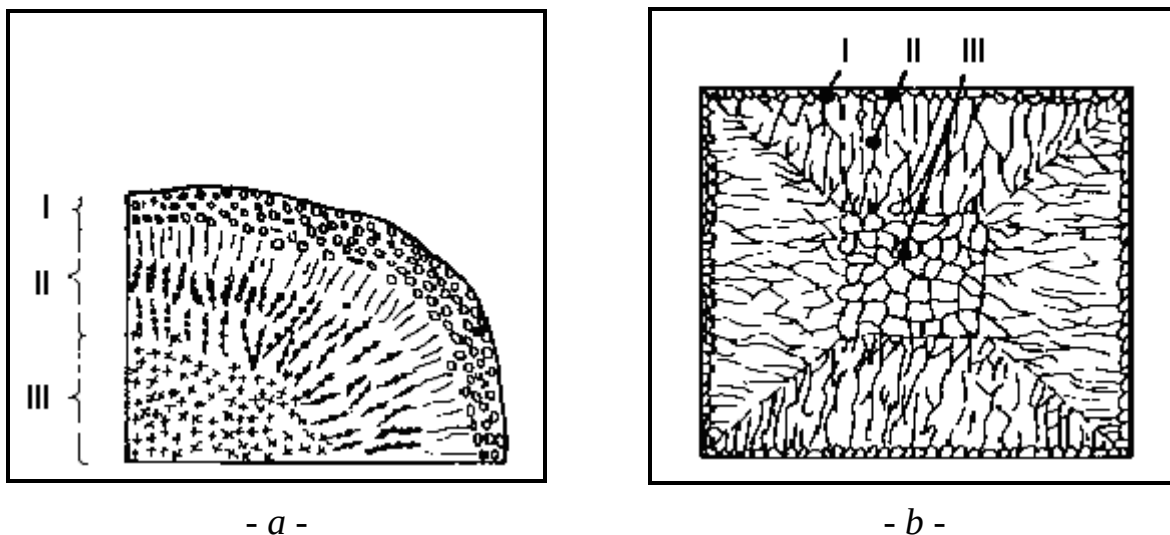


Fig. 1.7. Influența forme lingotierei asupra macrostructurii lingoului:
a – orientare favorabilă a cristalelor columnare în lingou, obținută prin rotunjirea muchiilor lingotierei; b – orientare defavorabilă a cristalelor columnare în lingou.

Conicitatea lingoului, necesară pentru stripare (desprinderea lingoului din lingotieră), trebuie redusă la minimum pentru a evita variațiile de structură în secțiunea transversală pe lungimea lingoului și, de asemenea, pentru a oferi pentru operația de laminare un lingou cu secțiunea cât mai constantă.

Modul de elaborare a oțelului influențează eterogenitatea structurală a lingoului destinat laminării atât din punctul de vedere al formării zonelor de cristalizare cât și din punctul de vedere al distribuției discontinuităților. La elaborarea oțelului necalmat, dezoxidarea este incompletă fiind efectuată cu un singur dezoxidant (manganul). La turnare, după solidificarea crustei lingoului, în topitura rămasă excesul de oxid de fier reacționează cu carbonul dizolvat, provocând degajare de oxid de carbon (fierberea oțelului în lingotieră). Agitarea topiturii împiedică formarea zonei de cristale columnare, reduce segregăția și conduce la formarea de ocluziuni de oxid de carbon. Crusta solidificată înainte de începerea fierberii este foarte pură, fiind delimitată prin segregății de restul lingoului. Plasticitatea foarte mare a zonei exterioare recomandă oțelul necalmat pentru laminarea produselor plate la care pretențiile calitative privind suprafața produselor finite sunt deosebit de mari. Ocluziunile de oxid de carbon formează coroana inferioară de sufluri, care se sudează la laminare, întrucât conținând un gaz reducător au suprafața interioară neoxidată. În acest scop este important să se asigure o grosime suficientă a crustei lingoului (prin reglarea dezoxidării) pentru ca în timpul laminării suflurile să nu ajungă la suprafață și să nu se oxideze în contact cu aerul.

La elaborarea oțelului calmat, dezoxidarea suplimentară cu siliciu și aluminiu reduce conținutul de oxid de fier dizolvat sub limite de solubilitate în fier, reacția cu carbonul care să provoace degajarea de oxid de carbon nu se mai produce și solidificarea are loc în absența agitării topiturii. Ca urmare, se dezvoltă zona cristalelor columnare, cantitatea de sufluri este mai mică și retasura mai accentuată, aceasta nemaifiind compensată de creșterea volumului provocată de sufluri.

1.4.2. Eterogenitatea chimică a lingourilor

Eterogenitatea chimică este provocată de distribuția neuniformă în volumul lingourilor din oțeluri nealiat a elementelor însoțitoare, iar în cazul lingourilor din oțeluri aliate și a elementelor de aliere. Pentru a releva importanța segregăției majore produse la solidificarea oțelului, în tabelul 1.5 sunt prezentate concentrațiile pentru carbon, sulf și fosfor în două zone extreme ale aceluiași lingou (în crustă și în zona centrală), iar pentru comparație este indicat și conținutul mediu în lingou al acestor elemente.

Tabelul 1.5

Segregația majoră în lingourile de oțel

Zona	Lingou de 3 t		
	% C	% S	% P
În crustă	0,27	0,018	0,028
În zona centrală de lângă retasură	0,36	0,026	0,053
Conținut mediu	0,305	0,022	0,040
Gradul de segregare $\left[\frac{\% \text{ max. }}{\% \text{ min. }} \right]$	1,33	1,44	1,90

Carbonul prezintă un grad de segregare la solidificare mai redus decât elementele însoțitoare sau de aliere. În plus aceste segregări se elimină ușor la încălzirea în vederea laminării, datorită difuziei interstițiale rapide a carbonului în austenită. Pe de altă parte însă această difuzie rapidă a carbonului favorizează un alt tip de neuniformitate în distribuția microscopică a carbonului și anume decarburarea stratului superficial în cursul laminării la cald și al încălzirilor pentru tratamente termice.

Prezența stratului decarburat afectează grav proprietățile de utilizare; de exemplu la oțelurile de scule stratul superficial nu se durifică prin călire. Decarburarea superficială poate fi redusă prin realizarea unei atmosfere neutre a cuptorului, prin împachetarea oțelului supus încălzirii în șpan de fontă sau prin încălzire în băi de săruri.

Hidrogenul prezent în oțel în concentrații inferioare miimilor de procent provine din unele materiale utilizate la elaborare (var, ferosiliciu) sau din umiditatea materialelor refractare. Fisurile datorate tensiunilor provocate de hidrogen în oțeluri sunt numite fulgi și se formează la temperaturi de circa 200°C în semifabricatele mari răcite rapid după laminare la cald. Formarea fulgilor poate fi evitată prin ferirea topiturii de oțel de substanțe cu umiditate, prin răcirea lentă până la temperatura camerei a lingourilor mari și a semifabricatelor laminate la cald și prin aplicarea turnării în vid.

Azotul este introdus în oțel din atmosfera cuptorului, cantitatea de azot dizolvat în oțelul lichid în momentul elaborării depinzând în mare măsură de modul de elaborare (sub 0,1% N remanent în oțelul Martin și circa 0,03% N în oțelurile elaborate în cuptoare electrice). Prezența azotului are importanță în

oțelurile moi și extramoi cu conținut redus de carbon (sub 0,15%). În aceste oțeluri apar diverse forme de fragilitate (fragilitate la albastru, îmbătrânire mecanică). Prevenirea fragilității provocate de azot se poate face printr-o supradezoxidare cu aluminiu în momentul elaborării oțelului.

Fosforul prezent în oțeluri în conținuturi care nu depășesc 0,06% se află, după solidificare, dizolvat complet în fier. La solidificarea oțelului fosforul se distribuie neuniform în austenită, prezentând importante segregatii atât la nivelul lingoului (segregația majoră prezentată în tabelul 1.6) cât și la nivelul fiecărei dendrite, microsegregația constând în îmbogățirea cu fosfor a straturilor exterioare ale dendritelor. Persistența microsegregației fosforului conduce la structura secundară în șiruri a oțelului laminat la cald care contribuie la anizotropia produselor finite. Apariția acestei structuri poate fi prevenită prin evitarea laminării la cald la temperaturi relativ joase, în domeniul austenitic (apropiate de punctul critic superior A_3), temperaturi la care nu se realizează uniformizarea carbonului prin difuzie.

Segregațiile de fosfor reprezintă zone durificate, dar cu tenacitate micșorată, producând fragilitatea la rece a oțelului. Întrucât segregatiile cu fosfor nu pot fi eliminate, atenuarea efectelor lor dăunătoare se face prin limitarea strictă a conținutului de fosfor la elaborarea oțelului și printr-o tehnologie de prelucrare care să evite apariția la suprafață a zonelor segregate, deci prin evitarea secționării liniilor de fibraj.

Sulful prezent în oțeluri în conținuturi care nu depășesc 0,06% (cu excepția oțelurilor pentru așchiere pe mașini automate, care conțin 0,15...0,30% S), se separă la solidificare ca o fază separată, sulfura de fier. Prezența sulfurii de fier în oțeluri provoacă fenomenul de fragilitate la cald: fragilitatea la roșu (care se manifestă între 800 și 1 000°C și are drept cauză plasticitatea redusă a sulfurii de fier) și fragilitatea de temperatură înaltă (care se manifestă la peste 1 200°C și are drept cauză topirea rețelei de sulfură de fier). Fragilitatea la cald a oțelului poate fi prevenită prin introducerea la elaborarea oțelului a unui conținut suficient de mangan pentru ca întreaga cantitate de sulf să apară ca MnS (care are punctul de topire 1 610°C) și nu ca FeS (care are punctul de topire 1 193°C). În acest mod se evită îmbogățirea cu sulf a limitelor de grăunte răspunzătoare de fragilitatea la roșu și la temperatură înaltă.

Manganul se introduce la elaborare ca dezoxidant și ca desulfurant. Fiind un element foarte activ din punct de vedere chimic manganul produce în oțel numeroase incluziuni nemetalice (oxizi, sulfuri) care, la laminare, se alungesc în șiruri și produc un fibraj accentuat, conducând la anizotropia proprietăților mecanice.

Siliciul este introdus la elaborare ca dezoxidant suplimentar în oțelurile calmate. La conținuturi de 0,2...0,5% Si oțelurile sunt considerate complet calmate, iar sub 0,02% Si sunt considerate complet necalmate. Datorită afinității mari pentru oxigen siliciul apare în oțel sub formă de incluziuni de oxizi de siliciu sau de silicați.

Oxigenul provine în oțel de la elaborare sau din atmosfera oxidantă în cursul operațiilor de încălzire. În oțelurile calmate oxigenul existent în topitură

este fixat la elaborare în oxizi stabili care nu pot fi reduși de carbon. Elementele dezoxidante utilizate în acest scop sunt siliciul (adăugat ca ferosiliciu) și aluminiul (adăugat ca atare sau ca aliaj calciu-aluminiu). Oxigenul remanent apare în oțelul solidificat sub forma a patru oxizi: FeO , MnO , SiO_2 și Al_2O_3 . Acești oxizi pot apărea ca atare sub formă de incluziuni de oxizi sau pot fi asociați chimic între ei formând incluziuni de silicați sau spineli. Aceste incluziuni care se formează prin reacțiile chimice de la elaborarea oțelului și prin reacțiile fizico-chimice de la solidificarea acestuia sunt numite incluziuni *endogene*. Cantitatea lor este dependentă de corectitudinea tehnologiei de elaborare, în speță cantitatea de incluziuni nemetalice endogene poate fi diminuată printr-o desulfare corectă și prin micșorarea conținutului de oxigen existent în topitură înaintea dezoxidării.

În funcție de gradul de dezoxidare se obțin oțeluri necalmate, calmate sau semicalmate.

Oțelurile necalmate sunt oțelurile dezoxidate insuficient cu mangan, siliciu, aluminiu etc. La solidificarea lingoului carbonul și oxidul feros se concentrează în topitura încă nesolidificată până când depășește concentrația de echilibru, după care reacționează unul cu altul cu formare de oxid de carbon care se degajă provocând *fierberea* oțelului în lingotieră. Din această cauză un lingou din oțel necalmat constă dintr-o zonă exterioară extrem de pură și un miez cu multe sufluri, fără cavități de retasură. Ca urmare, pierderile la laminare sunt mici, motiv pentru care, date fiind și consumurile reduse de dezoxidanți, oțelurile necalmate sunt mai convenabile economic decât cele calmate. În afară de aceasta, conținutul foarte scăzut în siliciu și lipsa incluziunilor nemetalice fac ca oțelurile necalmate să posede plasticitate ridicată. Cele mai utilizate oțeluri necalmate au în compoziția chimică 0,04...0,09% C, 0,005...0,002% Si și 0,25...0,04% Mn.

Oțelurile calmate sunt complet dezoxidate cu mangan, siliciu, aluminiu sau alți dezoxidanți. Acestea solidifică *fără fierbere*, însă cu contracție, ceea ce duce la formarea cavității de *retasură* în partea superioară a lingoului; această parte, reprezentând 10...18% din greutatea lingoului este îndepărtată prin șutare. Oțelurile calmate au plasticitate scăzută însă, fiind omogene structural și având caracteristici bune de rezistență, sunt oțeluri de calitate bună. Cele mai utilizate oțeluri calmate au compoziția chimică în limitele 0,04...0,6% C, 0,15...0,50% Si și 0,6...1,6% Mn.

Oțelurile semicalmate sunt oțeluri dezoxidate la un grad mai avansat decât oțelurile necalmate, dar totuși insuficient dezoxidate. Și în acest caz se produce segregatie, dar într-o măsură mult mai mică decât la oțelul calmat. Proprietățile de rezistență sunt intermediare între oțelurile necalmate și calmate, iar compoziția chimică variază în limitele: 0,15...0,25% C, 0,01...0,1% Si și 0,85...1,2% Mn.

În afară de incluziunile endogene oțelul poate conține și incluziuni nemetalice *exogene* și anume particule de materiale refractare antrenate accidental din căptușeala cuptorului, a oalei de turnare sau a canalelor de turnare precum și incluziuni de zgură. Reducerea la minimum a incluziunilor exogene se

realizează prin utilizarea unor materiale refractare de calitate și printr-o tehnologie corectă de elaborare care să evite formarea unei zguri emulsionabile în oțelul lichid.

Prezența incluziunilor nemetalice influențează atât proprietățile tehnologice ale oțelului cât și proprietățile sale de utilizare.

Proprietățile tehnologice ale oțelului (rezistența la deformare prin laminare, plasticitatea, comportarea la tratament termic) sunt influențate de prezența incluziunilor nemetalice, prin comportarea acestora în timpul procesului de laminare și prin solubilitatea lor în austenită. Incluziunile de sulfuri (MnS , FeS) au caracter metalic și sunt relativ moi și plastice; incluziunile de oxizi (în special SiO_2 și Al_2O_3), precum și incluziunile de silicați ($2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) și spineli ($\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) au caracter nemetalic și sunt dure și fragile.

În produsele laminate din oțel, incluziunile de sulfuri sunt alungite în șiruri continue în timp ce incluziunile fragile sunt sfărâmate formând șiruri discontinue în direcția efortului aplicat la laminare. Această distribuție a incluziunilor contribuie, alături de fibrajul provocat de segregatii, la anizotropia proprietăților produselor laminate. Prezența incluziunilor sub formă de eutectice ușor fuzibile, ca de exemplu ($\text{FeS} + \text{FeO}$) cu temperatura de topire 930°C sau ($\text{FeS} + \text{Fe}$) cu temperatura de topire de 985°C , provoacă fragilitatea la cald a oțelului.

Proprietățile mecanice de utilizare a oțelurilor laminate sunt influențate defavorabil de prezența incluziunilor nemetalice, deoarece incluziunile întrerup continuitatea masei metalice și acționează ca niște creștături interioare. Solicitățile mecanice nu sunt transmise decât în mică măsură prin incluziunile nemetalice, deoarece rezistența mecanică proprie incluziunilor este foarte redusă și legătura lor cu masa metalică este aproape inexistentă. Incluziunile nemetalice pot servi ca amorse de rupere la oboseală, pot provoca rupturi fibroase (când sunt distribuite în șiruri) sau rupturi în terasă (când sunt distribuite în plăci cum este cazul incluziunilor exogene). Din aceste motive pretențiile la *puritatea* fizică a oțelurilor sunt deosebit de mari, mai ales în aplicațiile în care intervin solicitări dinamice și alternante importante.

1.5. INFLUENȚE GENERALE ȘI SPECIFICE ALE ELEMENTELOR DE ALIERE ÎN OȚELURI

Elementele de aliere (cromul, nichelul, molibdenul, wolframul, vanadiul, titanul, manganul, siliciul etc.) se introduc special în oțeluri, în anumite concentrații și au rolul de a modifica proprietățile oțelurilor atât pentru a ușura prelucrarea ulterioară a acestora cât și pentru a le îmbunătăți comportarea în serviciu. Unele elemente, considerate dăunătoare în anumite oțeluri, devin elemente de aliere pentru alte tipuri de oțeluri. De exemplu, *sulful* în oțelurile nealiate poate provoca fragilitate la cald, dar poate conferi, ca element de aliere în oțelurile pentru prelucrarea pe mașini automate, o bună prelucrabilitate prin așchiere. De asemenea, *siliciul* reprezintă o impuritate în oțelurile care trebuie să

aibă o bună sudabilitate, în schimb conferă proprietăți magnetice bune oțelurilor pentru mașini electrice (oțeluri pentru electrotehnică). Azotul și cuprul sunt elemente dăunătoare în oțelurile nealiat, dar pot deveni elemente utile în cazul unor oțeluri aliate, bogate în crom, la care azotul asigură finisarea granulației, în timp ce cuprul asigură oțelului o rezistență mai mare la acțiunea agenților atmosferici.

Prezența elementelor de aliere influențează comportarea oțelurilor la deformarea plastică și la tratamentul termic, datorită modificărilor de constituție și structură pe care le produc. În continuare se prezintă atât influențele generale ale elementelor de aliere cât și influențele specifice fiecărui element de aliere asupra constituției și structurii oțelurilor și, implicit, asupra comportării la deformare a oțelurilor aliate.

1.5.1. Influențe generale ale elementelor de aliere

Influența elementelor de aliere asupra transformărilor alotropice ale fierului este cea mai importantă în modificarea constituției și structurii oțelurilor. După influența pe care o exercită asupra transformărilor alotropice ale fierului, elementele de aliere se pot grupa în: *a* – elemente de aliere care ridică punctul critic de transformare A_4 și coboară pe A_3 (v. fig. 1.3), adică măresc domeniul γ , motiv pentru care se numesc *elemente gamagene*; *b* – elemente de aliere care coboară pe A_4 și ridică pe A_3 , micșorând domeniul γ și măbind domeniul α , motiv pentru care se numesc *elemente alfa gene*. Din prima grupă numită și grupa nichelului, fac parte nichelul, manganul, cobaltul, cuprul, azotul, carbonul etc.. Primele trei dintre acestea fiind solubile în fier în orice proporție, nu limitează domeniul γ la nici o concentrație, diagrama de echilibru fiind în acest caz de forma prezentată în figura 1.8, *a* (asemănătoare diagramelor Fe-Ni, Fe-Mn și Fe-Co). Ultimele două elemente din această grupă, azotul și carbonul, formând compuși, limitează domeniul γ , diagrama de echilibru fiind asemănătoare diagramei Fe-C (fig. 1.8, *b*).

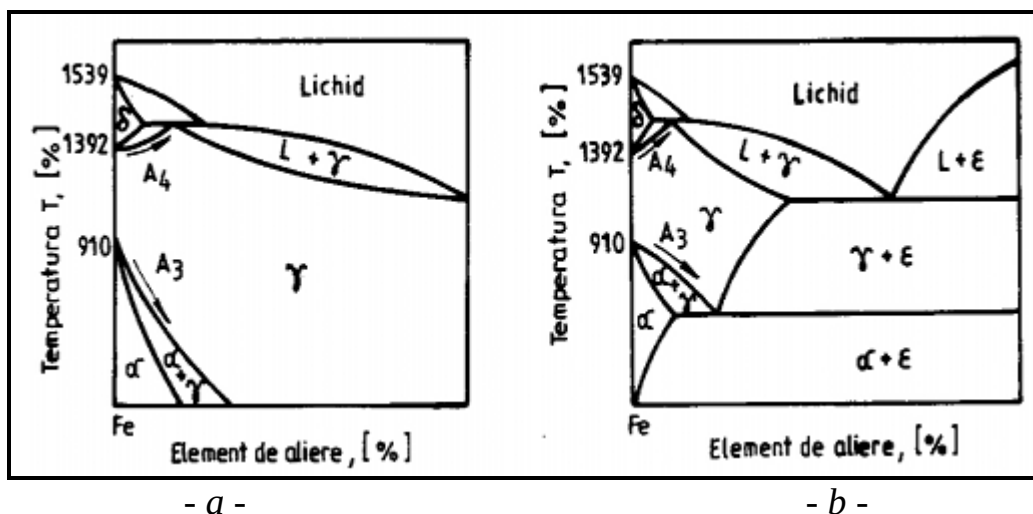


Fig. 1.8. Reprezentarea schematică a modificării domeniului γ în cazul influenței elementelor gamagene:

a – domeniul γ deschis; *b* – domeniul γ limitat.

Din cea de a doua grupă, grupa elementelor alfagene, fac parte molibdenul, wolframul, siliciul, titanul, aluminiul, beriliul, niobiul, borul și zirconiu. Această grupă se numește grupa cromului; cromul micșorează domeniul γ deși până aproape de 10% acesta coboară atât punctul A_4 cât și punctul A_3 . Elementele din această grupă, cu excepția ultimelor două, fiind foarte solubile în fier închid complet domeniul γ , rezultând diagrame de forma prezentată în figura 1.9, *a*. Ultimele două elemente din această grupă, având solubilitate foarte mică în fier, formează compuși care limitează domeniul α , diagrama de echilibru având aspectul din figura 1.9, *b*.

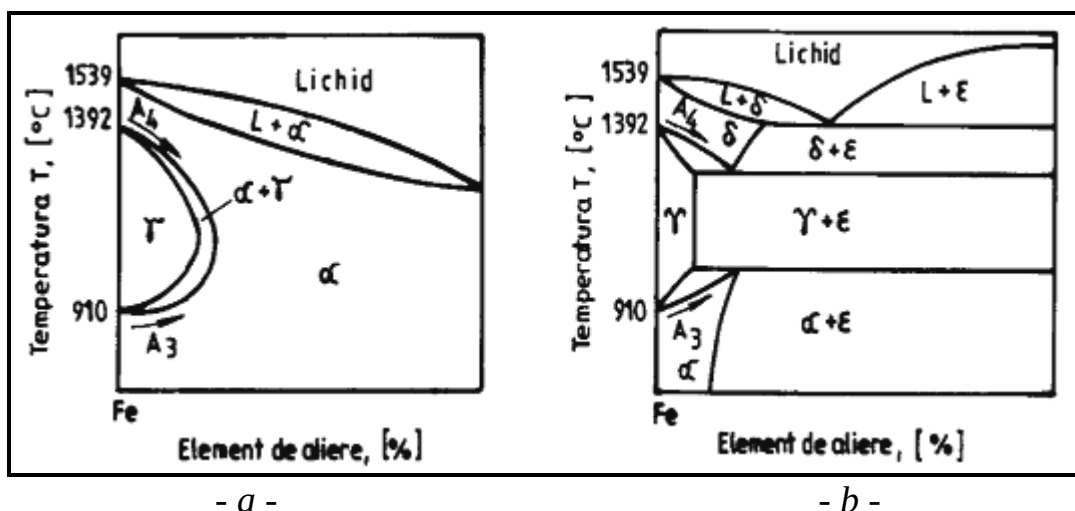


Fig. 1.9. Reprezentarea schematică a modificării domeniului α în cazul influenței elementelor alfagene:

a – domeniul α deschis; *b* – domeniul α limitat.

De cele mai multe ori oțelurile aliate nu conțin un singur element de aliere ci două sau mai multe, care pot avea efecte similare sau contrare. De exemplu, în oțelurile inoxidabile, cromul este alfagen, iar nichelul este gamagen. În vederea cuprinderii unui număr mai mare de elemente de aliere, care definesc structura oțelurilor aliate, se folosește noțiunea de nichel echivalent ($\%Ni_{ech}$) pentru elementele gamagene și noțiunea de crom echivalent ($\%Cr_{ech}$) pentru elementele alfagene, care se determină cu relațiile:

$$\% Ni_{ech} = \% Ni + 30 \% C + 0,5 \% Mn \quad (1.1)$$

$$\% Cr_{ech} = \% Cr + \% Mo + 1,5 \% Si + 0,5 \% Nb \quad (1.2)$$

În funcție de concentrația acestor elemente echivalente se pot determina componentele structurale din oțelurile inoxidabile folosind, de exemplu, diagrama Schöffler (fig. 1.10).

În funcție de comportarea față de carbon, elementele de aliere din oțeluri se grupează în: *a* – elemente care formează carburi, ca de exemplu cromul, manganul, niobiul; *b* – elemente care nu formează carburi, ca nichelul, siliciul, cobaltul, aluminiul, cuprul și azotul. În anumite condiții și unele elemente din această grupă, ca nicehlul, cobaltul și aluminiul formează carburi instabile.

Toate carburile sunt caracterizate prin duritate și fragilitate mare. Carburile elementelor de aliere sunt mai dure, dar mai puțin fragile decât

cementita. Ele influențează rezistența mecanică și duritatea oțelurilor aliate, mărind aceste caracteristici nu atât prin compoziția lor chimică ci mai ales prin gradul lor de dispersie.

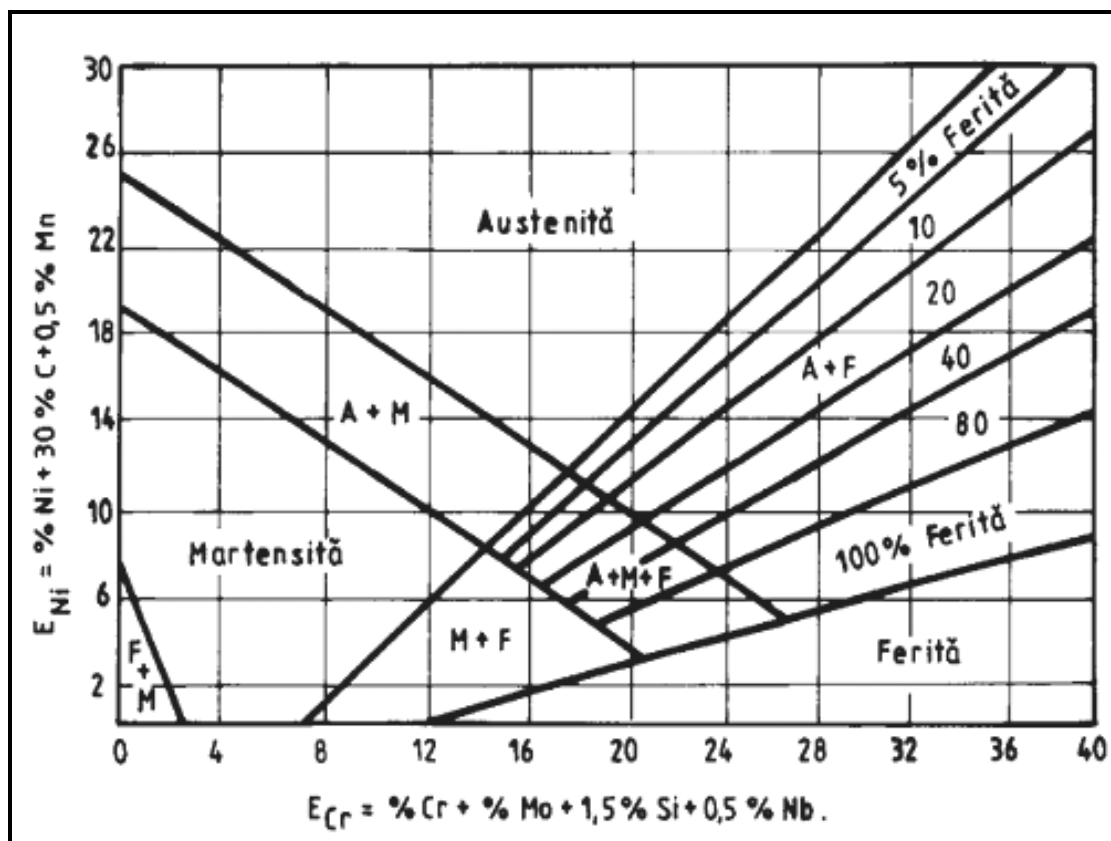


Fig. 1.10. Diagrama Schäffler.

Distribuția elementelor de aliere în oțelurile solidificate determină, de asemenea, influența generală a acestora asupra proprietăților oțelurilor aliate. Elementele de aliere se pot găsi în oțeluri sub diferite forme: *a* – dizolvate în ferită, cu care formează soluții solide; *b* – în combinații cu carbonul, cu care formează carburi sau soluții solide pe bază de carburi; *c* – în combinații cu fierul sau unele cu altele, formând compuși intermetalici; *d* – în combinații cu diferite impurități, sulf, oxigen etc., cu care formează incluziuni nemetalice ca sulfuri, oxizi etc.; *e* – în stare liberă, sub formă de particule dispersate în masa oțelului aliat.

Majoritatea elementelor de aliere formează cu fierul *soluții solide de substituție*. Unele dintre acestea, cum sunt nichelul și cobaltul, sunt total solubile în fier până la temperaturi joase, însă altele ca vanadiul și cromul formează cu fierul, la temperaturi apropiate de temperatura de solidificare, soluții solide pe întreg intervalul de concentrație, dar la răcire, la anumite concentrații, formează compuși. Alte elemente ca bor, azot, oxigen și hidrogen se dizolvă în fier în concentrații foarte mici (zecimi sau sutimi de procente) formând soluții solide interstițiale, iar peste aceste concentrații formează compuși.

O parte din elementele situate în tabelul lui Mendeleev la dreapta fierului cum sunt nichelul, cobaltul, siliciul, cuprul etc., în prezența carbonului se dizolvă total în ferită, formând soluții solide.

Aceste elemente nu formează carburi sau formează carburi instabile, cum este cazul nichelului, cobaltului și aluminiului. Spre deosebire de acestea, o parte din elementele care sunt situate la stânga fierului în tabelul lui Mendeleev, ca titanul, vanadiul, cromul, manganul, zirconiu, niobiul, molibdenul, wolframul etc., în prezența carbonului formează carburi. Datorită acestui fapt, elementele din această categorie se găsesc în oțeluri parțial sub formă de carburi și parțial dizolvate în ferită. Elementele de aliere cu afinitate mai mare pentru oxigen și sulf decât afinitatea fierului, ca manganul, siliciul, aluminiul, titanul, vanadiul etc. formează cu oxigenul și sulful oxizi și sulfuri. Deoarece proporția de oxigen și sulf din oțeluri este strict limitată, proporția de oxizi și sulfuri din oțeluri este de regulă, foarte mică. Influența conținutului de carbon (fig. 1.11) și a conținuturilor în principalele elemente de aliere (fig. 1.12) din oțeluri asupra proprietăților mecanice caracterizează comportarea la deformare a oțelurilor aliate.

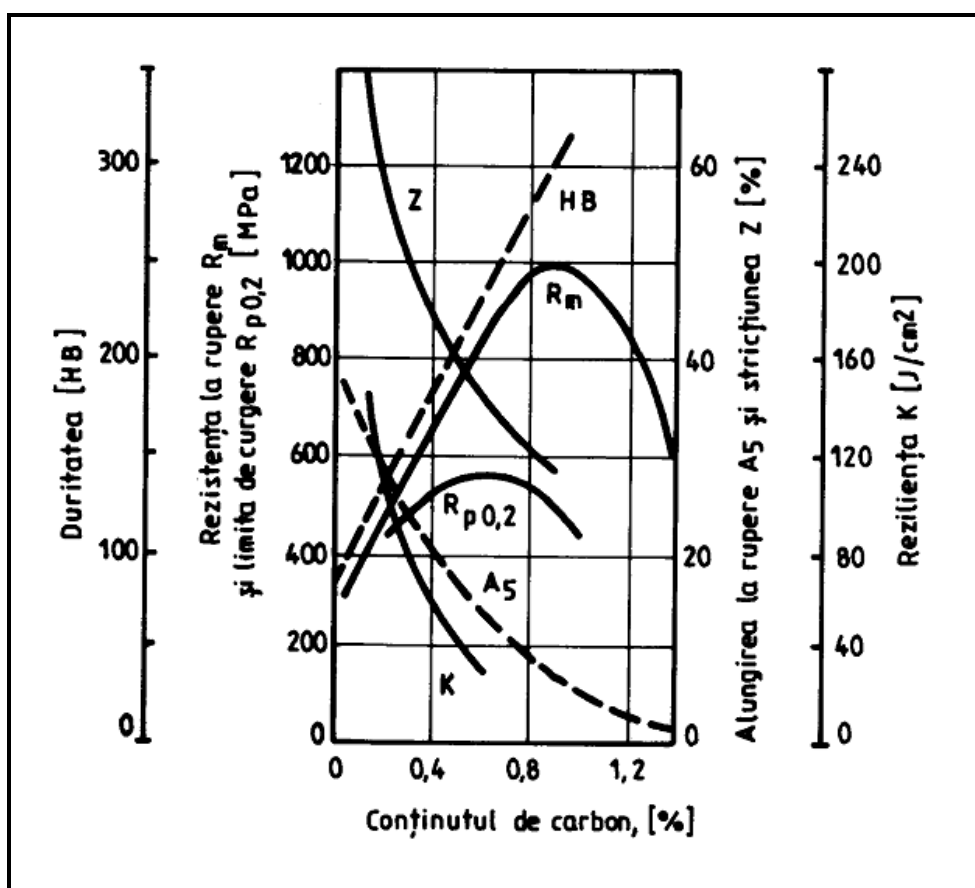
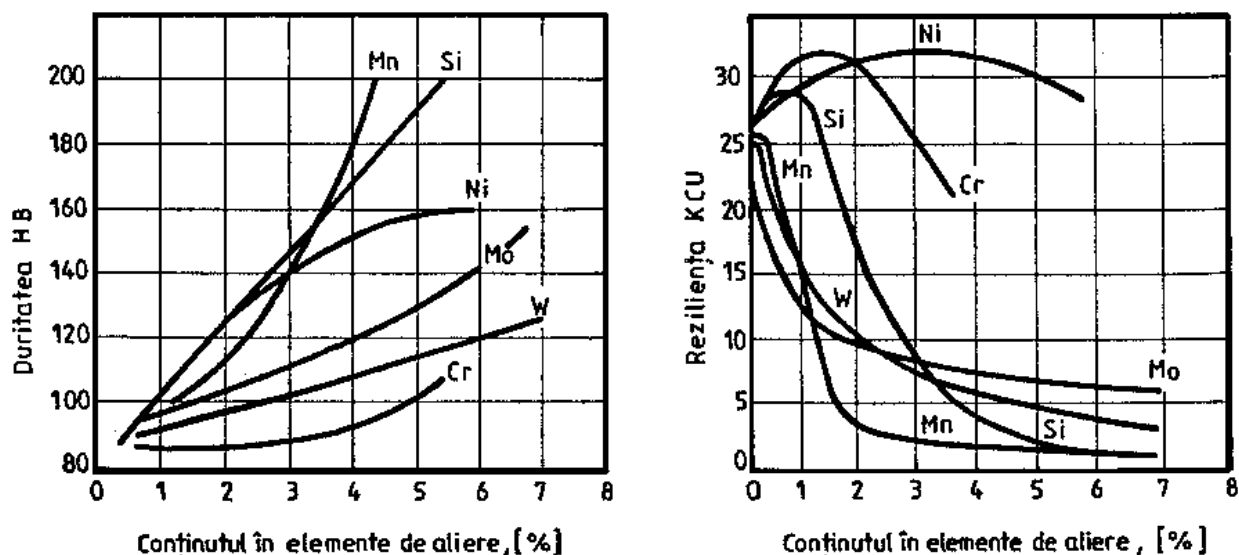


Fig. 1.11. Influența conținutului de carbon asupra caracteristicilor mecanice ale oțelurilor.

Aceste modificări de proprietăți mecanice sunt determinate de faptul că, elementele de aliere, dizolvându-se în ferită, modifică parametrul rețelei cristaline a fierului; cromul, niclelul, wolframul și molibdemul măresc parametrul rețelei fierului, iar siliciul îl micșorează. Pentru determinarea valorii rezistenței la rupere a oțelurilor aliate se poate utiliza relația:

$$R_m = 25 + 61 \cdot \% P - 4 \cdot \% S + (51 + 37 \cdot \% Mn) \cdot \% C + (36 - 15 \cdot \% Mn) \cdot (\% Si)^2 + 6,2 \cdot \% Cr + 4,4 \cdot \% Ni + 36 \cdot \% Mo \quad (1.3)$$



- a -

- b -

Fig. 1.12. Influența elementelor de aliere asupra durității (a) și rezilienței (b) feritei

1.5.2. Influențe specifice ale elementelor de aliere

Influențele specifice ale principalelor elemente de aliere asupra proprietăților oțelurilor aliate se prezintă în tabelul 1.7. Majoritatea oțelurilor aliate conțin mai multe elemente de aliere, însă numai unul este cel care determină proprietatea de utilizare a unui anumit oțel, celelalte elemente contribuind la creșterea purității oțelului sau la îmbunătățirea comportării la deformare plastică, la tratament termic sau la prelucrarea mecanică.

Pe acest considerent, în cele ce urmează se va prezenta rolul pe care fiecare element de aliere îl are în oțeluri.

Manganul este un element gamagen și exercită o influență mare asupra diagramei fier-carbon, coborând domeniile care corespund punctelor critice de transformare A_1 și A_3 . Diagrama structurală a oțelurilor mangan (după Bain) este prezentată în figura 1.13.

Manganul se găsește, ca element însoțitor, în toate oțelurile și, ca atare, determină efecte speciale numai la concentrații mai mari de 0,6...0,8% Mn, când oțelul trece din oțel nealiat în oțel aliat.

Proprietățile de rezistență ale oțelurilor mangan martensitice cresc puternic la creșterea conținutului de mangan, însă în același timp tenacitatea scade brusc. Pentru acest motiv aceste oțeluri nu sunt utilizate în practică. Proprietățile de rezistență ale oțelurilor mangan austenitice (oțeluri manganoase) scad la creșterea conținutului în mangan, iar cele de plasticitate și tenacitate cresc sensibil. Aceste oțeluri sunt caracterizate și printr-o mare capacitate de *ecruisare*, motiv pentru care sunt foarte apreciate atât ca oțeluri pentru construcții de mașini cât și ca oțeluri pentru scule, toate conținând până la 2% Mn. Mult mai des este utilizat manganul în oțelurile perlitice, complex aliate, care conțin și nichel, crom sau molibden. În aceste cazuri, oțelurile conțin

până la 1,5% Mn, care se adaugă în vederea economisirii acestor elemente scumpe și deficitare.

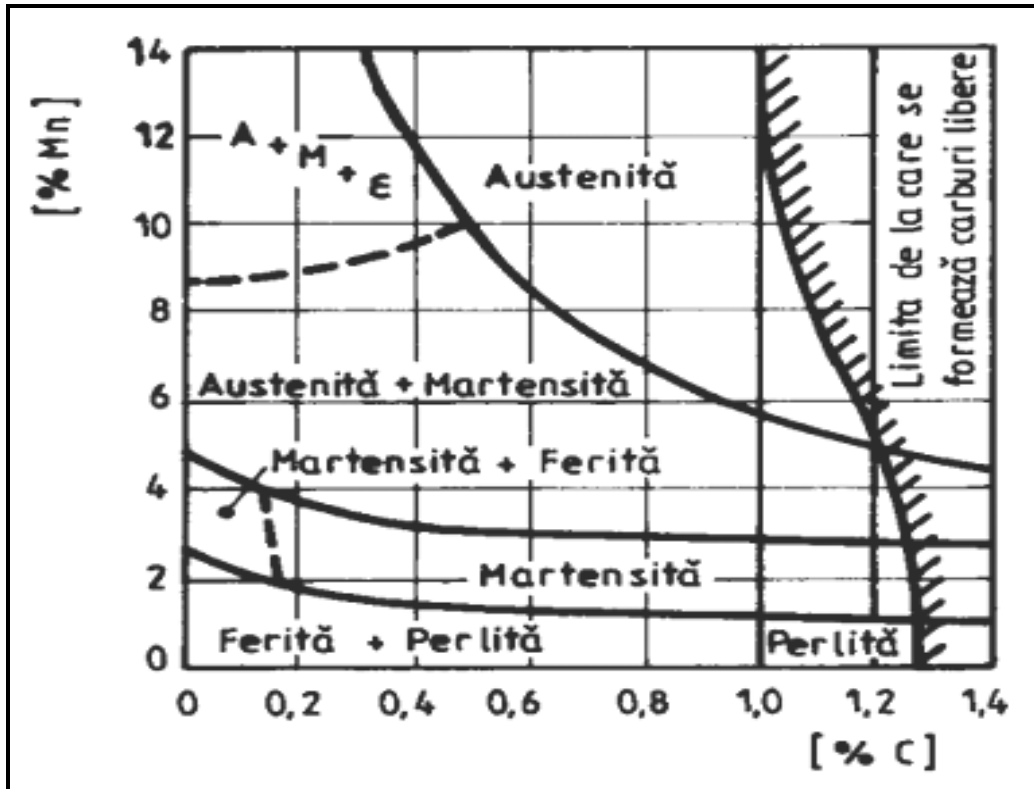


Fig. 1.13. Diagrama structurală a oțelurilor mangan (austenizare la 950°C, răcire în aer).

Manganul, coborând temperatura transformării martensitice, mărește sensibilitatea oțelului la crăparea după sudare, în special la oțeluri cu peste 0,2% C. De asemenea, mărește sensibilitatea la fragilitate de revenire la oțelurile cu 1,5...2% Mn.

Manganul produce sensibilitate la supraîncălzire și proprietăți mai slabe pe direcția transversală față de direcția de deformare. Asigură o oarecare creștere a deformabilității la rece a oțelurilor. La concentrații de peste 10% Mn și de 0,7...1,3% C, oțelul devine complet austenitic (nemagnetic) și foarte tenace după călirea în apă. Manganul are și rol dezoxidant în oțeluri, măbind capacitatea de dezoxidare a siliciului precum și rol de legare a sulfului, producând sulfuri cu temperatură de topire mai mare decât cea de încălzire pentru laminare, evitându-se astfel fragilitatea la cald a oțelurilor, mai ales dacă $\% \text{ Mn} > 8 \cdot \% \text{ S}$, măbindu-se astfel plasticitatea oțelului.

Nichelul este un element de aliere gamagen și nu formează carburi, dizolvându-se atât în ferită cât și în austenită. Prin dizolvarea în ferită mărește duritatea și rezistența mecanică a oțelurilor, ceea ce conferă posibilitatea ca, pen-tru aceleași proprietăți, să se poată reduce conținutul de carbon, asigurându-se astfel o creștere a proprietăților de deformabilitate și de sudabilitate ale oțelurilor. În acest mod nichelul se utilizează în locul măririi conținutului de carbon, atunci când este necesară îmbunătățirea caracteristicilor de rezistență mecanică fără a fi afectate caracteristicile de plasticitate și de sudabilitate.

Influențe specifice ale elementelor de aliere asupra proprietăților oțelurilor Tabelul nr.1.1

Proprietățile oțelurilor	Proprietăți mecanice										Proprietăți magnetice											
	Duritate	Rezistența la rupere	Limita de curgere	Alungirea	Stricțiunea	Reziliența	Elasticitatea	Rezistența mecanică la temperaturi înalte	Viteza de răcire	Formarea de carburi	Rezistența la uzură	Deformabilitatea	Prelucrabilitatea prin așchiere	Rezistența la oxidare	Capacitate de nitrare	Rezistența la coroziune	Histerzis	Permeabilitatea	Forța coercitivă	Remnență	Pierderi W	
Elemente de aliere																						
Crom	↑↑	↑↑	↑↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↑↑	↑↑	↑	↑	-	↑↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	↑	↑↑	↑↑	-
Nichel-oțel perlitic	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑	↑↑↑	-	↑↑	↑	↑	↑	-	-	-	-	↑↑	↑↑	-	-
Nichel-oțel austenitic	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	↑↑	↑↑	-	↑↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-
Siliciu	↑	↑	↑↑	↑	↑	↑	↑↑	↑	↑	↑	↑↑	↑	↑	↑	↑	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑
Mangan-oțel perlitic	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↑	↑	↑	↑	↑	-	-	-	-	-	-	-
Mangan-oțel austenitic	↑↑↑	↑	↑	↑↑	↑	-	-	-	↑↑	-	-	↑↑↑	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-	↑↑	↑↑	-
Aluminiu	-	-	-	-	↑	↑	-	-	-	-	-	↑↑	-	↑↑	↑↑	-	-	-	↑↑	↑↑	-	-
Wolfram	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑	-	-	-	↑↑	↑↑	↑↑	-
Vanadiu	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑	-	↑	↑	↑	-	-	-	-	-	-
Cobalt	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑↑	↑↑	-	↑↑	↑	~	↑	-	-	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	-
Molibden	↑	↑	↑	↑	↑	↑	-	↑↑	↑↑	↑↑	↑↑	↑	↑	↑↑	↑↑	-	-	-	↑	-	-	-
Cupru	↑	↑	↑↑	~	~	~	-	↑	-	-	-	↑↑↑	~	~	-	↑	-	-	-	-	-	-
Sulf	-	-	-	↑	↑	↑	-	-	-	-	-	↑↑	↑↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fosfor	↑	↑	↑	↑	↑	↑↑	-	-	-	-	-	↑	↑↑	-	-	-	-	-	-	-	-	-
↑ - crește ; ↓ - scade ; ~ - constant ; - nu influențează sau necunoscut ; mai multe săgeți - influență importantă																						

↑ - crește ; ↓ - scade ; ~ - constant ; - nu influențează sau necunoscut ; mai multe săgeți - influență importantă

Efectul nichelului este similar cu cel al carbonului, în sensul că valori mai mari ale concentrației de nichel în oțelurile feritice cu crom, determină reapariția austenitei, iar la anumite concentrații de nichel și anumite viteze de răcire, oțelul devine integral austenitic.

În oțeluri, nichelul se dizolvă în cea mai mare parte în ferită. Alierea cu nichel a oțelurilor duce la deplasarea liniilor diagramei de echilibru; nichelul coboară temperatura lichidus, ridică temperatura eutectică și micșorează conținutul în carbon al perlitei. Diagrama structurală a oțelurilor nichel după structura obținută la răcire în aer (diagrama Guillet) este prezentată în figura 1.14.

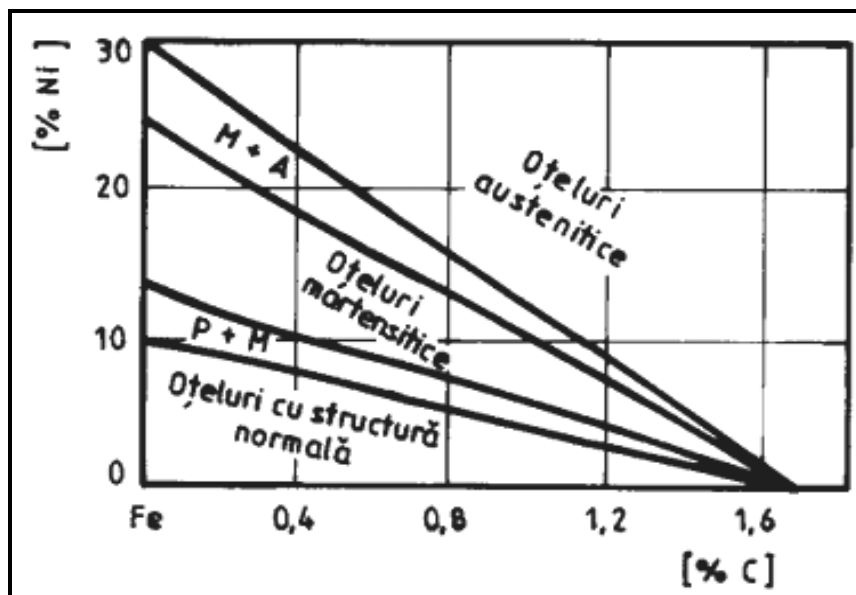


Fig. 1.14. Diagrama structurală a oțelurilor nichel.

Proprietățile mecanice de rezistență ale oțelurilor nichel perlitice (rezistența la rupere, limita de curgere și duritatea) cresc lent la creșterea conținutului de nichel, iar proprietățile de plasticitate (stricțiunea și alungirea la rupere) scad. Oțelurile nichel perlitice sunt utilizate pentru cementare ($C < 0,25\%$) și pentru îmbunătățire ($C = 0,3...0,6\%$). Aceste oțeluri conțin, de regulă, cel mult 4...5% Ni. Oțelurile martensitice și austenitice cu nichel sunt puțin utilizate, primele din cauza tenacității foarte scăzute, iar ultimele, cele austenitice, deoarece nu sunt competitive economic cu oțelurile austenitice cu mangan. Dintre oțelurile nichel martensitice sunt utilizate oțelurile maraging, iar dintre oțelurile nichel austenitice utilizate se menționează aliajele cu proprietăți termice și elastice speciale ca invar, elinvar și aliajele cu proprietăți magnetice speciale (permalloy).

Siliciul, în oțeluri, este un element alfagen, închizând domeniul γ la 1,7% Si, astfel încât, peste această concentrație este stabilă ferita până la temperatura de topire. În oțeluri siliciul nu formează compuși cu fierul ci se dizolvă în cea mai mare parte în ferită, restul în cementită. Siliciul nu formează nici carburi ci dimpotrivă, acționează ca un element grafitizant.

Siliciul mărește rezistența la rupere, limita de curgere și duritatea oțelurilor. Stricțiunea și alungirea la rupere se modifică relativ puțin până la

2,5% Si, la acest conținut scăzând brusc. O puternică influență manifestă siliciul asupra limitelor de elasticitate și de curgere a oțelurilor, fapt care prezintă o mare importanță practică. Deoarece ridică limita de curgere a oțelurilor, siliciul este indezirabil în produsele destinate deformărilor plastice mari cum sunt tablele pentru ambutisare adâncă. Limita de elasticitate ridicată face ca oțelurile siliciu să fie mult apreciate ca oțeluri pentru arcuri. În oțelurile inoxidabile siliciul, în concentrații de 2...2,5% Si, mărește rezistența la oxidare la cald și micșorează tendința de creștere a granulației, deci și a fragilității. În oțelurile austenitice, creșterea concentrației de siliciu trebuie să fie însoțită de creșterea corespunzătoare a concentrației de nichel pentru ca oțelul să rămână austenitic.

Cromul este un element alfa-gen care închide domeniul γ . Spre deosebire de alte elemente alfa-gene, cromul nu ridică de la început punctul A_3 ; la creșterea conținutului în crom până la 7%, A_3 coboară și abia după aceasta urcă. La concentrații de peste 13% Cr structura aliajelor fier-crom este, la temperatură înaltă, feritică pe întreg intervalul de concentrație.

O puternică influență exercită cromul asupra punctelor S și E ale diagramei Fe-Fe₃C. Sub influența cromului temperaturile punctelor S și E cresc, iar concentrațiile corespunzătoare scad. Într-un oțel cu 12% Cr, conținutul în carbon al eutectoidului este de circa 0,35%, iar concentrația maximă a carbonului în austenită este de circa 0,7%. Diagrama structurală a oțelurilor crom, după

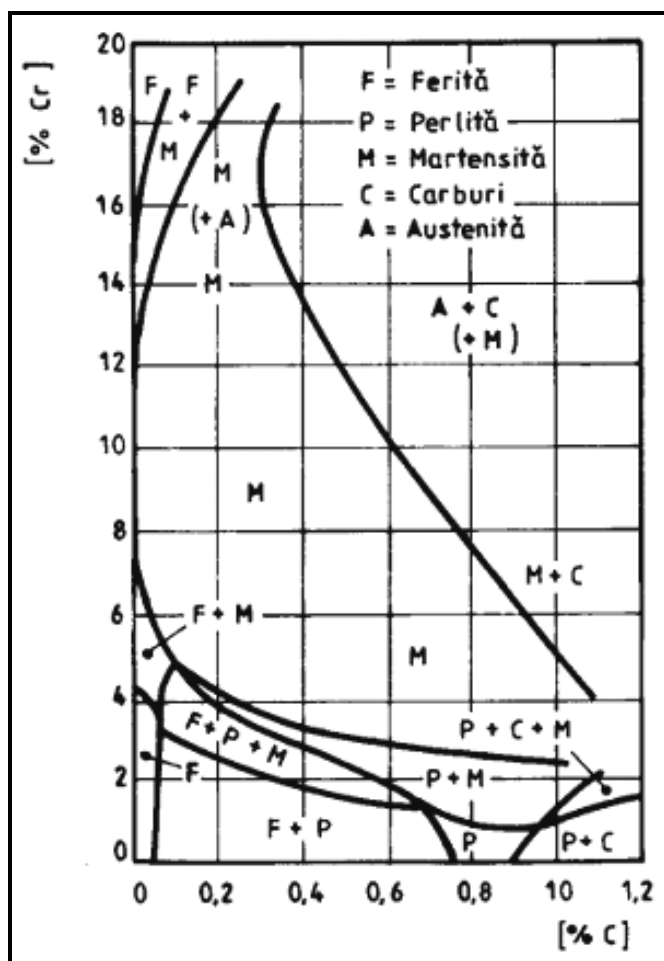


Fig. 1.15. Diagrama structurală a oțelurilor crom.

structura obținută la răcirea în aer, este prezentată în figura 1.15. Cromul activează relativ slab asupra proprietăților mecanice ale oțelurilor; el se dizolvă în ferită și o durifică ușor, însă într-o măsură mult mai mică decât siliciul, manganul sau nichelul. De asemenea formând carburi și crescând proporția de perlită, exercită o acțiune durificatoare asupra oțelurilor, însă rezistența oțelurilor crom crește foarte lent la creșterea conținutului de crom. La conținuturi mici în crom și carbon, până la circa 2,5% Cr și până la 0,5...0,6% C, cromul manifestă o influență relativ mică asupra caracteristicilor de rezistență și plasticitate ale oțelurilor. Se remarcă influența deosebit de favorabilă a cromului asupra rezilienței,

influență determinată de capacitatea cromului de a finisa structura.

În oțeluri, cromul micșorează deformabilitatea prin scăderea caracteristicilor de plasticitate și prin creșterea caracteristicilor de rezistență la deformare. În același timp mărește capacitatea de călire a oțelurilor de construcții, mărește duritatea superficială la oțelurile moi de cementare, asigură o granulație fină la oțelurile de rulmenți și mărește rezistența la coroziune la oțelurile inoxidabile. Cromul micșorează ambutisabilitatea tablelor din oțeluri inoxidabile austenitice.

Molibdenul este un element alfa-gen, închizând domeniul γ la concentrații cuprinse între 2,5...3% Mo, dar este mai puțin activ decât siliciul. În oțeluri molibdenul se dizolvă parțial în ferită și în cementită, restul formând carburi de molibden.

Dizolvându-se în ferită și formând carburi, molibdenul mărește caracteristicile de rezistență mecanică și, într-o oarecare măsură, caracteristicile de plasticitate ale oțelurilor; la conținut constant de carbon rezistența la rupere și limita de curgere a oțelurilor călite și revenite cresc cu conținutul de molibden până la un maxim, care pentru oțelurile cu 0,45...0,5% C se află la 2% Mo; în aceste condiții caracteristicile de plasticitate rămân aproape nemodificate.

Formând carburi, molibdenul mărește rezistența la uzare precum și rezistența la temperaturi ridicate; oțelurile ce 2% Mo își mențin duritatea mare până la temperaturi de 400...600°C. Molibdenul îmbunătățește stabilitatea chimică în acizi (sulfuric, clorhidric și tartric), ca și în unele soluții alcaline, a oțelurilor inoxidabile austenitice crom-nichel. Oțelurile molibden pot înlocui oțelurile mai scumpe crom-nichel.

Wolframul este un element alfa-gen care are influență similară cromului și molibdenului, mărină rezistența mecanică a oțelurilor și menținând valori ridicate ale acestora și la temperaturi mai înalte. Wolframul este un element puternic carburigen; formând carburi stabile, wolframul micșorează susceptibilitatea la supraîncălzire a oțelurilor. El ridică temperatura punctului A_3 și temperatura de austenizare, micșorând susceptibilitatea de fisurare la călire deoarece oțelurile aliate cu wolfram au granulație fină. Prezența wolframului în oțeluri scade plasticitatea acestora ca urmare a eterogenității chimice produsă prin tendința sa de segregare.

Vanadiul este un element alfa-gen care închide domeniul γ la o concentrație de 1,1% V când nu se mai produce transformarea feritei în austenită, oțelul fiind complet feritic. Fiind un element puternic carburigen formează carburi foarte fine și cu duritate mare, greu dizolvabile în austenită, astfel încât asigură oțelurilor structură fină; în același timp micșorează și sensibilitatea la supraîncălzire a oțelurilor.

Plasticitatea oțelurilor este puțin influențată de prezența vanadiului în compoziția chimică a acestora, dar mărirea accentuată a rezistenței la deformare determină necesitatea limitării conținutului de vanadiu în oțeluri. Prin capacitatea vanadiului de a forma nitruri stabile, micșorează tendința de îmbătrânire a oțelului și, ca atare, este recomandat în oțelurile extramoi destinate laminării la rece. În oțelurile semidure vanadiul îmbunătățește limita de curgere

la cald și limita de elasticitate.

Titanul, ca element alfa-gen, închide domeniul γ la aproximativ 1,2% Ti. Solubilitatea în ferită este limitată ca urmare a formării compusului Fe_2Ti . De asemenea, titanul reacționează puternic cu carbonul și cu azotul, formând carburi și nitruri greu solubile. Deoarece solubilitatea titanului în fier variază cu temperatura, aliajele fier-titan sunt durificabile structural. Titanul mărește rezistența la coroziune a oțelurilor inoxidabile (cromul nu mai formează carburi ci rămâne dizolvat în ferită), îmbunătățește rezistența la îmbătrânire și micșorează tendința de fragilizare sub 0°C .

Carburile de titan, foarte fine și greu solubile, micșorează tendința de creștere a grăunțului de austenită la temperaturi înalte, iar prin favorizarea precipitării de compuși intermediari mărește rezistența la fluaj a oțelurilor.

Cobaltul nu are o influență pronunțată asupra structurii oțelurilor, dar fiind solubil în soluția solidă influențează favorabil viteza de difuzie a carbonului, micșorând astfel călibilitatea oțelurilor. Are tendință foarte scăzută de formare a carburilor, iar dizolvat în ferită îmbunătățește caracteristicile mecanice ale acesteia, atât la cald cât și la rece.

Cobaltul mărește conductibilitatea termică a oțelurilor, reducând sensibilitatea la supraîncălzire și micșorând tendința de creștere a granulației austenitei la temperaturi ridicate. Cobaltul nu este permis în oțelurile pentru reactoarele nucleare deoarece sub bombardament neutronic formează izotopul $\text{Co}60$ care este puternic radioactiv. Este utilizat în oțeluri de scule și în oțeluri rapide pentru micșorarea sensibilității de deformare la tratament termic. Asociat cu nichelul este folosit la fabricarea aliajelor pe bază de fier cu coeficient de dilatare scăzut.

Borul este un element alfa-gen, solubilitatea acestuia în fier fiind foarte mică. Cu fierul, borul formează mai mulți compuși dintre care compusul Fe_2B formează un eutectic cu fierul, cu temperatura de topire de $1\ 161^\circ\text{C}$ și cu un conținut de 3,8% B. Acest eutectic imprimă oțelurilor cu bor fragilitate la cald chiar și pentru conținuturi foarte mici de bor, de aceea borul se admite în oțeluri doar sub concentrația de 0,01% B.

La conținuturi mici, sub 0,0005%, borul nu influențează capacitatea de creștere a grăunțurilor de austenită, însă la conținuturi mai mari de 0,006% B grăunțele austenitice crește puternic. Influența borului asupra călibilității oțelurilor se manifestă de la conținuturi foarte mici, începând cu 0,0004% B. Această influență crește cu conținutul de bor până la 0,005% B, pentru oțeluri cu conținut ridicat de carbon și până la 0,008% B pentru oțeluri sărace în carbon. La conținuturi de bor mai mari de 0,005% B și, respectiv, 0,008% B, adâncimea de pătrundere a călirii scade deoarece precipită compusul Fe_2B care micșorează stabilitatea austenitei.

Conținuturi reduse de bor, sub 0,005% B, ameliorează deformabilitatea oțelurilor și reduce tendința de fisurare. Borul îmbunătățește și capacitatea de prelucrare prin așchiere, iar în oțelurile inoxidabile mărește rezistența mecanică însă micșorează puțin rezistența la coroziune intercristalină.

Aluminiul este un element alfa-gen și nu formează carburi în oțeluri.

Aluminiul este unul din cei mai buni dezoxidanți și degazeificatori, provocând și compactizarea oțelurilor. La conținuturi până la 1...2% Al, acesta nu influențează deformabilitatea oțelurilor, însă la conținuturi mai mari de 6...7% Al, plasticitatea oțelurilor se reduce mult. Aluminiul îmbunătățește rezistența oțelurilor la coroziune, la temperatura ambiantă. Adăugat în proporții mici, până la 0,1% Al, micșorând capacitatea de creștere a grăunților de austenită, contribuie la obținerea unor structuri fine, caracterizate prin proprietăți de rezistență, plasticitate și tenacitate bune. Creșterea conținutului de aluminiu determină o ușoară creștere a proprietăților de rezistență, peste 2% reducându-se brusc tenacitatea.

Zirconiul are afinitate mare pentru oxigen (este un dezoxidant mai bun decât aluminiul sau titanul), iar oxidul format având temperatura de topire ridicată, 2 700°C și fiind fin dispersat în masa oțelului, contribuie la finisarea granulației. Zirconiul acționează și asupra sulfului formând sulfuri și, ca atare, în oțelurile pentru automate cu 0,2% S și 0,15% Mn se adaugă cel puțin 0,22% Zr cu scopul de a putea fi prelucrate prin laminare la cald (sau se adaugă 0,45% Zr pentru oțelurile cu 0,3% S), cu scopul ameliorării plasticității și rezistenței la fluaj a acestor oțeluri. Zirconiul reacționează cu azotul rezultând nitruri care se topesc la temperaturi de peste 2 900°C, atenuându-se efectul azotului și mărindu-se astfel rezistența la oboseală a oțelului.

Lantanidele au capacitate foarte mare de dezoxidare și acționează asupra hidrogenului, azotului, sulfului și fosforului, reducându-le concentrația și, implicit, efectul dăunător. Cel mai frecvent se utilizează în oțelurile inoxidabile și refractare cărora le îmbunătățesc deformabilitatea, prin finisarea granulației primare.

Dintre *elementele dăunătoare* în oțeluri pot fi enumerate cuprul, plumbul, staniul, fosforul, sulful, azotul etc.. *Cuprul*, din momentul în care s-a dizolvat în soluția solidă, nu mai poate fi îndepărtat deoarece acesta nu formează carburi și nici compuși definiți cu fierul, iar peste un conținut de 0,2% se separă cupru liber. Concentrații de 0,25...0,50% Cu îmbunătățesc stabilitatea oțelurilor la oxidare la temperaturi ridicate, dar prelucrarea lor prin laminare la cald la temperaturi mai mari decât temperatura de topire a cuprului, 1 083°C, nu se poate realiza din cauza fragilității oțelului. Adaosuri de nichel ($\% \text{Ni} \geq 0,33 \cdot \% \text{Cu}$) face posibilă prelucrarea acestor oțeluri și la temperaturi ridicate. *Plumbul* este practic insolubil în oțeluri și se găsește fin dispersat în masa acestora, reducându-le plasticitatea. Se utilizează totuși pentru îmbunătățirea prelucrabilității prin așchiere a unor oțeluri. *Staniul* produce fragilitatea la laminare la cald. Deoarece micșorează plasticitatea, staniul este limitat sub 0,2% în oțelurile pentru ambutisare adâncă. De asemenea, oțelurile aliate destinate laminării la cald trebuie să fie lipsite de staniu pentru evitarea fisurării și crăpării în timpul laminării. *Fosforul* segregă puternic la solidificare, concentrându-se în zona centrală a lingourilor și formând un eutectic ternar cu temperatura de topire de 953°C, care conduce la fragilizarea oțelurilor la laminarea la cald.

Un conținut de fosfor de peste 0,02% mărește sensibilitatea oțelului la

supraîncălzire, rezultând o structură grosolană și proprietăți mecanice scăzute. *Sulfur* practic nu este solubil în ferită, dar se dizolvă în austenită, la peste 940°C, până la concentrația de 0,25% S. Provoacă fragilitatea la cald care se poate reduce prin adaosuri de mangan (v. cap. 1.4.2). *Azotul* determină îmbătrânirea rapidă a oțelului (dacă nu conține aluminiu sau titan în compoziție), micșorează reziliența și mărește tendința de fragilizare la revenire, producând, în același timp, tensiuni intercristaline. Printr-o dezoxidare avansată, cu aluminiu, așa cum s-a arătat, se poate preveni fragilitatea provocată de azot.

Capitolul 2

SEMIFABRICATE ȘI PRODUSE LAMINATE FINITE DIN OȚELURI ALIATE

Semifabricatele din oțeluri aliate, utilizate ca materie primă în producția de laminate plate, profilate și tubulare și de extrudate profilate și tubulare, se obțin atât prin laminarea lingourilor turnate, cât și prin turnare continuă.

În cazurile în care pentru laminare se utilizează lingouri, procesul de fabricație constă în următoarele etape: a – laminarea lingourilor în vederea obținerii unor semifabricate cu secțiune pătrată (blumuri) sau dreptunghiulară (sleburi sau brame); b – relaminarea blumurilor în semifabricate cu secțiune mai mică (țagle sau platine); c – relaminarea blumurilor și țaglelor în produse lungi sau tubulare finite și, respectiv, a bramelor și platinelor în produse plate (table sau benzi). Anumite produse finite (profiluri grele sau table groase) se pot obține și direct prin laminarea lingourilor.

Cel de-al doilea procedeu de obținere a semifabricatelor din oțeluri aliate – turnarea continuă – cunoaște o dezvoltare impetuoasă, acoperind o gamă sortimentală și calitativă în continuă extindere. Avantajele principale ale turnării continue a semifabricatelor din oțeluri aliate destinate laminării în produse finite constau în mărirea coeficientului de utilizare a metalului, eliminarea operațiilor de turnare în lingouri, stripare, eventual reîncălzirea, laminare degrositoare, etapizarea progresivă a punerii în funcțiune a capacității producătoare de semifabricate și eşalonarea corespunzătoare a investițiilor. Turnarea continuă are însă și unele neajunsuri, depășite ușor de laminoarele degrositoare: elasticitate insuficientă la turnarea întregii game de formate de semifabricate; lipsă de adaptabilitate rapidă la schimbarea formatului turnat; dificultatea, respectiv imposibilitatea turnării unor oțeluri și aliaje speciale.

Analiza caracteristicilor enumerate conduce la concluzia oportunității coexistenței în aceeași unitate siderurgică atât a laminoarelor degrositoare cât și a instalațiilor de turnare continuă, fiecare fiind specializată conform avantajelor oferite. Desigur că aceasta nu reprezintă o regulă. Astfel, se mai menține fluxul clasic cu turnarea în lingouri și laminarea semifabricatelor în special în unitățile siderurgice vechi, cu posibilități limitate de extindere. Pe de altă parte, se adoptă de preferință turnarea continuă, în cazurile în care nivelul de producție se corelează avantajos cu valoarea investiției și când diversitatea formatelor nu este mare (cazul alimentării laminoarelor de benzi late la cald cu sleburi turnate continuu, a laminoarelor de țagle cu blumuri turnate continuu sau a laminoarelor de profiluri sau sârmă cu țagle turnate continuu în număr restrâns de formate).

Coexistența susmenționată este realizată de obicei etapizat, instalarea simultană a celor două tipuri de capacități fiind mai rară.

2.1. SEMIFABRICATE DESTINATE LAMINĂRII

Lingourile din oțeluri aliate destinate laminării se obțin prin turnarea oțelului lichid în lingotiere de forme corespunzătoare procedurii de deformare ulterioară prin laminare în semifabricate sau în produse finite plate sau lungi. În general, au formă de trunchi de piramidă (v. fig. 1.6) sau trunchi de con; fețele laterale pot fi ondulate și cu muchii mai mult sau mai puțin rotunjite. În funcție de condițiile de laminare ulterioară, lingourile pot fi cojite, curățate prin flamare și/sau tăiate la anumite dimensiuni, fără ca aceste operații să le modifice apartenența la categoria de lingouri.

În funcție de secțiunea transversală se disting lingouri pentru produse lungi, inclusiv tubulare și lingouri pentru produse plate. Lingourile pentru produse lungi au secțiunea transversală pătrată, dreptunghiulară (cu lățimea până la de două ori grosimea), poligonală, rotundă, ovală sau profilată corespunzător profilului care va fi laminat, iar lingourile pentru produse plate au secțiunea dreptunghiulară cu lățimea de minimum două ori mai mare decât grosimea.

Lingourile pentru produse lungi din oțeluri necalmate utilizate în țara noastră au masa cuprinsă între 0,8 și 9,2 t și secțiunea pătrată (lingouri direct conice) cu dimensiunile de 284/328 x 1 300...760/870 x 2 150 mm, iar lingourile din oțeluri calmate au masa cuprinsă între 2 și 7,4 t și secțiunea pătrată (lingouri invers conice), cu dimensiunile de 180/134 x 860...720/630 x 2 310 mm. Lingourile pentru produse plate, în general din oțeluri necalmate, au masa cuprinsă între 2,5 și 28 t și secțiunea dreptunghiulară (lingouri direct conice) cu dimensiunile 670/720 x 320/360 x 1 700...1 720/1 780 x 1 070/1 100 x 2 500 mm.

Semifabricatele din oțeluri aliate destinate laminării sunt obținute prin laminarea lingourilor turnate sau prin turnare continuă. Secțiunile transversale pot avea forme diferite: pătrată cu latura secțiunii de minimum 50 mm, dreptunghiulară cu aria secțiunii transversale de minimum 2 500 mm² și cu raportul lățime/grosime de minimum 2, plată cu grosimea de peste 50 mm și cu raportul lățime/grosime de minimum 2 sau rotundă cu aria secțiunii transversale de peste 2 500 mm². Secțiunile transversale au dimensiuni constante în lungul semifabricatului, toleranțe și dimensiuni mai mari, comparativ cu produsele finite plate sau lungi corespondente și muchiile rotunjite. Fețele laterale sunt ușor convexe sau concave, pot prezenta amprente de laminare sau de turnare continuă și pot fi parțial sau total prelucrate pentru eliminarea defectelor de suprafață, de exemplu, prin flamare, dăltuire sau polizare.

Definirea și clasificarea semifabricatelor și produselor de oțel este reglementată prin standardul SR EN 10 079: 1996 european adoptat ca standard românesc. Semifabricatele obținute prin laminarea lingourilor, conform STAS 436-90, sunt prezentate în continuare.

Blumurile au secțiunea pătrată sau dreptunghiulară (cu raportul laturilor mai mic de 2), cu latura cuprinsă între 150 ± 5 mm și 400 ± 10 mm, cu muchiile

rotunjite și lungimi de 2...6 m și sunt destinate relaminării în țagle, platine sau profile grele și mijlocii.

Sleburile (bramele) au secțiunea dreptunghiulară, cu grosimi cuprinse între de 80 și 300 mm și lățimi de maximum 1 800 mm, astfel încât secțiunea transversală să fie cuprinsă între 196 și 5 400 cm² și lungimi de fabricație de 1,5...7 m; sunt destinate relaminării în table groase și benzi la cald.

Țagălele pătrate au latura cuprinsă între $40 \pm 1,5$ mm și 140 ± 4 mm și muchiile rotunjite cu raza $r \leq 0,2 a$ (în care a este latura țaglei).

Țagălele plate au secțiunea dreptunghiulată și dimensiunile (140...280) x (35...80) mm.

Țagălele rotunde pentru țevi (STAS 2 881-87) au diametrul de 90 ± 1 ... 350 ± 6 mm. Lungimile de fabricație ale țagălelor variază între 2 și 15 m, iar destinația lor este relaminarea în produse tubulare, profiluri mijlocii și ușoare, sârmă sau benzi înguste.

Platinele au secțiunea dreptunghiulară (STAS 6 791-71), cu grosimea mică în raport cu lățimea (grosimea este de 6...30 mm, iar lățimea este de 200...280 mm) și sunt utilizate pentru laminarea tablelor subțiri în pachete.

Benzile laminate la cald (STAS 9 236-80) au dimensiunile de (3...12) x (100...1 500 mm), se prezintă sub formă de rulouri cu masa de până la 20...30 t și sunt destinate relaminării la rece în benzi subțiri, cât și pentru fabricarea țevilor sudate și a profilurilor îndoite.

2.2. PRODUSE LAMINATE PLATE

Produsele laminate plate au secțiunea transversală dreptunghiulară și lățimea mult mai mare decât grosimea. În general suprafața acestor produse este netedă, dar în anumite cazuri (de exemplu table striate) poate prezenta amprente sau denivelări răspândite uniform. Se obțin prin laminarea la cald a semifabricatelor (brame sau platine) și uneori a lingourilor.

În categoria produselor plate intră tablele și benzile laminate la cald și la rece. *Tablele laminate la cald* (SR EN 10 029: 1994) se livrează sub formă de foi, în stare brută de laminare sau decapată, de formă pătrată sau dreptunghiulară cu lățimea de minimum 600 mm; tablele se pot livra și sub alte forme, de exemplu circulară sau corespunzătoare unui anumit șablon. Marginile sunt brute de laminare sau tăiate la foarfecă, cu flacăra sau teșite.

În funcție de grosime, tablele laminate la cald se definesc ca table subțiri (cu grosimi de până la 3 mm inclusiv), table mijlocii (cu grosimi de 3...4 mm) și table groase (cu grosimi de peste 4 mm).

Prin laminare la rece se obțin de obicei numai table și benzi subțiri (STAS 9 724-90) cu grosimi între 0,1 și 3,5 mm. În funcție de necesități se pot lamina la rece și table cu grosimi mai mari (de până la 5 mm).

Lățimea tablelor variază între 1 000 și 4 000 mm, în cazul tablelor groase destinate construcțiilor de mașini, recipientilor sub presiune și construcțiilor navale (grosimi de 4...100 mm) și între 800 și 1 500 mm în cazul benzilor

lamine la cald cu grosimi de 3...12 mm (STAS 9 236-80) și a benzilor laminate la rece cu grosimi cuprinse între 0,1 și 3,5 mm (STAS 9 150-80) obținute prin laminare continuă. Benzile înguste, cu lățimi sub 100 mm, se pot obține prin fâșiere din benzi late sau se pot lamina pe caje singulare.

Gruparea principalelor produse laminate plate, în funcție de caracteristicile dimensionale, este prezentată în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1

Principalele produse laminate plate

Denumire produs		Caracteristici dimensionale	Limita de dimensiuni, mm	Simbol	Standarde de produs
Bandă laminată la cald BLC	îngustă	lățimea	10...99	BLC	STAS 908-90 STAS 9 236-80 SR EN 10 051: 1995
	mijlocie		100...370		
	lată		peste 370		
Bandă laminată la rece BLR	îngustă	lățimea	10...99	BLR	SR EN 10 139: 1999 STAS 9 150-80 STAS 9 724-90
	mijlocie		100...370		
	lată		peste 370		
Tablă subțire TS	neagră	grosimea	până la 3,0 exclusiv	TN	STAS 1 946-80
	construcții mecanice			TCM	SR EN 10 051: 1995 STAS 901-90 STAS 9 624-89
	ambutisare			TA	STAS 10 318-80 SR EN 10 130: 1995
	zincată			TZ	STAS 2 028-80 SR EN 10 147: 1993
	ondulată			TO	STAS 2 029-80
	electrotehnică			TE	STAS E 11 508-89
Tablă mijlocie TM	construcții mecanice	grosimea	3,0...4,0	TMCM	SR EN 10 029: 1994 SR EN 10 051: 1995 STAS 901-90
	decapată			TMD	STAS 11 509-80
	lonjeroane			TML	STAS 11 505-89
Tablă groasă TG	uz general	grosimea	peste 4,0	TG	STAS 505-86 SR EN 10 029: 1994
	navale			TGN	STAS 8 324-87 SR EN 10 029: 1994
	cazane și recipiente			TGCR	STAS 11 502-89 SR EN 10 028: 1996
	striată			TGS	STAS 3 480-80
	decapată			TGD	STAS 11 509-80
	ambutisată			TGA	STAS 11 501-80
	construcții sudate			TGGF	SR EN 10 113: 1995 SR EN 10 028-3:1996
	poduri, viaducte			TGPV	STAS 12 187-88
Platbandă, PLB		latura	160...600	PLB	SR EN 10 163: 1994

Platbenzile au lățimi de 160...600 mm, grosimi mai mari de 4 mm și se livrează întotdeauna nerulate. Platbanda se laminează la cald pe cele patru fețe (sau în calibre închise), astfel încât muchiile rămân drepte, nerotunjite.

Tablele și benzile *electrotehnice* au grosimi, în general, mai mici de 2 mm și lățimi de maximum 1 500 mm. Oțelurile electrotehnice pot fi cu grăunți neorientați (nealiat sau aliat cu siliciu sau cu siliciu și aluminiu) acestea având proprietăți magnetice izotrope (similare pe direcția de laminare și pe direcția transversală) sau pot fi cu grăunți orientați, cu proprietăți magnetice anizotrope (oțeluri aliate cu siliciu). Aceste oțeluri se livrează cu acoperire izolatoare pe una sau pe ambele fețe.

Produsele plate laminate la cald sau la rece pot fi protejate prin acoperire pe o față sau pe ambele fețe. Acoperirea de protecție se poate face *termic* cu zinc, cu aluminiu sau cu aliaje aluminiu-zinc, aluminiu-siliciu sau plumb-staniu prin imersie într-o baie metalică sau *electrochimic* cu zinc sau cu aliaj zinc-nichel sau plumb-staniu. Tablele și benzile neacoperite sau cu acoperiri metalice (de exemplu zincate) pot fi acoperite cu materiale organice (vopsite) sau cu materiale anorganice (emailate).

2.3. PRODUSE LAMINATE LUNGI

Produsele lungi (profilurile) prezintă secțiune transversală constantă pe lungime care este, în mod uzual, definită de un standard care precizează gamele de dimensiuni curente precum și toleranțele la dimensiuni și toleranțe de formă. În general, suprafața acestor produse este netedă dar, în anumite condiții (de exemplu bare de oțel beton), aceasta poate prezenta denivelări răspândite uniform. Indicarea toleranțelor dimensionale este necesară deoarece dimensiunile profilurilor pot varia în măsură suficient de mare ca urmare a modificării forței de laminare, a temperaturii laminatului și, nu în ultimul rând, a uzurii calibrelor și jocurilor din cajele de laminare pe parcursul procesului de deformare. Ca urmare a acțiunii factorilor menționați se constată variații ale dimensiunilor chiar pe lungimea fiecărui laminat. Deci, prin existența toleranțelor se pot obține profiluri corespunzătoare, cu toate modificările continue ale condițiilor de laminare.

Tendința generală este de a se lucra cu *toleranțe negative* pentru realizarea de economie de metal, dar punerea în aplicare a acestei idei necesită pregătiri foarte atente ale laminoarelor și respectarea riguroasă a tehnologiilor de laminare.

Tipurile de profiluri care se pot obține prin laminare se grupează după următoarele criterii (fig. 2.1):

- după destinația profilului, în profiluri *de uz general* (pătrat, rotund, lat, cornier, profile U, I, T, Z etc.) și profiluri *cu utilizări speciale* (șină de cale ferată, șenilă de tractor, armătură de mină, etc.);
- după forma profilului, în profiluri *simple* (pătrat, rotund, lat, hexagonal etc.) și profiluri *fasonate* sau cu aripi (profil U, I, T, șină de cale ferată,

palplanșe, piloți de sprijin etc.);

- după masa unitară a profilului, respectiv după dimensiunile caracteristice ale acestuia (tabelul 2.2), în profiluri *grele*, profiluri *mijlocii* și profiluri *ușoare*.

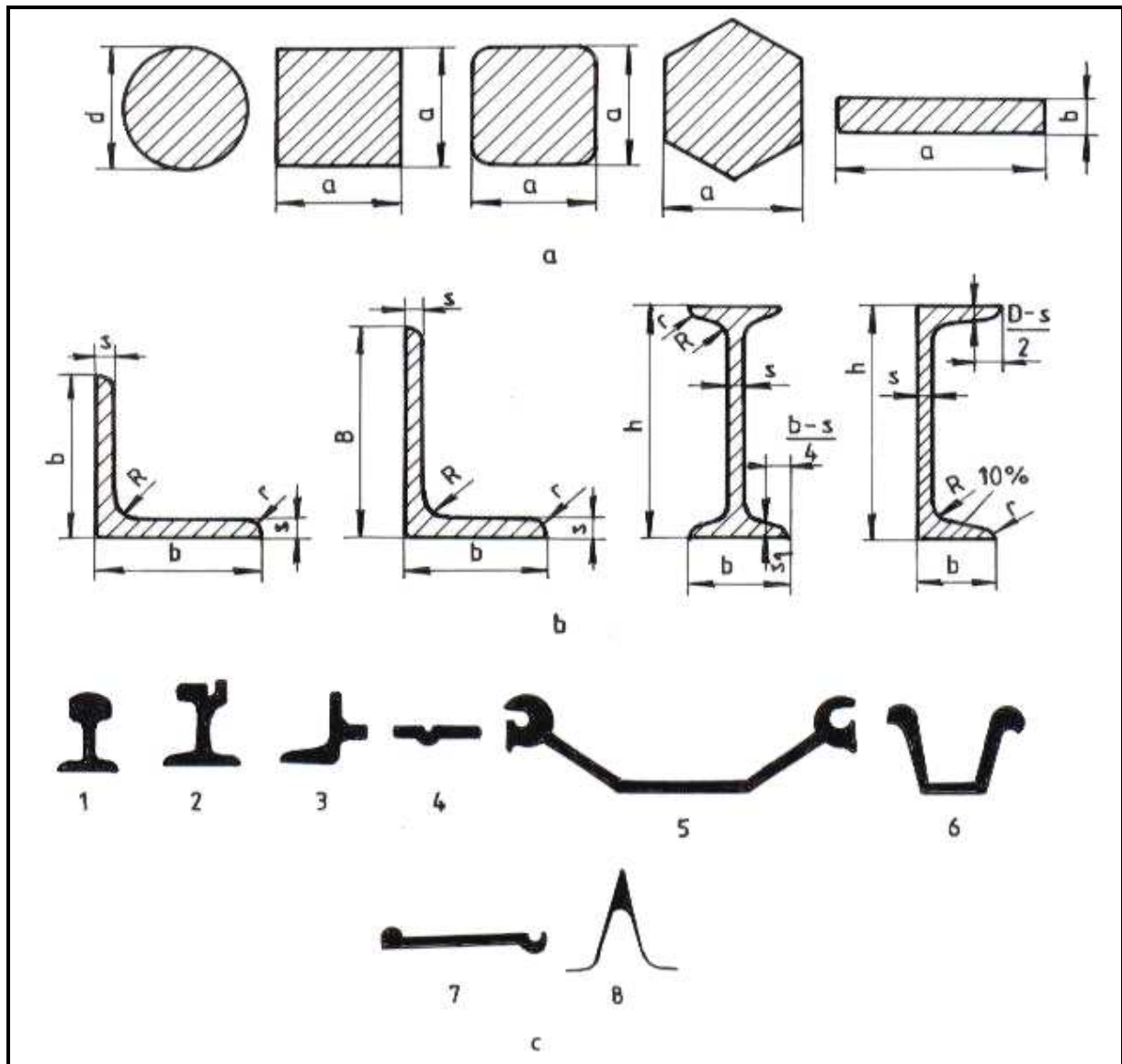


Fig. 2.1. Principalele tipuri de profiluri simple (a), fasonate (b) și speciale (c):

- 1 – șină de cale ferată; 2 – șină de tramvai; 3 – profil Z pentru vagoane;
- 4 – profil lat pentru tâmplărie metalică; 5 – profil palplanșă;
- 6 – profil omega pentru armături de mină; 7 – profil jantă de autocamion;
- 8 – profil pinten pentru șenilă de tractor.

Palplanșele sunt profiluri fasonate obținute prin laminare la cald care au o asemenea formă încât prin îmbinarea capetelor sau a ghidajelor longitudinale sau prin prindere cu ajutorul unor agrafe speciale formează pereți despărțitori sau perdele continue. După forma secțiunii transversale (fig. 2.2) sau după utilizare palplanșele pot fi: palplanșe în formă de S, U, Z și Ω ; palplanșe plate; palplanșe asamblate; palplanșe H de îmbinare; palplanșe ușoare de armătură (blindaje).

Principalele produse laminate lungi

Denumire produs	Dimensiuni standard [mm]	Limite de dimensiuni pe grupe, [mm]			Sim-bol	Standarde de produs
		Profiluri ușoare	Profiluri mijlocii	Profiluri grele		
Profil rotund	d = 5...250	12...30 sârma 5...15	30...80	peste 80	φ	STAS 333-87 STAS 794-90
Profil pătrat	a = 8...140	12...25	25...70	peste 70	4L	STAS 334-88
Profil lat	a = 5...50 b = 10...150	b = 12...50	50...100	b > 100	LT	STAS 395-88
Profil hexagonal	a = 8...72	12...30	30...70	peste 70	6L	STAS 7828-78
Cornier cu aripi egale	a = 20...160 d = 3...18	a = 15...50	50...120	a > 120	L	STAS 424-91 SR EN 10 056-2: 1996
Cornier cu aripi neegale	B = 30...150 b = 20...100 g = 3...14	sub 60 x 40	60x40... ...120x80	peste 120 x 80	LL	STAS 425-80
Profil I	h = 80...400 b = 42...155 d = 3,9...14,4 t = 5,7...21,1	-	80...120	peste 120	I	SR EN 10 024: 1998 SR EN 10 034: 1996
Profil U	h = 30...300 b = 28...100 d = 5...10 t = 7...15,6	30...80	80...120	peste 120	U	STAS 564-86 SR EN 10 056: 1996
Profil Z	h = 40...200 b = 40...87 d = 4,5...7,0 t = 6,5...7,0	40...60	60...120	peste 120	Z	-
Profil T	h = b = 20...50 d = t = 3...6	20...50	-	-	T	STAS 566-86
Oțel beton neted/periodic	d = 6...40	6...28	peste 28	-	OB PC	STAS 438/1-89 STAS 438/2-91
Profil semirotund	d = 5...38	5...25	25...38	-	φ/2	STAS 1 722-80
Profil trapezoidal	a = max. 6,5 b = max. 12 c = max. 52	a, max. 6,5 b, max. 12 c, max. 52	-	-	TR	STAS 8 673-80 STAS 1 771-80
Profil H	a = max. 23 h = max. 32	a, max. 23 h, max. 32	-	-	H	STAS 1 772-80 SR EN 10 034: 1996
Șină de cale ferată	9,3...54 kg/m	9,3...18 kg/m	18...30 kg/m	peste 30 kg/m	-	STAS 1 954-80 STAS 1 900-89 STAS 11 201-79

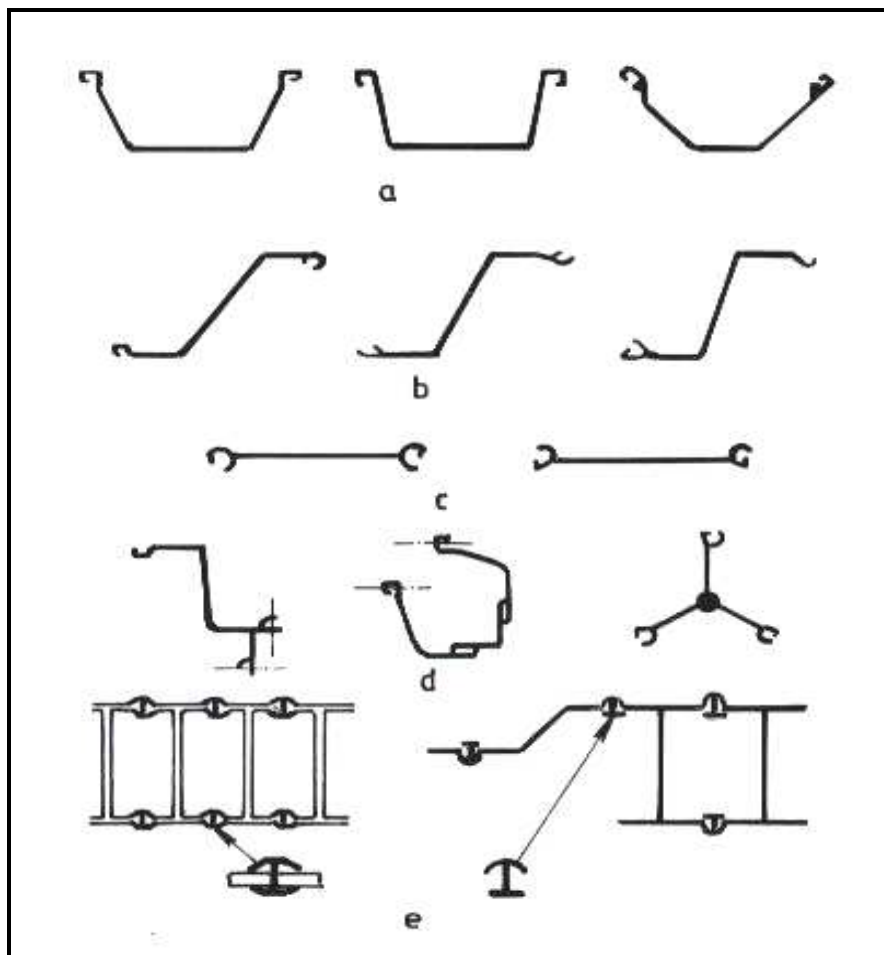


Fig. 2.2. Tipuri reprezentative de palplanșe:
a – palplanșe U; b – palplanșe Z;
c – palplanșe plate; d – palplanșe asamblate;
e – palplanșe combinate pe bază de palplanșe H și Z.

Tot din categoria produselor lungi laminate la cald fac parte și profilurile I și Ω pentru *galerii de mină* și *piloții de sprijin* sau de susținere (fig. 2.3).

Piloții de sprijin pot fi realizați prin asamblare din profile U sau similari utilizați ca bază de sprijin sau legând între ele țevi cu secțiunea pătrată sau rotundă prin elemente de prindere; piloții de sprijin se introduc în sol în scopul transmiterii solului greutatea unei construcții prin rezistența dezvoltată la baza pilotului sau prin frecare între suprafața acestuia și sol.

2.4. PRODUSE LAMINATE TUBULARE

Produsele tubulare de oțel sunt produse lungi cave (țevi), deschise la ambele capete, cu secțiune rotundă sau poligonală. Țevile se pot prelucra la capete (de exemplu prin filetare, prin evazare etc.), se pot acoperi pe suprafața interioară sau pe cea exterioară (cu acoperiri organice sau metalice) și pot prezenta nervuri continue sau discontinue.

Țevile laminate se obțin prin perforarea unui semifabricat plin, lingou, țagă sau bară, eboșele cave obținute fiind finisate prin reducerea secțiunii

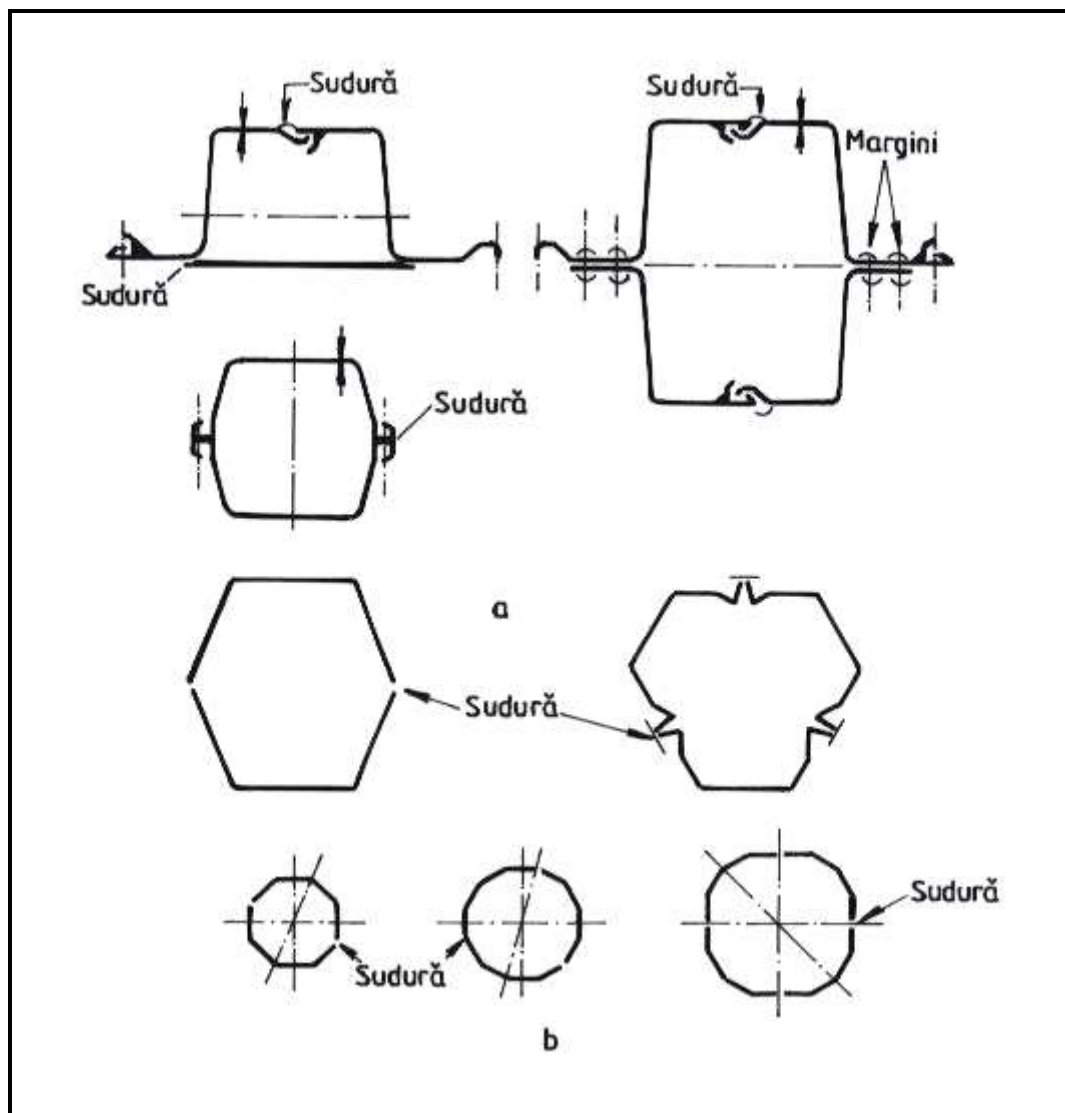


Fig. 2.3. Exemple de piloți de susținere:

a – piloți asamblați din profile U;

b – piloți metalici tubulari.

utilizându-se diferite procedee de laminare la cald sau la rece. Atât sortimentele de țevi laminate cât și procedeele de laminare s-au diversificat continuu, pe de o parte pentru acoperirea tuturor necesităților de astfel de produse, iar pe de altă parte pentru a se obține productivități cât mai ridicate și o calitate corespunzătoare a țevilor.

Produsele tubulare laminate la cald sau la rece se utilizează practic în toate ramurile economice. Pe lângă ramurile consumatoare tradiționale, așa cum sunt construcțiile de mașini, cazanele energetice și schimbătoarele de căldură, industria extractivă a petrolului și gazelor naturale, au apărut domenii de utilizare noi așa cum sunt industria nucleară, electronică, aeronautică și spațială. Condițiile tehnice impuse acestor produse sunt tot mai exigente, necesitând astfel perfecționarea continuă a tehnologiilor de laminare existente și dezvoltarea altora noi.

Fără a se lua în considerare produsele tubulare obținute prin turnare centrifugală, prin sudare, cât și cele obținute prin extrudare și tragere (acestea nefăcând obiectul lucrării de față), țevisle care se produc prin laminare *se pot*

clasifica după diferite criterii, care sunt prezentate în continuare.

a) *Clasificare după domeniul de temperaturi* în care are loc procesul de laminare. Țevile pot fi laminate *la cald*, pentru diametre cuprinse între 20...800 mm, și respectiv, laminate *la rece*, pentru diametre cuprinse între 5...400 mm.

b) *Clasificare după dimensiuni* (tabelul 2.3). Țevile se pot clasifica, pe de o parte, în țevi cu *diametre mici* având diametrul exterior $D_e = 5...59$ mm (țevile cu diametrul $D_e < 5$ mm se numesc țevi *capilare* sau țevi cu diametre foarte mici), țevi cu *diametre medii* având $D_e = 60...114$ mm, țevi cu *diametre mari* cu $D_e = 120...426$ mm și țevi cu *diametre foarte mari* având $D_e > 426$ mm, iar pe de altă parte în țevi cu pereți *foarte groși* la care raportul dintre diametrul exterior D_e și grosimea de perete g este $D_e/g < 5,5$, țevi cu *pereți groși* la care $D_e/g = 5,5...9$, țevi cu *pereți normali* care au raportul $D_e/g = 9,1...20$, țevi cu *pereți subțiri* când $D_e/g = 20,1...50$ și țevi cu *pereți foarte subțiri* la care raportul $D_e/g > 50$.

c) *Clasificare după forma secțiunii transversale*. În afară de țevile cu secțiunea transversală circulară se realizează, într-o proporție relativ redusă și țevi profilate, care au, în secțiune transversală o altă formă geometrică. Astfel se execută țevi profilate de formă pătrată, dreptunghiulară, ovală sau cu aripioare folosite în construcții de mașini și în construcția de cazane energetice.

Dimensional, perimetrul secțiunii acestor țevi este, în general, în limitele țevelor rotunde cu $D_e = 20...70$ mm, iar grosimea peretelui acestora este de 1,0...7,0 mm.

d) *Clasificare în funcție de destinație*. Principalele sortimente de țevi laminate, grupate după domeniile lor de utilizare și după dimensiuni sunt prezentate în tabelul 2.3. În funcție de destinația țevelor, acestea se pot împărți în următoarele grupe principale:

- țevi pentru *construcții*, cu dimensiuni, $D_e \times g$, cuprinse între 25 x 3 și 609 x 50 mm, *lamine la cald* (STAS 404/1-98) și cu dimensiuni cuprinse între 8 x 1 și 168 x 14 mm, *lamine la rece* (STAS 530/1-87);

- țevi pentru *temperaturi ridicate* (STAS 3 478-86);

- țevi pentru *industria petrolieră*, care la rândul lor se împart în *prăjini de foraj* (STAS 323-80 și STAS 8 037-89), țevi pentru *conducte petroliere* cu diametre cuprinse între 60,3...168,3 mm (STAS 715-80), *burlane de tubaj* cu diametre de 114...508 mm (STAS 823-86 și SR EN ISO 11 960: 1999), țevi de *extracție* a țițeiului cu diametre de 60,3...114,3 mm (STAS 824-88), *prăjini grele* (SR 1 898: 1993), *prăjini de antrenare* pentru sondeze (STAS 4 344-80) și țevi pentru *prospecțiuni și cercetări geologice* (SR ISO 3 551-1: 1995);

- țevi cu *destinații speciale*, cum sunt cele pentru utilizări la temperaturi joase sau țevi *criogenice* (STAS 9 378-87), țevi pentru *centrale nucleare-electrice*, țevi pentru *aeronautică* etc.

Principalele produse laminate tubulare

Denumire produs		Dimensiuni standardizate			Standarde de produs
		D_e , [mm]	g , [mm]	L , [m]	
Țevi de uz general și pentru construcții	Țevi rotunde laminate la cald	25...609	3,0...50	1,5...12,5	STAS 404/1-98
	Țevi rotunde laminate la rece	8...168	1...14	0,5...12	STAS 530/1-87 STAS 10 358-88
	Țevi rectangulare laminate la cald sau la rece	b = 30...100 h = 20...60	3...8	3...9	STAS 6 086-80
	Țevi pentru rulmenți	25...114	4...10,5	3,5...5	SR 12 616: 1994
Țevi pentru industria energetică	Țevi pentru temperaturi ridicate (cazane energetice)	8...609	1...50	1,5...12,5	STAS 3 478-86 STAS 404/3-87 STAS 530/3-87 SR ENV 10 200: 1997 SR ISO 9 329-2: 1999
	Țevi pentru schimbătoare de căldură	12...89	1,5...8	1,5...9	STAS 9 377-90
	Țevi pentru temperaturi scăzute	8...609	1...50	1,5...12,5	STAS 9 378-87 STAS 404/1-98 STAS 530/1-87
Țevi pentru industria petrolieră și a gazelor naturale	Prăjini pentru forarea sondelor	60...114	7,1...10,9	5,5...13,7	STAS 323-80
		60,3...139,7	7,1...10,5	6,01...14,4	STAS 8 037/1-89
		60,33...168,28	6,45...12,7	5,49...13,72	SR ISO 11961:1998
		104,8	$D_i=27...63,5$	9,144	SR 1 898: 1994
	Prăjini de antrenare (cu secțiune pătrată)	a = 64...152	$D_i=31,7...88,9$	11,6...12,3	STAS 4 344-80
	Conducte de petrol și gaze	60,3...164,5	3,75...7,50	6...12,5	STAS 715/1-80
		33,7...162,6	2,3...40	6...18	SR EN 10208-1:1999
	Burlane pentru tubarea sondelor	114...339	5,21...15,86	4,8...10,36	STAS 823-86 STAS 875-86
		114...508	5,21...22,23	4,8...14,63	SR EN ISO 11 960: 1999
	Țevi pentru extragerea țițeiului	60,3...114,3	4,83...9,52	6,10...9,75	STAS 824-88
		26,7...177,8	2,87...16,0	6,1...14,63	SR EN ISO 11 960: 1999
	Țevi pentru pompe extracție	43...102	3,7...16,0	2,5...7,5	STAS 2 895-80
Țevi pentru prospecțiuni și cercetări geologice	Burlane pentru forajul cu sondeze	44...147,6	3,2...6,3	3,0...6,0	STAS 1 967/1-88 STAS 1 967/3-88
		36,6...217,4	$D_i=30,48...203$	3,0...3,10	SR ISO 3 551-1: 1995
	Prăjini de foraj	27,8...89,1	$D_i=10,4...60,5$	0,75...3,0	
	Țevi de extracție pentru carotiere	95,6...192,2	$D_i=85,85...180,57$	3,14...3,17	
	Prăjini de antrenare pt. sondeze	hexagonale, l = 47,0		5,2	STAS 2 606-80

2.5. OȚELURI ALIATE FOLOSITE PENTRU LAMINARE

2.5.1. Criterii de clasificare a oțelurilor aliate

Având în vedere marea diversitate de compoziții chimice, structuri și domenii de utilizare ale oțelurilor aliate care se laminează, acestea nu se pot grupa în baza unui criteriu unic, global. Pentru aceasta, se folosesc clasificări parțiale, după diferite criterii: a – după compoziția chimică; b – după modul de obținere a semifabricatelor sau produselor finite; c – după clase principale de calitate; d – după destinație; e – după structură.

În funcție de *compoziția chimică* oțelurile se clasifică în *oțeluri aliate* și *oțeluri nealiat*e. Delimitarea între aceste două categorii de oțeluri, conform SR EN 10 020: 1993, este prezentată în tabelul 2.4. La oțelurile nealiat

Tabelul 2.4

Limitele de compoziție între oțelurile nealiat

Element prescris	Valoare limită (% gr.)	Element prescris	Valoare limită (% gr.)
Al Aluminiu	0,10	Pb Plumb	0,40
B Bor	0,0008	Se Seleniu	0,10
Bi Bismut	0,10	Si Siliciu	0,50
Co Cobalt	0,10	Te Telur	0,10
Cr Crom ⁽¹⁾	0,30	Ti Titan ⁽²⁾	0,05
Cu Cupru ⁽¹⁾	0,40	V Vanadiu ⁽²⁾	0,10
La Lantanide (fiecare)	0,05	W Wolfram	0,10
Mn Mangan	1,65 ⁽³⁾	Zr Zirconiu ⁽²⁾	0,05
Mo Molibden ⁽¹⁾	0,08	Alte elemente cu excepția carbonului, fosforului, sulfurii și azotului (fiecare)	0,05
Nb Niobiu ⁽²⁾	0,06		
Ni Nichel ⁽¹⁾	0,30		

⁽¹⁾ Pentru combinații de câte două, trei sau patru elemente prescrise, care au conținuturi mai mici decât cele din tabel, valoarea limită este de 70% din suma valorilor limită individuale.

⁽²⁾ Si la acest grup de elemente se aplică regula (1).

⁽³⁾ În cazul în care manganul este precizat numai ca maximum, valoarea limită este 1,80%, iar regula de 70% nu se mai aplică.

Această clasificare are la bază analiza chimică pe oțel lichid prescrisă în standardul de produs și este determinată de valoarea minimă prescrisă pentru fiecare element. În cazul elementelor, cu excepția manganului, la care pentru analiza pe oțel lichid este precizată numai o valoare maximă, clasificarea se face în funcție de valoarea de 70% din valoarea maximă precizată; pentru mangan se ia în considerare nota (3) din tabelul 2.4.

După elementele de aliere conținute, oțelurile aliate se împart în oțeluri nichel, oțeluri crom, oțeluri mangan, oțeluri crom-nichel, oțeluri crom-nichel-molibden etc. În funcție de conținutul total al elementelor de aliere și al elementului principal de aliere, oțelurile aliate se clasifică în oțeluri slab, mediu și înalt aliate (tabelul 2.5).

Tabelul 2.5

Clasificarea oțelurilor aliate după gradul de aliere

Elementul de aliere	După conținutul în elementul principal, [%]			După suma totală a elementelor	
	Slab aliat	Mediu aliat	Înalt aliat	Sumă elemente [%]	Clasa oțelului
Mangan	0,8...1,8	1,8...6,0	Peste 6	Sub 2,5	Slab aliat
Siliciu	0,5...1,1	1,1...6,0			
Crom	0,3...0,5	0,5...6,0			
Nichel		0,5...4,5	Peste 4,5	2,5...10	Mediu aliat
Wolfram	0,2...0,3	0,3...4,0	Peste 4,0		
Cobalt		0,3...1,0	Peste 1,0		
Molibden	0,05...0,1	0,1...1,0	-	Peste 10	Înalt aliat
Vanadiu		-			
Aluminiu	0,1...0,5	0,5...1,5	Peste 1,5		

În funcție de modul de obținere a semifabricatelor sau produselor finite, oțelurile aliate se clasifică în oțeluri *pentru turnare* (care nu fac obiectul lucrării de față) și oțeluri *pentru deformare*.

Oțelurile aliate deformabile se împart, *după destinație*, în oțeluri deformabile *cu destinații generale* și oțeluri deformabile *cu destinații speciale*. Din categoria oțelurilor aliate cu destinații generale fac parte oțelurile aliate pentru construcții și oțelurile aliate speciale pentru construcții de mașini.

Din categoria oțelurilor deformabile *cu destinații speciale* se menționează oțelurile aliate pentru scule, oțelurile rapide pentru scule, oțelurile pentru rulmenți, oțelurile pentru arcuri, oțelurile pentru automate, oțelurile cu proprietăți fizico-chimice și mecanice speciale (oțeluri cu proprietăți termice, electrice și magnetice deosebite, oțeluri rezistente la coroziune, oțeluri refractare etc.) și altele.

Oțelurile aliate *pentru construcții de mașini* se împart, după conținutul în carbon, în oțeluri pentru *cementare*, cu 0,06...0,25% C și oțeluri pentru *îmbunătățire*, cu un conținut de 0,25...0,6% C. Sunt aliate fie cu un singur element de aliere (oțeluri crom, oțeluri nichel, oțeluri mangan etc.), fie cu două sau mai multe elemente de aliere (oțeluri crom-mangan, oțeluri crom-nichel, oțeluri crom-vanadiu, oțeluri crom-nichel-molibden, oțeluri crom-nichel-wolfram etc.).

Oțelurile aliate *pentru scule* se împart în oțeluri pentru scule de așchiere, oțeluri pentru scule de lovire-matrițare și oțeluri pentru instrumente de măsură. Oțelurile pentru *scule așchietoare* pot fi slab aliate, cu circa 1..2% elemente de

aliere și oțeluri înalt aliate, numite și oțeluri *rapide*, având în compoziția chimică 0,8...1% C, 3,8...4,4% Cr, 5...18% W, 1...4% V, 3...5% Mo și, uneori, până la 5% Co. Oțelurile pentru scule de *lovire-matrițare* se împart în oțeluri pentru deformarea la rece, cu conținuturi de 0,8...1,2% C, 1...7% Cr conținând și molibden, vanadiu și wolfram și oțeluri pentru deformarea la cald, cu conținuturi de 0,3...0,7% C, 1...9% Cr, până la 4,5% Ni și 0,15...0,60% Mo, uneori având și conținutul de vanadiu, siliciu sau wolfram. Pentru confecționarea instrumentelor de măsură se utilizează în mod curent oțeluri din categoria celor pentru scule de așchiere.

Oțelurile *pentru rulmenți* sunt hipereutectoide, conținând 0,95...1,05% C; în afară de carbon aceste oțeluri conțin crom în limitele 1,3...1,65%, conținuturile de sulf și fosfor sunt foarte mici, iar nichelul nu este admis deoarece favorizează formarea austenitei reziduale. Pentru a se mări călibilitatea, oțelurile conțin mangan și siliciu în limitele obișnuite pentru oțelurile de construcții.

Din categoria oțelurilor și aliajelor pe bază de fier cu proprietăți speciale fac parte aliajele *cu proprietăți termice speciale* (de exemplu aliajul invar cu 0,3% C, 37% Ni, rest Fe), aliajele *cu rezistivitate ridicată* (de exemplu fecralul, cu până la 0,12% C, circa 17% Cr, 5% Al, rest Fe sau cromalul, cu până la 0,12% C, circa 26% Cr, 5% Al, rest Fe), oțelurile și aliajele pe bază de fier *cu proprietăți magnetice speciale* (de exemplu aliajele fier-siliciu pentru table de transformatoare, care conțin 3,5...4,5% Si, aliajele fier-nichel care conțin 65...80% Ni cunoscute sub numele de permalloy utilizate în automatizări sau oțelurile pentru megneți permanenți cu conținuturi de 0,9...1% C, aliate cu 4,5% Cr, 6% W sau aliate cu 4% Cr, 3% Co și 0,4% Mo) și oțelurile *cu rezistență foarte mare la uzură* cunoscute sub denumirea de oțeluri austenitice manganoase sau oțeluri Hadfield, care conțin 0,9...1,3% C și 11,5...14,5% Mn. Oțelurile manganoase se folosesc numai rareori sub formă de produse deformate la cald, în mod obișnuit se folosesc sub formă de produse turnate.

Oțelurile *inoxidabile* sunt oțeluri crom sau oțeluri crom-nichel, iar pentru medii acide foarte agresive se utilizează oțeluri inoxidabile austenitice crom-nichel-molibden, crom-nichel-molibden-cupru sau crom-nichel-molibden-cupru-titan-aluminiu.

Oțelurile inoxidabile cu crom conțin 0,08...0,45% C, 13...27% Cr precum și titan și nichel în procente scăzute. După structura obținută la răcirea în aer, oțelurile inoxidabile cu crom se clasifică în feritice, ferito-martensitice și martensitice. Oțelurile inoxidabile crom-nichel sunt de regulă austenitice și conțin 17...25% Cr și 8...30% Ni.

Oțelurile *refractare* sunt oțeluri aliate complex cu crom, molibden, wolfram, vanadiu, niobiu, tantal, siliciu, aluminiu ș.a. În funcție de structură oțelurile refractare pot fi feritice sau austenitice, iar după structura obținută la răcirea în aer oțelurile refractare se împart în oțeluri perlitice, formate din ferită și perlită, oțeluri martensitice, martensito-feritice și austenitice.

Clasificarea oțelurilor în *clase de calitate principale* cuprinde următoarele grupe: oțeluri *de uz general* numite și oțeluri de bază, oțeluri *de calitate*

și oțeluri *speciale*.

Oțelurile de uz general sunt oțeluri *nealiat*e, elaborate prin procedee obișnuite și se utilizează în construcții metalice. Oțelurile de calitate sunt oțeluri *aliat*e sau *nealiat*e la care se garantează atât compoziția chimică, cât și caracteristicile mecanice, având conținuturi de sulf și fosfor limitate. Oțelurile speciale sunt, de asemenea, oțeluri *aliat*e sau *nealiat*e dar, în acest caz, se garantează și conținutul maxim de impurități (incluziuni nemetalice), conținuturile de sulf și fosfor sub limitele admise pentru oțelurile de calitate precum și condiții referitoare la structură (mărimea grăuntelui austenitic, adâncimea de călire).

În cazul oțelurilor *aliat*e de calitate, obținerea caracteristicilor prescrise necesită adaosuri de elemente de aliere peste valorile limită din tabelul 2.4. În general, oțelurile din această clasă nu sunt destinate tratamentului termic de călire-revenire sau de călire superficială și pot fi împărțite în următoarele categorii de oțeluri aliate:

- oțeluri *de construcții cu granulație fină sudabile*, incluzând oțelurile pentru recipiente sub presiune și țevi;
- oțeluri *pentru electrotehnică*, aliate cu siliciu sau cu siliciu și aluminiu;
- oțeluri aliate *pentru șine*, pentru *palplanșe* și pentru *armături* de mină;
- oțeluri aliate *pentru produse plate* laminate la rece sau la cald, pentru utilizări la care intervin deformări la rece severe, care conțin elemente chimice de finisare a granulației, cum sunt borul, niobiul, titanul, vanadiul și zirconiu;
- oțeluri aliate la care singurul element de aliere prescris este cuprul.

Oțelurile *aliat*e speciale se caracterizează prin controlul riguros al compoziției chimice, prin condiții speciale de fabricație care să asigure caracteristici superioare produselor laminate, de regulă în interdependență și în limite înguste de control. Această clasă include următoarele categorii de oțeluri aliate:

- oțeluri *inoxidabile* care conțin maximum 1,20% carbon și minimum 10,5% crom; în funcție de conținutul de nichel, această grupă conține oțeluri ferito-martensitice (cu $Ni < 2,5\%$) și oțeluri austenitice (cu $Ni \geq 2,5\%$);
- oțeluri *rapide* care conțin 0,6% carbon, 3...6% crom și, pe lângă alte eventuale elementele de aliere, cel puțin două dintre elementele molibden, wolfram și vanadiu, în conținut însumat de minimum 7%;
- oțeluri pentru *scule*, oțeluri *refractare*, oțeluri pentru *rulmenți*, oțeluri speciale *de construcții* și oțeluri *cu proprietăți fizice speciale*.

Clasificarea oțelurilor aliate *după structura de recoacere* se bazează pe influența pe care o manifestă elementele de aliere asupra poziției punctelor S , E , A_3 și A_4 ale diagramei fier-carbon (v. fig. 1.2). La creșterea conținutului în element de aliere, indiferent de natura acestuia, punctele S și E se deplasează spre conținuturi mai mici în carbon, punctele A_3 și A_4 deplasându-se, pentru elementele din grupa cromului, astfel încât îngustează domeniul γ , iar pentru elementele din grupa nichelului, astfel încât măresc domeniul γ . Considerând aceste influențe se pot trasa *diagrame structurale* (fig. 2.4) potrivit cărora oțelurile aliate cu elemente din grupa cromului se împart în oțeluri

hipoeutectoide, hipereutectoide, ledeburitice, feritice și semiferitice, iar oțelurile aliate cu elemente din grupa nichelului în oțeluri hipoeutectoide, hipereutectoide, ledeburitice, austenitice și semiaustenitice.

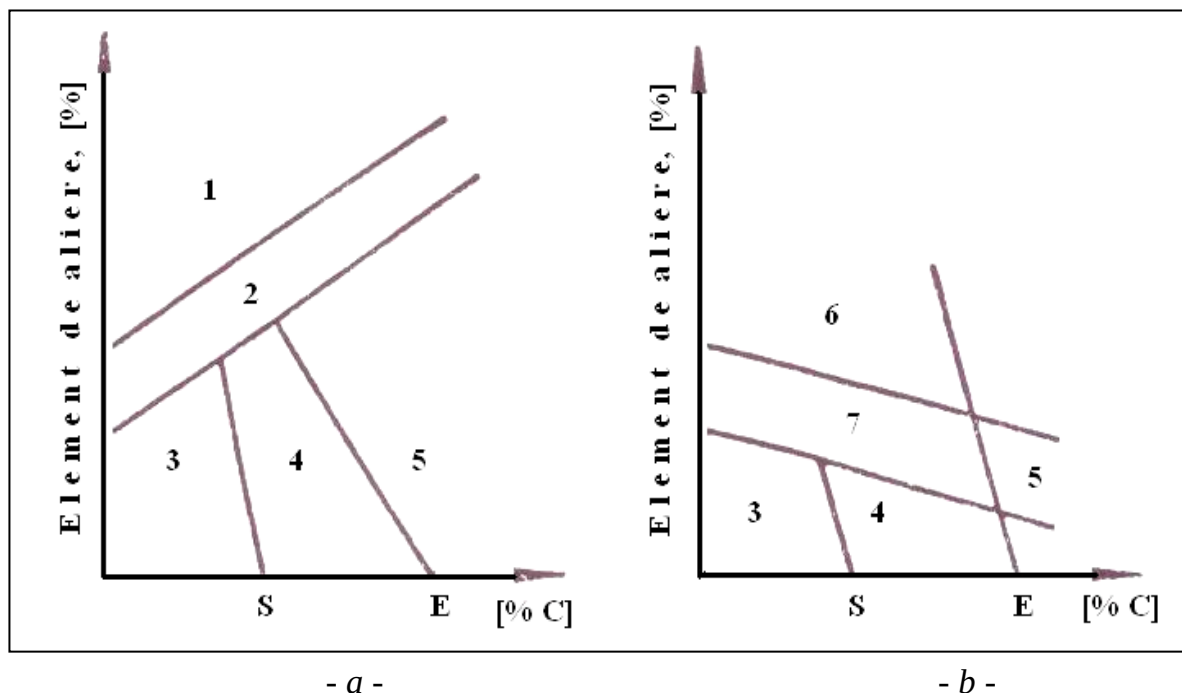


Fig. 2.4. Schema clasificării oțelurilor aliate după structura obținută la recoacere:
 a – oțeluri aliate cu elemente alfa-gene; b – oțeluri aliate cu elemente gama-gene;
 1 – oțeluri feritice; 2 – oțeluri semiferitice; 3 – oțeluri hipoeutectoide;
 4 – oțeluri hipereutectoide; 5 – oțeluri ledeburitice; 6 – oțeluri austenitice;
 7 – oțeluri semiaustenitice.

Clasificarea oțelurilor aliate după structura în stare normalizată se bazează pe diagrama descompunerii izoterme a austenitei. Deoarece la creșterea conținutului în element de aliere curbele în C se deplasează la dreapta și în jos, iar M_s în jos, viteza de răcire în aer va intersecta curbele în C ale oțelurilor aliate la temperaturi diferite. Astfel, după structura obținută la normalizare, oțelurile aliate pot fi oțeluri cu structură normală sau oțeluri perlitice, oțeluri cu structură martensitică, oțeluri cu structură austenitică, oțeluri feritice sau oțeluri cu carburi.

2.5.2. Mărci de oțel utilizate pentru produsele laminate

La laminarea oțelurilor aliate se impun condiții severe de calitate a suprafețelor laminatelor și de precizie a dimensiunilor. De asemenea, laminatele din oțeluri aliate trebuie să posede proprietăți determinate, specifice pentru fiecare marcă de oțel. În mod teoretic toate tipurile de oțeluri aliate sau nealiate pot fi laminate în diferite sortimente. Standardele de produse laminate (table, benzi, profiluri sau țevi) conțin și indicații privind materialele recomandate pentru a fi utilizate, în concordanță cu destinația și proprietățile impuse produselor respective. Ținând seama de aceste indicații, în tabelul 2.6 sunt prezentate mărcile de oțel recomandate a fi utilizate pentru produsele laminate

lungi, în tabelul 2.7 cele pentru produsele laminate plate, iar în tabelul 2.8, cele pentru produsele laminate tubulare.

Tabelul 2.6

Mărci de oțel utilizate pentru produsele laminate lungi

Destinația	Categorii și mărci de oțel utilizate		Standarde de material
Profiluri de uz general și profiluri fasonate	Oțeluri nealiat de uz general pentru construcții	OL 32; OL 37; OL 42; OL 44; OL 52; OL 60; OL 70.	STAS 500/2-80
		RCA 37.1; RCA 37.2; RCB 52.	STAS 500/3-80
Profiluri cu destinații speciale	Oțeluri nealiat de calitate pentru tratamente termice	OLC 45; OLC 50; OLC 55; OLC 60	STAS 880-88
	Oțeluri aliate de calitate pentru tratamente termice destinate construcțiilor de mașini.	Toate mărcile tipizate (excepție: 65Mn10; 35MnSi13; 18CrNi20; 40CrNi12).	STAS 791-88
	Oțeluri pentru rulmenți	RUL 1; RUL 2.	STAS 1 456/1-89
		RUL 1 V; RUL 2 V.	STAS 11 250-89
	Oțeluri pentru scule	OSC 8; OSC 10; OSC 13.	STAS 1 700-90
		VM8; VSCW20; CW20; MCW14; MoVC30; MoVC50.10; MoVC50.13.	STAS 3 611-88
		Rp 5	STAS 7 382-88
	Oțeluri pentru automate	AUT12; AUT20; AUT30; AUT40M.	STAS 1 350-89
	Oțeluri pentru arcuri	OLC 55A; OLC 75A; OLC 85A; 60 Si 15A.	STAS 795-92
	Oțeluri pentru organe de asamblare	OLC 25; OLC 35; OLC 45; 33MoCr11; 10Ni35.	STAS 9 382-89
	Oțeluri rezistente la uzură	20 Mn 10; 40 Mn 10.	STAS 11 513-88
	Oțeluri pentru țevi	OLT 35; OLT 45; OLT 65	STAS 8 183-80
		OLT 35K; OLT 45K; OLT 65 K	STAS 8 184-87
	Oțeluri inoxidabile și refractare	12Cr130; 20Cr130; 30Cr130; 40Cr130; Cr25Ni20	STAS 3 583-87 STAS 11 523-87

Mărci de oțel utilizate pentru produsele laminate plate

Categorii și mărci de oțel utilizate		Standarde de material
Oțeluri nealiat de uz general pentru construcții	OL 32; OL 37; OL 42; OL 44; OL 52; OL 60	STAS 500/2-80
Oțeluri nealiat de uz general rezistente la coroziune atmosferică	RCA 37; RCB 52	STAS 500/3-80
Oțeluri nealiat de calitate pentru construcții de mașini	OLC 10; OLC 15; OLC 25; OLC 35; OLC 45; OLC 55; OLC 60	STAS 880-88
Oțeluri cu granulație fină pentru țevi și construcții sudate	OCS 44; OCS 52	SR EN 10 113-1: 1995
	X 42; X 46; X 56; X 60	SR 11 082: 1994
Oțeluri pentru cazane și recipiente sub presiune	R 37; R 44; R 52	STAS 2 883/2-91
	K 41; K 47; K 52	STAS 2 883/3-88
Oțeluri pentru construcții navale	A ; E	STAS 8 324-86
Oțeluri pentru ambutisare	A 1; A 2; A 3	SR EN 10 130: 1995
Oțeluri aliate de calitate pentru tratamente termice destinate construcțiilor de mașini	15Cr9; 21MoMnCr12; 17MoCrNi14; 20TiMnCr12; 28TiMnCr12; 18MnCr11; 51VMnCr11	STAS 791-88
Oțeluri pentru scule	OSC 8; OSC 10	STAS 1 700-90
	105CrW20	STAS 3 611-88
Oțeluri pentru rulmenți	RUL 1; RUL 2	STAS 1 456/1-89
Oțeluri pentru arcuri	OLC55A; OLC65A; OLC75A; OLC85A	STAS 795-92
Oțeluri inoxidabile și refractare	10Cr130; 30Cr130; 10TiNiCr180; 10TiMoNiCr175	STAS 3 583-87
	12NiCr250; 40SiCrNi380; 10TiAlCrNi320	STAS 11 523-87

Astfel, în cazul profilurilor simple de uz general și în cazul profilurilor fasonate se utilizează oțeluri nealiat pentru construcții, conform STAS 500/2-80 și STAS 500/3-80, iar pentru profilurile cu destinații speciale se utilizează oțelurile corespunzătoare destinațiilor, cum sunt oțelurile nealiat de

calitate (STAS 880-88) și oțelurile aliate de calitate pentru tratamente termice destinate construcțiilor de mașini (STAS 791-88), oțelurile de rulmenți (STAS 1 456/1-89 și STAS 11 250-89), oțelurile nealiat, aliate și rapide pentru scule (STAS 1 700-90), STAS 3 611-88 și STAS 7 382-88), oțelurile pentru prelucrarea prin așchiere pe mașini automate (STAS 1 350-89), oțelurile pentru arcuri (STAS 795-92), oțelurile pentru organe de asamblare (STAS 9 382-89), oțelurile rezistente la uzură (STAS 11 513-88), oțelurile rezistente la coroziune și refractare (STAS 3 583-87 și STAS 11 523-87) etc.

Tabelul 2.8

Mărci de oțel utilizate pentru produsele laminate tubulare

Destinația	Categorii și mărci de oțel utilizate		Standarde de material
Țevi de uz general și pentru construcții	Oțeluri nealiat de calitate	OLT 35; OLT 45; OLT 65.	STAS 8 183-80
		OLC 8; OLC 10.	STAS 880-88
	Oțeluri aliate destinate construcțiilor de mașini	40Cr10; 40BCr10; 34MoCr11; 42MoCr11; 34MoCrNi15.	STAS 791-88
	Oțeluri inoxidabile	10Cr130; 10TiNiCr180; 10TiMoNiCr175.	STAS 3 583-87
	Oțeluri refractare	2NiCr185; 5NiCr180; 2MoNiCr175.	STAS 11 523-87
	Oțeluri de rulmenți	RUL 1; RUL 2.	STAS 1 456/1-89
		RUL 1 V; RUL 2 V.	STAS 11 250-89
Țevi pentru industria energetică	Oțeluri nealiat de calitate	OLT 35K; OLT 45K.	STAS 8 184-87
		OLT 35R; OLT 45R.	STAS 10 382-88
	Oțeluri aliate pentru temperaturi ridicate	16Mo3; 14MoCr10; 10MoCr22; 10MoCr50; 12VMoCr10; 20VMoCr120.	STAS 8 184-87
	Oțeluri aliate pentru temperaturi scăzute	10Ni35.	STAS 10 382-88
Țevi petroliere și pentru prospecțiuni geologice	Oțeluri nealiat de calitate	OLT 35; OLT 45; OLT 65.	STAS 8 185-88
	Oțeluri aliate pentru țevi petroliere	43MoMn16; 33MoCr11; 44Mn11; 33MoCr11; 35VMoMn14; 20VMn 12.	
	Oțeluri aliate pentru tratament termic	40Cr10; 41CrNi12 și alte mărci de oțel tipizate din grupele Cr-Ni; Cr-Mo și Cr-Ni-Mo.	STAS 791-88

Pentru profilurile simple (pătrat, rotund, lat, hexagonal) se utilizează atât oțeluri aliate cât și nealiat, iar pentru profilurile fasonate (corniere, profiluri U, I, T, șine de cale ferată, șenile etc.) se utilizează oțeluri nealiat de calitate.

Pentru laminarea tablelor și benzilor în rulouri se utilizează oțeluri nealiat de uz general pentru construcții (STAS 500/2-80 și STAS 500/3-80), oțeluri nealiat de calitate pentru construcții de mașini (STAS 880-88), oțeluri cu granulație fină pentru țevi sudate și pentru construcții sudate (SR EN 10 113: 1995), oțeluri pentru cazane și pentru recipiente sub presiune (STAS 2 883/2-91 și STAS 2 883/3-88), oțeluri pentru construcții navale (STAS 8 324-86), oțeluri pentru ambutisare destinate caroseriilor auto (SR EN 10 130: 1995), oțeluri aliate pentru tratamente termice destinate construcțiilor de mașini (STAS 791-88), oțeluri pentru scule (STAS 1 700-90 și STAS 3 611-88), oțeluri rezistente la coroziune (STAS 3 583-87) și oțeluri refractare (STAS 11 523-87).

În plus, pentru laminarea la cald și la rece a benzilor în rulouri se mai folosesc și oțeluri electrotehnice cu grăunți neorientați (STAS E 11 508-89) sau cu grăunți orientați (STAS 11 526-80).

În cazul laminării produselor tubulare se utilizează oțeluri nealiat de calitate de tip OLT 35...OLT 65, care se întâlnesc la fabricarea tuturor tipurilor de țevi (pentru construcții, industria energetică, industria petrolieră).

De asemenea, se utilizează și o gamă diversă de oțeluri aliate cum sunt oțelurile inoxidabile și refractare pentru construcții (STAS 3 583-87 și STAS 11 523-87), oțelurile aliate pentru tratamente termice destinate construcțiilor de mașini (STAS 791-88), oțelurile de rulmenți (STAS 1 456/1-89 și STAS 11 250-89) pentru țevi din care se debitează inelele pentru rulmenți, oțelurile aliate cu molibden și crom-molibden (STAS 8 184-87) pentru țevi de cazane energetice și oțelurile mangan, molibden-mangan, molibden-crom, molibden-crom-nichel, molibden-mangan-crom și crom-nichel (STAS 8 185-88 și STAS 791-88) pentru țevi necesare industriei petroliere și prospecțiunilor geologice.

Capitolul 3

PARTICULARITĂȚILE PROCESULUI TEHNOLOGIC DE LAMINARE A OȚELURILOR ALIATE

Laminarea, reprezentând procedeul de deformare plastică a unor semifabricate, antrenate prin frecare, între cilindrii de lucru ai cajei laminorului, asigură atât modificarea dimensiunilor și, în unele cazuri, a formei secțiunilor transversale ale laminatelor, cât și formarea unei structuri omogene, în special la produsele finite, cu compactitate ridicată, fără tensiuni interne și cu constituenții necesari realizării proprietăților mecanice impuse acestor produse. Procedeul oferă avantajul unei prelucrări eficiente a materialului metalic în întregul volum al acestuia, în condițiile asigurării unei bune precizii dimensionale și a unei suprafețe calitative.

În cazul produselor laminate din oțeluri aliate se impun condiții severe de calitate a suprafețelor și de precizie a dimensiunilor. De asemenea, laminatele din oțeluri aliate trebuie să prezinte proprietăți determinate, specifice diferitelor mărci de oțeluri. Îmbinând laminarea cu tratamentul termic, avantajele enumerate se corelează și cu proprietăți mecanice și fizice corespunzătoare destinației produselor finite laminate din oțeluri aliate.

În ceea ce privește procesul tehnologic de laminare, oțelurile aliate prezintă o serie de *particularități față de oțelurile nealiat*e, unele dintre acestea complicând substanțial fabricația de produse laminate. Astfel, o mare parte dintre oțelurile aliate au rezistența mare la deformare, necesită temperaturi de început de laminare mai joase decât oțelurile nealiate, au intervalul îngust de temperaturi la care are loc deformarea plastică, prezintă plasticitate mică și susceptibilitate mare pentru tensiuni, în special termice. În structura anumitor oțeluri aliate se remarcă tendința de formare a fulgilor, de apariție a crăpăturilor în timpul răcirii și de precipitare a fazelor în exces (cementita și altele) care înrăutățesc calitatea produselor laminate finite. De asemenea, unele oțeluri aliate au tendința să formeze grăunți mari care nu pot fi finisați prin aplicarea tratamentului termic ulterior, precum și tendința de decarburare a straturilor superficiale. Pentru alte mărci de oțeluri aliate sunt caracteristice temperatura înaltă de început de recristalizare și viteza mică a acestui proces, dar există și oțeluri aliate care prezintă valori mari ale lățirii la laminare și valori mici ale coeficientului de frecare.

Particularitățile producției de oțeluri aliate se completează cu programul sortimental al laminoarelor, care se caracterizează printr-o diversitate mare de tipodimensiuni și calități de oțeluri în cantități relativ mici. De aici rezultă

particularitățile constructive ale laminoarelor destinate oțelurilor aliate de a fi elastice în ceea ce privește trecerea de la un sortiment la altul și de a fi prevăzute cu motoare de acționare mai puternice decât în cazul laminării oțelurilor nealiate, pentru a se ține seama de rezistența la deformare mai mare a oțelurilor aliate.

În continuare se prezintă particularitățile cele mai importante ale laminării oțelurilor aliate atât în ceea ce privește tehnologiile, cât și în ceea ce privește utilajele de laminare.

3.1. CONSIDERAȚII PRIVIND COMPORTAREA LA DEFORMARE A OȚELURILOR ALIATE

Particularitățile oțelurilor aliate privind comportarea la deformarea plastică și legătura dintre plasticitatea și rezistența la deformare a acestor oțeluri, pe de o parte și condițiile de deformare plastică și de tratament termic, pe de altă parte, se prezintă în cele ce urmează comparativ cu oțelurile nealiate.

Rezistența la deformare a oțelurilor aliate este, în general, mai mare decât cea a oțelurilor nealiate datorită influenței mai multor factori, dintre care cei mai importanți sunt *compoziția chimică* și *structura*. Prezintă rezistență mare la deformare în special oțelurile care au structuri polifazice, cum sunt acele oțeluri care la temperatura de deformare au în structura lor componenți în exces sub formă de carburi, siliciuri, compuși intermetalici și alte faze. Dintre elementele de aliere care formează carburi, wolframul și molibdenul, la anumite conținuturi, măresc rezistența la deformare a oțelurilor aliate.

Rezistența la deformare a oțelurilor aliate crește odată cu mărirea gradului de aliere a austenitei, însă este condiționată și de *temperatura de laminare*, fiind cu atât mai mare cu cât temperatura de laminare este mai scăzută. Limita superioară a temperaturii de laminare este determinată de temperatura de ardere a oțelului respectiv și are valori mai mici cu 100...200 °C decât temperatura de topire a oțelului. La rândul ei, temperatura de topire a oțelului este cu atât mai joasă cu cât este mai mare gradul de aliere a oțelului. Micșorarea limitei superioare a temperaturii de laminare mărește inevitabil rezistența la deformare a oțelului.

În afară de limita superioară a temperaturii de laminare, de cele mai multe ori se stabilește și limita inferioară. În toate cazurile în care oțelurile aliate prezintă temperaturi mari de început de recrystalizare, temperatura de sfârșit de laminare se stabilește puțin mai mare decât această temperatură, deoarece laminarea la temperaturi mai mici decât temperatura de început de recrystalizare se desfășoară în condițiile unei rezistențe mari la deformare.

Pentru anumite calități de oțeluri aliate, frecvent monofazice, limita inferioară a temperaturilor de laminare se stabilește, pe cât posibil, cât mai scăzută, asigurându-se astfel o structură fină și omogenă a oțelului laminat. În cazul oțelurilor monofazice, de exemplu feritice, nu are loc recrystalizarea în cursul tratamentului termic, astfel că structura acestor oțeluri depinde direct de

temperatura și de gradul de deformare, fiind determinată de procesul de recristalizare prin care grăunții cristalini devin cu atât mai mari cu cât temperatura de laminare este mai mare și invers. Necesitatea de a realiza laminarea la temperaturi relativ mai mici implică și în acest caz creșterea rezistenței la deformare a oțelului. De asemenea, creșterea rezistenței la deformare a oțelurilor aliate se manifestă și în toate cazurile în care se micșorează temperatura de sfârșit de laminare, care se realizează pentru a se preîntâmpina precipitarea în structură a fazelor în exces.

Trebuie remarcat însă că există și unele oțeluri aliate care au rezistența la deformare apropiată de cea a oțelurilor nealiate cum sunt, de exemplu, oțelurile inoxidabile feritice.

Plasticitatea oțelurilor aliate este mai mică decât a oțelurilor nealiate, adică au capacitatea de a se deforma, fără a se distruge, mai mică. Plasticitatea oțelurilor aliate depinde de compoziția chimică și de structura oțelului, de caracterul stării de tensiune și al stării de deformare, precum și de condițiile de temperatură, de gradul și de viteza de deformație.

În ceea ce privește influența compoziției chimice asupra plasticității oțelurilor aliate se cunoaște că asupra proprietăților plastice au o mare influență acele elemente chimice care la temperatura de laminare formează faze în exces, de diferite compoziții. Aceste faze se află în oțel sub formă de incluziuni nemetalice sau de gaze și pelicule, îngreunând considerabil desfășurarea procesului de deformare plastică.

O influență mare asupra plasticității oțelurilor aliate o are caracterul stării de tensiune. Deși starea de tensiune la laminare se consideră ca fiind corespunzătoare compresiunii neuniforme triaxiale, în realitate aceasta este mai complexă. Ca rezultat al neuniformității deformației, starea de tensiune în diferite zone ale materialului metalic laminat poate fi diferită, cuprinzând scheme cu tensiuni de întindere care micșorează plasticitatea și îngreunează laminarea oțelurilor aliate care, oricum, au plasticitatea scăzută.

Condițiile de temperatură și de viteză în care se realizează laminarea au influență mare asupra plasticității oțelurilor aliate. În majoritatea cazurilor, odată cu creșterea temperaturii oțelului crește și plasticitatea acestuia și scade rezistența la deformare. De aceea se tinde, de obicei, să se execute laminarea la temperaturi pe cât posibil mai ridicate, însă apare pericolul arderii oțelului. Astfel, determinarea temperaturilor optime de laminare constituie o problemă importantă a deformării plastice a oțelurilor aliate.

Trebuie precizat că majoritatea oțelurilor aliate au caracteristici de plasticitate normale, fiind posibilă obținerea de laminate calitative din aceste oțeluri, dacă procesul tehnologic este respectat. În cazul laminării oțelurilor aliate cu proprietăți de plasticitate scăzute, pe suprafața laminatelor se formează defecte de diferite mărimi, sub formă de fisuri sau crăpături. Dacă este posibil aceste defecte se înlătură prin diferite procedee de curățire, iar în caz contrar laminatul se rebutează.

La laminarea oțelurilor aliate este necesar să se creeze astfel de condiții,

încât chiar și oțelurile mai puțin plastice să poată fi laminate fără apariția fisurilor sau a crăpăturilor. Laminarea oțelurilor aliate este deosebit de complicată din cauza intervalului mic al temperaturilor de deformare. În cazul oțelurilor cu limite superioare ale temperaturilor de deformare relativ scăzute și cu limite inferioare ridicate, intervalul temperaturilor de deformare se îngustează astfel că, în unele cazuri, ajunge la valori de 80...100 °C. În afară de asigurarea preciziei mari de încălzire a oțelurilor aliate, procesul de deformare trebuie să se realizeze cu viteză suficientă, astfel încât temperatura să nu scadă sub valoarea admisibilă.

Decarburarea superficială reduce substanțial calitatea produselor laminate din oțeluri aliate, de aceea încălzirea acestor oțeluri în vederea laminării trebuie să se efectueze în condițiile în care decarburarea se reduce la minimum. Important este ca, în același timp, să se asigure și o oxidare minimă, deci formarea unei cantități minime de oxizi, lucru care se condiționează prin regimul de temperatură și, în special, prin compoziția gazelor în cuptoare la încălzirea oțelurilor aliate.

Susceptibilitatea la tensiuni termice a oțelurilor aliate este mare și, pentru a preveni aceste tensiuni, încălzirea oțelurilor aliate trebuie să se facă respectând anumite regimuri prescrise de viteze de încălzire. Oțelurile aliate necesită încălziri deosebit de atente deoarece, în cazul încălzirilor rapide, pe suprafața lingourilor și a blumurilor se formează fisuri, cel mai frecvent transversale, care conduc la formarea spărturilor în laminat. Acest fenomen se remarcă în cazul introducerii semifabricatelor reci în cuptoarele adânci sau în cuptoarele obișnuite de încălzire; în acest caz au influență mare tensiunile din lingouri, care depind de condițiile de turnare și de răcire, precum și faptul că numeroase oțeluri aliate au conductibilitatea termică mică. Aceasta este cu atât mai mică cu cât conținutul de elemente de aliere în oțeluri este mai mare.

Susceptibilitatea de a forma crăpături și fulgi este caracteristică oțelurilor aliate și, din această cauză, este necesar ca, după laminare, produsele din oțeluri aliate să fie supuse unor regimuri speciale de răcire. Pentru obținerea unor laminate de calitate se aplică răciri lente și controlate sau tratamente termice izotermice. Varietatea mare de oțeluri prelucrate simultan complică procesul tehnologic din secțiile de laminare, perspective destul de mari având realizarea procesului de răcire conform unui regim prescris într-un flux tehnologic continuu.

Unele oțeluri aliate au *valori mici ale coeficientului de frecare* externă, datorită unor particularități ale stratului lor superficial, ceea ce conduce la înrăutățirea prinderii metalului de către cilindrii. Din această cauză, laminarea acestor oțeluri trebuie efectuată cu reduceri mici, care să asigure unghiuri de prindere reduse, ceea ce va complica de asemenea, procesul tehnologic.

În afară de înrăutățirea condițiilor de prindere, scăderea coeficientului de frecare externă duce la nestabilitatea barei în cazul laminării în calibre. Astfel, la laminarea în calibre cutie, adesea bara se curbează și se răsucesce, ceea ce duce la rebut. Un asemenea fenomen se constată, în special, la laminarea la bluming a oțelurilor inoxidabile cu crom.

O importanță deosebită asupra procesului tehnologic de laminare a profilurilor o are *tendința accentuată de lățire* a unor oțeluri aliate. Astfel, lățirea oțelurilor inoxidabile austenitice și feritice este aproape de 1,5 ori mai mare decât lățirea oțelurilor nealiat obișnuite, în condiții comparabile. De aceea, la calibrarea cilindrilor trebuie luate în considerare aceste valori mari ale lățirii unor oțeluri aliate, fără de care nu se poate obține un profil corespunzător din punct de vedere calitativ.

Diferența de lățire existentă la diferite mărci de oțeluri aliate duce la necesitatea de a avea diferite calibrări ale cilindrilor, pentru obținerea de profiluri identice. Aceasta conduce, natural, la schimbări suplimentare ale cilindrilor și în general, îngreunează condițiile de laminare a oțelurilor aliate.

3.2. CARACTERISTICI ALE LAMINOARELOR PENTRU LAMINAREA OȚELURILOR ALIATE

Oțelurile aliate se toarnă de obicei în lingouri cu masa mică și medie, de la câteva sute de kilograme până la 7000...8000 kg.

Blumurile se obțin din lingouri, prin laminare la *bluminguri specializate* cu diametrul cilindrilor de 825 ... 900 mm, cuplate în tandem cu laminoare de semifabricate, cu posibilități de reîncălzire a laminatului.

Unele oțeluri bogat aliate nu pot fi laminate la bluminguri sau laminoare degrositoare datorită deformabilității foarte scăzute a oțelului în stare turnată. Aceste oțeluri, cum este de exemplu oțelul rapid, se toarnă în lingouri de masă mică și se supun în prealabil forjării pentru distrugerea structurii de turnare caracterizată de plasticitate redusă (structura ledeburitică în cazul oțelurilor rapide) prin aplicarea unor reduceri relativ mici și cu reîncălziri repetate, ceea ce nu se poate efectua prin laminare. După această operație de forjare, în continuare semifabricatele pot fi laminate.

Bramele pentru relaminarea în table se laminează în general pe *slebinguri* moderne, respectându-se însă particularitățile tehnologice cerute de oțelurile aliate. Tablele din oțeluri aliate se laminează după cum urmează: tablele groase se laminează pe laminoare cu două caje reversibile în tandem, tablele subțiri se laminează din benzi în rulouri pe laminoare continue cu un număr mare de caje, până la 10, sau chiar pe laminoare clasice pentru benzi, cu aplicarea unor reduceri mici pe treceri, deci folosind brame cu grosime mai mică, iar tablele subțiri în foi din oțeluri bogat aliate se laminează pe laminoare liniare duo ireversibile.

Profilurile mijlocii și ușoare se obțin la *laminoare liniare* pregătite special pentru laminarea oțelurilor aliate în cantități nu prea mari. Pentru producții mari s-au construit *laminoare continue* caracterizate de un număr mai mare de caje decât în cazul laminării oțelurilor nealiat.

Sârmele din oțeluri aliate se laminează pe laminoare *discontinue* dispuse pe mai multe linii, iar pentru producții ridicate se folosesc laminoare *continue*.

Folosirea laminoarelor liniare pentru profiluri mijlocii, ușoare și sârmă

este rațională în special datorită posibilității obținerii laminatelor din semifabricate cu masă, lungime și secțiune reduse.

În general laminoarele specializate pentru laminarea oțelurilor aliate trebuie să fie dotate cu:

- eventuale cuptoare de reîncălzire a laminatelor, în special în cazul laminoarelor degrositoare, la care viteza de laminare este redusă și temperatura scade repede.

- posibilități de măsurare a temperaturii oțelului pe tot fluxul de laminare;
- posibilități de răcire rapidă sau încetă (controlată) a laminatelor finite;
- puterea motoarelor de acționare să fie în concordanță cu rezistența la deformare mai mare a oțelurilor aliate;
- vitezele de laminare să poată fi modificate în limite cât mai largi.

3.3. PARAMETRII TERMICI ȘI TEMPORALI AI PROCESULUI DE ÎNCĂLZIRE LA LAMINAREA OȚELURILOR ALIATE

În cazul încălzirii semifabricatelor din oțeluri aliate în vederea laminării, prezența a două perioade de încălzire cu viteze diferite este practic obligatorie.

Prima perioadă de încălzire la temperaturi joase este hotărâtoare, având în vedere că la aceste temperaturi oțelurile aliate au conductibilitate termică redusă, plasticitate mică și tensiuni inițiale (în cazul lingourilor provenite din timpul solidificării) peste care se pot suprapune tensiunile termice care, dacă au același semn, prin însumare pot depăși limita de rupere a oțelului, generând fisuri.

Tensiunile inițiale din lingouri se datorează gradientului mare de temperatură care apare în timpul solidificării și răcirii acestora, ca urmare a conductibilității termice reduse. Aceste tensiuni sunt la unele oțeluri foarte mari și se cunosc cazuri când lingouri nedetensionate prin tratament termic să crape în timpul depozitării. Această tendință se constată de exemplu la oțelurile Cr - Mn cu procent de carbon ridicat (11,5...13%Cr și 2...2,2 %C), la oțelurile rapide sau la oțelurile Cr - Si . Pentru evitarea acestor fenomene nedorite se recomandă răcirea dirijată sau recoacerea de detensionare.

Tensiunile termice apar ca urmare a dilatărilor termice zonale diferite, iar mărirea tensiunilor depinde de gradientul de temperatură în secțiune. La rândul său gradientul de temperatură depinde de viteza de încălzire, de diametrul semifabricatului și de conductibilitatea termică a oțelului. În același timp conductibilitatea termică depinde de compoziția chimică a oțelului, de starea materialului - turnată sau deformată - și de temperatură. La oțeluri, conductibilitatea termică scade de la valoarea maximă corespunzătoare fierului pur pe măsură ce crește concentrația în elemente de aliere (Ni, Mn, Cr și Si). Manganul, de exemplu, micșorează în măsura cea mai mare conductibilitatea oțelului: creșterea de la 0 la 12% a concentrației de mangan în oțel micșorează conductibilitatea termică a acestuia de peste 3,7 ori în timp ce nichelul realizează aceeași scădere pentru o concentrație de peste 28% (fig.3.1).

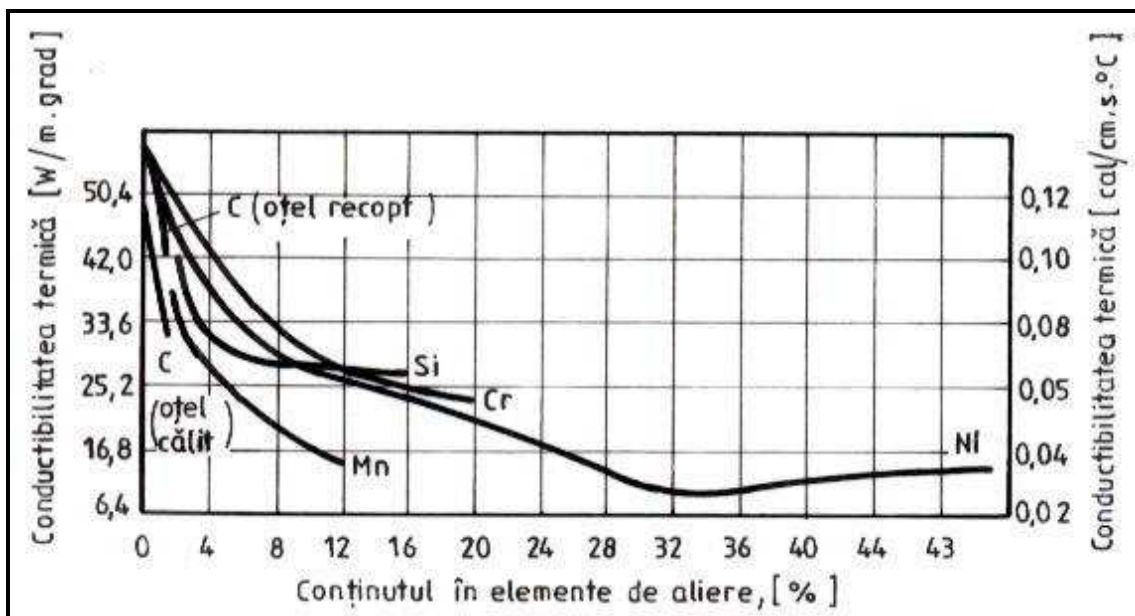


Fig.3.1. Influența elementelor de aliere asupra conductibilității termice a oțelurilor aliate.

De asemenea, conductibilitatea termică a oțelurilor aliate în stare turnată este mult mai mică decât în cazul stării deformate la cald; de exemplu la oțelurile rapide micșorarea este de aproape două ori.

Temperatura modifică și ea conductibilitatea termică în funcție de compoziția oțelului. Astfel la oțelurile nealiate și la unele oțeluri slab și mediu aliate creșterea temperaturii produce micșorarea conductibilității termice, în timp ce la oțelurile înalt aliate creșterea temperaturii mărește conductibilitatea termică (fig.3.2).

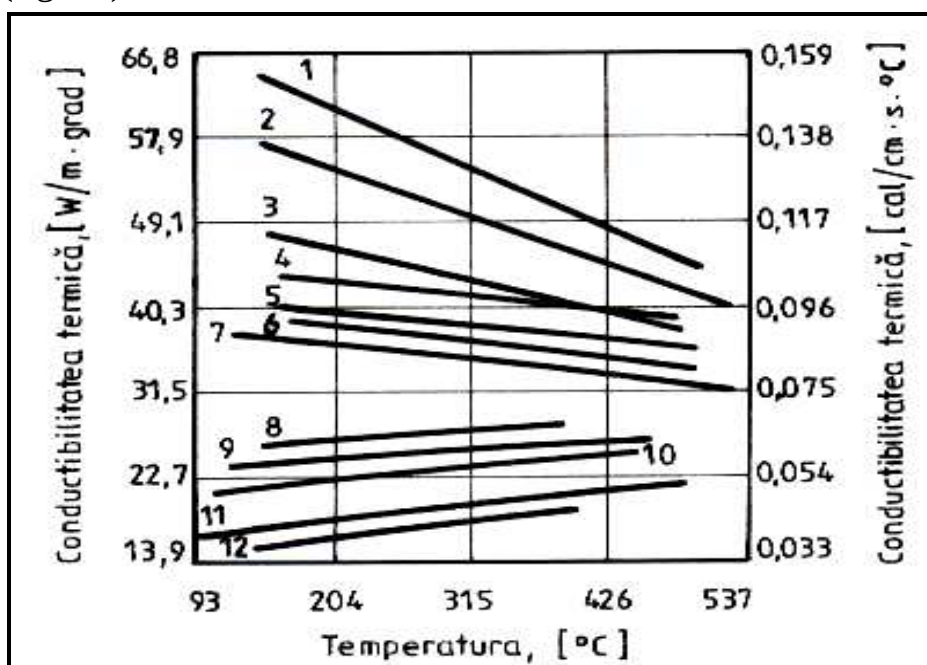


Fig. 3.2. Conductibilitatea termică a diferitelor oțeluri aliate în funcție de temperatură:

- 1 – 0,02 %C, 0,03 % Mn; 2 – 0,04 %C, 0,04 % Mn; 3 – 0,23 %C, 0,72 % Mn;
- 4 – 0,35 %C, 0,55 % Mn, 0,046 % Cr, 1,37 % Ni; 5 – 0,51 %C, 1,65 % Mn;
- 6 – 0,35 %C, 0,75 % Mn, 0,31 % Cr; 7 – 0,10 %C, 0,45 % Mn, 5,15 % Cr;
- 8 – 0,7 %C, 0,9 % Mn, 12 % Cr; 9 – 0,14 %C, 0,18 % Mn, 14,6 % Cr; 10 – 0,10 %C, 0,40 % Mn, 20 % Cr;
- 11 – 0,07 %C, 0,27 % Mn, 18,6 % Cr; 12 – 0,15 %C, 12,5 % Mn, 3 % Ni.

În afara tensiunilor inițiale și termice, în oțelurile aliate pot apărea și *tensiuni structurale* cu aceleași efecte. Aceste tensiuni apar în intervalul temperaturilor de transformare (A_{C1}) care în general sunt între 700 ... 800°C. Sunt însă unele oțeluri aliate la care punctul A_{C1} scade până la 670°C, sau crește până la 900°C.

Prin transformări structurale apar modificări de volum a materialului metalic, generatoare de astfel de tensiuni numite structurale. Cum oțelurile aliate au plasticitatea relativ redusă până la temperaturile de transformare, iar rezistența lor scade cu creșterea temperaturii, tensiunile structurale însumate eventual și cu celelalte tipuri de tensiuni interne pot genera fisuri. Pentru evitarea acestora se va adopta o viteză de încălzire corespunzătoare fiecărui tip de oțel aliat cu sensibilitate ridicată la tensiuni termice.

Temperatura de introducere în cuptor. Deoarece majoritatea oțelurilor aliate sunt mai puțin sensibile la tensiuni, se tinde a se reduce durata de încălzire a lingourilor prin creșterea vitezei de încălzire în prima perioadă, viteză care depinde de rândul ei de temperatura cuptorului, de temperatura semifabricatului și de puterea termică a cuptorului.

În general temperatura în zona de încărcare a cuptoarelor continue variază între 400...900 °C, în funcție de construcția și puterea lor calorică, cât și de calitatea oțelului care urmează a fi încălzit.

De exemplu pentru principalele tipuri de oțeluri aliate aceste temperaturi variază astfel:

- pentru oțeluri rapide, oțeluri de scule cu wolfram și cu conținut ridicat de crom, sub formă de lingouri de 200...400 kg, temperatura din cuptor la încărcare este de 600...650 °C;
- pentru oțeluri inoxidabile cu crom, oțeluri Cr-Si, oțeluri aliate cu conținut ridicat de carbon, sub formă de lingouri de 800...1200 kg, temperatura este de 600...700 °C;
- pentru oțeluri cu conținut ridicat de mangan de tipul Hadfield, sub formă de lingouri de 600...800 kg, temperatura este de 400...500 °C;
- pentru oțeluri aliate de construcții și pentru oțeluri nealiate, în lingouri de 800...1200 kg, temperatura este de 750...800 °C.

La încărcarea lingourilor calde în cuptoarele adânci, temperatura acestora nu se reglează, dar se urmărește ca temperatura la suprafața lingoului să fie de minimum 700°C. Dacă temperatura lingourilor este sub 700°C, acestea se consideră reci și nu se admite încărcarea lor în cuptoarele adânci care au fost încălzite la temperaturi de peste 1100 °C.

A doua perioadă de încălzire se referă la încălzirea la temperaturi de peste 700°C. La temperaturi ale semifabricatelor de 650...800 °C, obținute în prima perioadă de încălzire, conductibilitatea termică a oțelurilor crește și deci scade gradientul de temperatură pe secțiunea semifabricatului, iar tensiunile termice care apar sunt corespunzător mai mici.

Aceste tensiuni termice sunt mult mai puțin periculoase deoarece prin creșterea temperaturii în perioada a doua de încălzire, crește și plasticitatea oțelului. Având în vedere aceste fenomene, pentru marea majoritate a oțelurilor

în perioada a doua de încălzire viteza de încălzire poate fi oricât de mare, fără să existe pericolul apariției defectelor cauzate de tensiunile termice (fisuri și crăpături).

Pentru asigurarea unei deformări cât mai uniforme este necesar ca și temperatura cu care semifabricatul părăsește cuptorul să fie cât mai uniformă. De exemplu, la laminarea unui semifabricat încălzit unilateral, deci neuniform, acesta se poate răsuci în calibre sau se pot produce bavuri care nu vor permite laminarea în continuare.

De asemenea, temperaturi mai joase în zona centrală a semifabricatului, pot produce crăparea acestuia, în timpul laminării, ca urmare a unei alungiri mai mici a zonei centrale decât a zonei periferice. În același timp datorită încălzirii neuniforme a semifabricatelor, apare și o uzură accentuată a calibrelor în zona de contact cu zona mai rece a semifabricatului, aceasta având duritatea mai mare.

Pentru asigurarea uniformizării temperaturii în secțiunea și în lungimea semifabricatului, trebuie să se asigure *timpul necesar de menținere* la temperatura de încălzire, pentru egalizarea temperaturii pe secțiune, sau realizarea de rostogoliri a semifabricatelor dispuse pe vatră, eventual asigurarea încălzirii bilaterale.

Menținerea semifabricatelor la temperatura de încălzire, un timp mai îndelungat, are și următoarele două scopuri prezentate în continuare.

Unul din scopuri constă în reducerea segregăției în masa lingoului, deci omogenizarea chimică.

La oțelurile aliate cu elemente care produc carburi, apariția aglomerărilor de carburi generează prin laminare șiruri de carburi alungite care înrăutățesc calitatea oțelului, apărând zone cu durități mai mari, exemplul tipic fiind cel al oțelurilor de rulmenți. Prin menținerea la temperatura de încălzire se micșorează sau chiar se elimină licuația (segregația) carburilor, obținându-se un oțel cu proprietăți omogene.

Cel de-al doilea scop constă în anihilarea, într-o oarecare măsură, a tendinței unor oțeluri de formare a fulgilor, care depinde de gradul de saturație a oțelului cu hidrogen.

Menținerea oțelului la temperatură ridicată favorizează îndepărtarea hidrogenului prin difuzie și astfel se reduce susceptibilitatea oțelului la apariția fulgilor, ca de exemplu, în cazul oțelurilor de rulmenți, oțelurilor Cr-Ni, etc.

Dacă timpul necesar de menținere în vederea reducerii segregăției carburilor și a îndepărtării hidrogenului din structură este foarte mare, ceea ce conduce la un timp de încălzire de peste 20 ore, se recomandă realizarea în prealabil a unei recoaceri de omogenizare în cuptoare speciale, deoarece menținerea îndelungată a semifabricatelor în cuptoare la temperaturi ridicate duce la intensificarea proceselor de oxidare superficială (țunder gros) la decarburări cât și la defectele specifice de încălzire cum sunt supraîncălzirea sau chiar arderea oțelului. În general timpul de menținere pentru lingourile laminate sau forjate este de aproximativ 50...60% din timpul total de încălzire.

Oxidarea la suprafața semifabricatului se produce ca urmare a difuziei

oxigenului în zona superficială a acestuia și respectiv a difuziei fierului spre straturile superficiale. Prin acest proces stratul de oxid (țunder) crește continuu în grosime cu cât timpul de menținere este mai mare și temperatura mai ridicată. De asemenea, procesul de oxidare depinde și de mediul în care are loc încălzirea și de compoziția oțelului.

În funcție de temperatura de încălzire se constată că stratul de oxid crește continuu, dar moderat până la 850 °C, după care creșterea până la 1200°C este mai intensă, iar peste această temperatură creșterea este bruscă. Astfel, de exemplu, la temperatura 1400°C cantitatea de oxid este de 5 ori mai mare decât la 1200 °C și de 28 ori mai mare decât la 900°C. Aceste cantități se reduc de 2,75 și, respectiv, de 16 ori pentru temperatura de 1350 °C comparativ cu temperaturile de 1200 °C și, respectiv, 900 °C (fig.3.3).

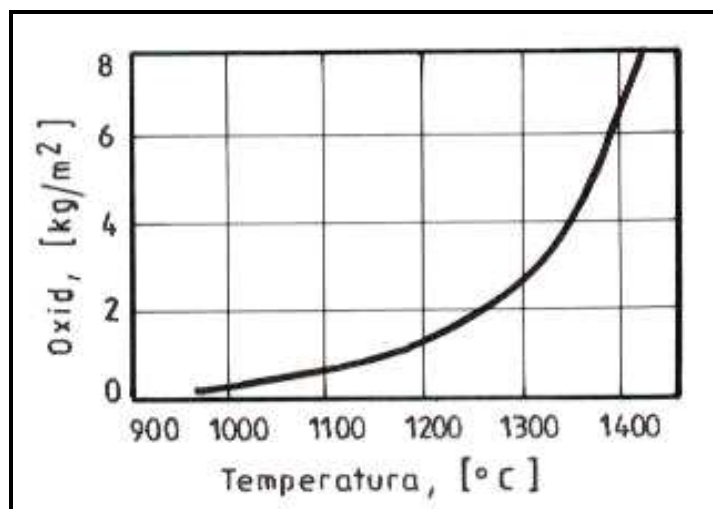


Fig. 3.3. Influența temperaturii asupra formării oxizilor.

În ceea ce privește *timpul de încălzire*, creșterea acestuia conduce la intensificarea procesului de oxidare, intensitate care însă scade odată cu creșterea timpului (fig.3.4).

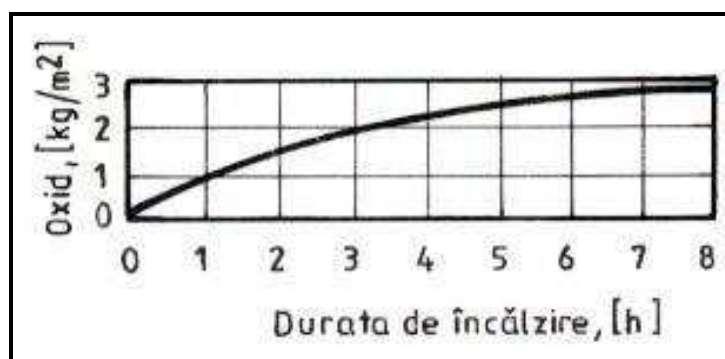


Fig. 3.4. Influența duratei de încălzire asupra formării oxizilor.

Compoziția mediului de încălzire influențează intensitatea oxidării. Astfel, vaporii de apă și dioxidul de carbon au cea mai mare influență oxidantă, începând chiar de la temperaturi relativ joase, în timp ce oxigenul (aerul) are o influență mai importantă în intervalul 900 ... 1000 °C, fără a depăși însă puterea de oxidare a vaporilor de apă și a dioxidului de carbon (fig.3.5).

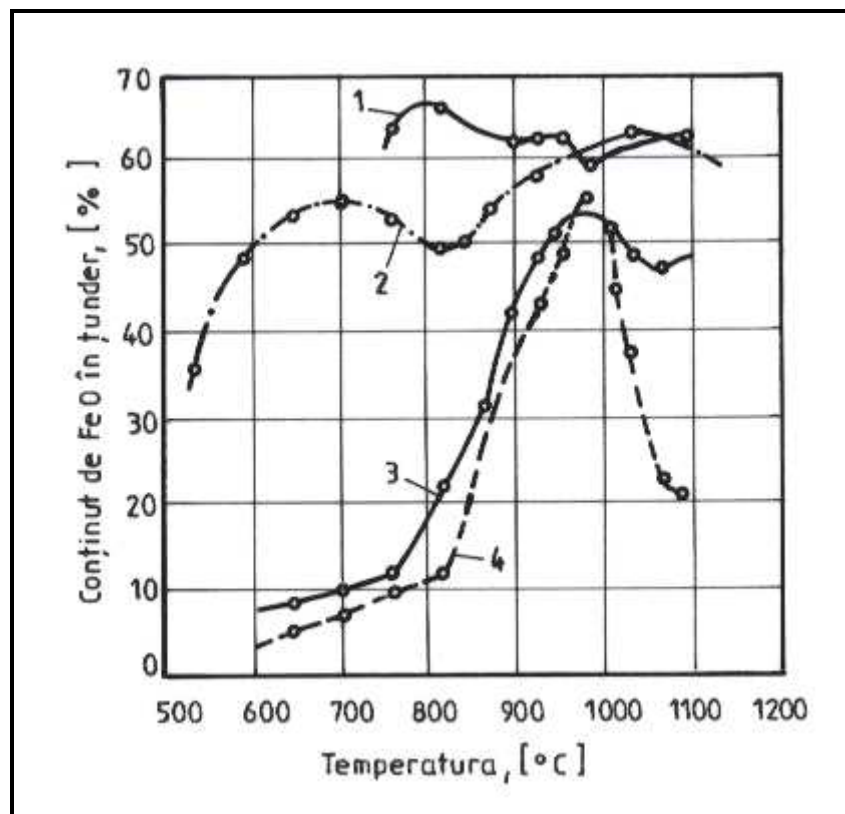


Fig. 3.5. Influența temperaturii și a compoziției gazelor de ardere asupra conținutului de oxid feros în țunder:
1 – H₂O vapor; 2 – CO₂; 3 – O₂; 4 – aer.

Formarea oxizilor depinde în mare măsură și de *compoziția oțelului*. Astfel, unele elemente de aliere din oțel ca Al, Cr, Si, W sau Cu micșorează oxidarea în timp ce altele, cum sunt Co, Mo sau Ni, măresc pătrunderea oxizilor în adâncimea semifabricatului.

Procesul de oxidare depinde și de *proprietățile fizice ale oxidului*. Astfel oxizii poroși au o aderență slabă și nu opun rezistență la difuzia oxigenului în adâncimea semifabricatului, în timp ce oxizii cu o structură densă, aderă puternic la suprafața semifabricatului și au o rezistență bună la difuzia oxigenului spre metal, având astfel un rol protector. Acest ultim efect îl favorizează Si, Al și Cr (elemente componente ale oțelurilor refractare).

Decarburarea apare concomitent cu procesul de oxidare și depinde de aceiași factori. Astfel, odată cu creșterea temperaturii și a duratei de menținere, adâncimea stratului decarburat se mărește (fig.3.6. și fig.3.7).

În ceea ce privește timpul de menținere se constată că după o anumită perioadă de timp grosimea stratului decarburat practic nu mai crește. Acest fenomen depinde de influența procesului de oxidare, care are loc concomitent cu decarburarea și difuzia carbonului din zonele centrale spre cele periferice. Intensitatea acestor procese crește cu mărirea temperaturii, dar nu în aceeași măsură. Într-o atmosferă oxidantă a cuptorului (atmosferă oxidantă fiind CO₂ + H₂O + O₂) viteza procesului de oxidare depășește viteza celorlalte procese, iar stratul de oxid format împiedică accesul gazelor decarburante.

Ca și în cazul oxidării, elementele de aliere ale oțelului au influențe diferite. Astfel, Cr, Al, W, Mn și Cu frânează decarburarea, iar Co, Mo, Ti, și V

favorizează decarburarea. După alte cercetări se admite că Al și W favorizează decarburarea, în timp ce Cr, Co și Mn frânează decarburarea, iar Si, Ni și V nu influențează acest proces.

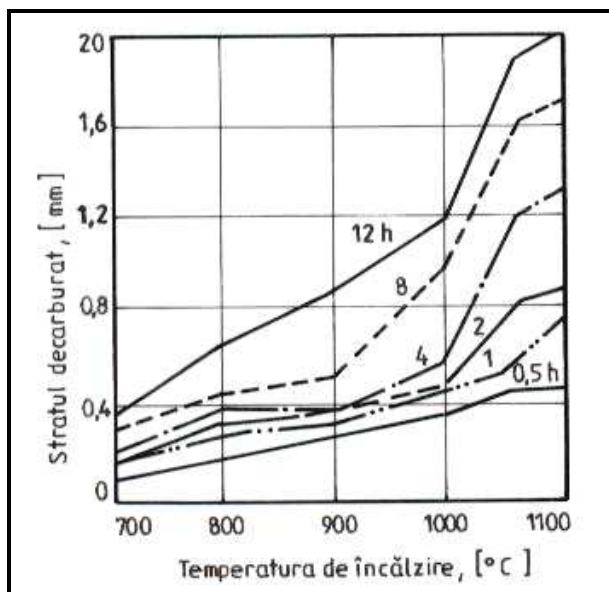


Fig. 3.6 Adâncimea de decarburare a oțelului rapid în funcție de temperatura de încălzire pentru diferite durate de încălzire.

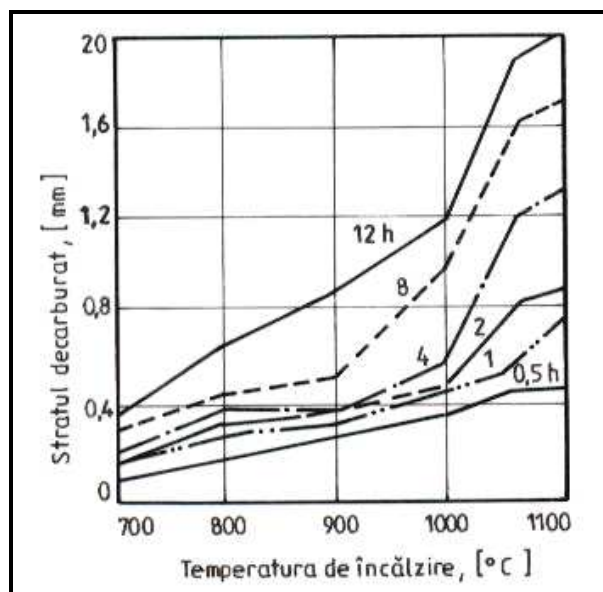


Fig.3.7 Decarburarea semifabricatului cu secțiunea de 170x170 mm în funcție de durata de menținere la temperatura de 1100 °C

Supraîncălzirea oțelului se manifestă prin creșterea exagerată a dimensiunilor grăunților acestuia, care conduce la micșorarea plasticității și la reducerea proprietăților mecanice ale produsului finit. Dacă supraîncălzirea nu a fost exagerat de mare structura oțelului se poate corecta printr-un tratament termic de normalizare.

În cazul însă al unei supraîncălziri intense, devine imposibilă restabilirea structurii oțelului, deoarece acesta își pierde capacitatea de recrystalizare.

Arderea oțelului se produce la temperaturi foarte înalte și cu timpi de menținere lungi și se manifestă prin apariția procesului de topire intergranulară și de pătrundere a gazelor în oțel, în special a oxigenului, în golurile apărute care prin oxidare nu mai pot fi sudate la cald prin deformare, întrerupându-se astfel coeziunea materialului, care devine fragil în timpul deformării la cald. În aceste condiții oțelul respectiv se rebutează.

3.4. PARAMETRII TEHNOLOGICI AI PROCESULUI DE DEFORMARE LA LAMINAREA OȚELURILOR ALIATE

Elementele de aliere în oțeluri conduc, printre altele, la creșterea rezistenței la deformare față de cea a oțelurilor nealiate, în aceleași condiții de laminare (temperatura și viteza de deformare), ceea ce necesită o micșorare

corespunzătoare a coeficienților de alungire. Astfel, dacă un oțel nealiat care are rezistența la deformare R_{ON} la temperatura respectivă de laminare, se laminează cu un coeficient de alungire λ_{ON} , un oțel aliat, care în aceleași condiții de laminare are rezistența la deformare R_{OA} , se va lamina cu un coeficient de alungire λ_{OA} calculat cu relația:

$$\lambda_{OA} = 1 + (\lambda_{ON} - 1) \frac{R_{ON}}{R_{OA}} \quad (3.1)$$

Astfel laminarea lingourilor din oțeluri aliate la bluming se efectuează, în general, într-un număr mai mare de treceri și cu reduceri mai mici cu circa 5...10% decât în cazul oțelurilor nealiate, respectiv $\lambda = 1,05...1,12$, nu din cauză că oțelurile nu ar suporta reduceri mai mari ci datorită faptului că oțelurile aliate, având rezistența la deformare mult mai mare, solicitările care apar pot depăși forțele admisibile și puterea instalată a motoarelor laminoarelor. Deci, în cazul unor bluminguri de puteri medii reducerea pe trecere nu poate depăși, în general, 40 mm în timp ce la bluminguri puternice se poate mări gradul de deformare până la 85 mm pe trecere, în special după distrugerea structurii de turnare a lingoului. Aplicarea reducerilor mari sunt de dorit deoarece pe lângă mărirea productivității laminorului asigură și pătrunderea deformației spre zona centrală a semifabricatului (care îmbunătățește proprietățile laminatului), cât și pierderi mai reduse de temperatură în timpul laminării, mai ales în cazul oțelurilor care au intervalul de temperaturi pentru deformare destul de îngust.

Calibrarea folosită este cea clasică (calibre cu lățire liberă) aplicându-se însă răsturnări după fiecare trecere, atât pentru o “frământare” mai intensă a materialului cât și pentru faptul că oțelurile aliate prezintă, în general, lățiri mai mari decât oțelurile nealiate.

Blumurile obținute după o prealabilă curățire pentru îndepărtarea defectelor de suprafață, mai frecvente ca la oțelurile nealiate, se relaminează în țagle sau profiluri, aplicându-se o nouă încălzire.

Sistemele de calibrare folosite sunt, în general, cele clasice și sunt prezentate în continuare.

Sistemul dreptunghi-pătrat (cu lățire liberă) se utilizează la primele treceri degrositoare, deoarece asigură o bună desțunderizare a semifabricatelor și reduceri uniforme.

Sistemul romb-pătrat are avantajul principal că prezintă posibilitatea obținerii de pătrate mai regulate și mai netede decât, de exemplu, în cazul sistemelor cutie sau oval-pătrat, asigurând grade de reducere mai mari ca la sistemul de calibre cutie, dar mai mici ca la sistemul oval-pătrat. Dezavantajul sistemului romb - pătrat îl reprezintă răcirea mai rapidă a muchiilor ascuțite, ceea ce duce la scăderea plasticității și la posibilitatea apariției fisurilor, aceasta cu atât mai mult cu cât romburile folosite pentru laminarea oțelurilor aliate se construiesc mai alungite, pentru evitarea apariției bavurilor, datorită unei lățiri mai pronunțate a acestor oțeluri. Aceste romburile mai alungite au însă avantajul unei stabilități mai bune a laminatului. O altă cauză a apariției fisurilor pe muchia cu unghi mai mare de la fundul calibrului o reprezintă variația vitezelor

particulelor pe conturul laminatului, astfel că $v_{\text{salt}} > v_{\text{fund}}$. Rezultă de aici că $\lambda_{\text{salt}} > \lambda_{\text{fund}}$, astfel încât în zona fundului calibrului, pe muchie, apar tensiuni de întindere generatoare de fisuri. Tot din această cauză apar și uzuri ale calibrelor datorită alunecării laminatului pe calbru, generatoare și de suprafețe rugoase ale laminatelor și cu eventuale aderențe. De asemenea, calibrele rombice datorită pantei mici nu îndepărtează perfect Țunderul de pe laminat, ci dimpotrivă îl pot imprima în metal. Sistemul de calibrare romb-pătrat se folosește rar datorită acestor dezavantaje.

Sistemul oval - pătrat este un sistem mult mai folosit datorită faptului că asigură deformări pe patru direcții ceea ce este favorabil pentru oțelurile aliate. De asemenea, acest sistem asigură coeficienți de alungire de la pătrat la pătrat mari, însă repartizarea reducerilor pe cele două tipuri de calibre este mult mai neuniformă, astfel încât $\lambda > \lambda_0$. De asemenea, la laminarea cu neumplerea calibrelor la nivelul saltului, se produc frecvent fisuri. Acestea se formează în oval datorită unei mai puternice reduceri a laturii verticale a pătratului, iar în pătrat fisurile de la oval se amplifică prin împănare în fundul calibrului pătrat. În figura 3.8 se prezintă diagrama alungirilor la deformarea pătratului în calibrul oval, iar în figura 3.9 se prezintă schematic formarea fisurilor pe oval la introducerea acestuia în calibrul pătrat.

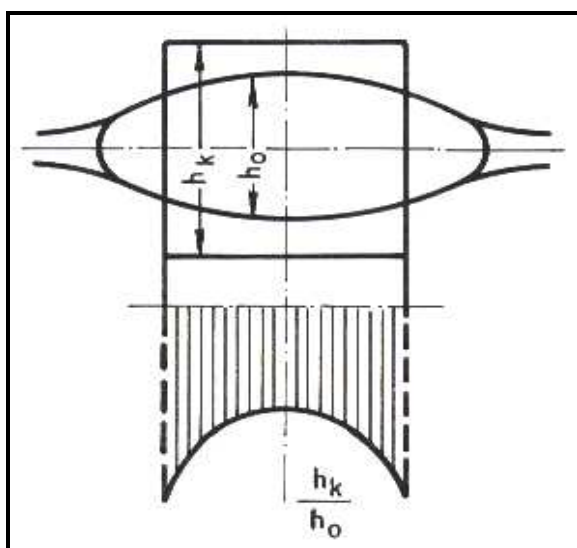


Fig.3.8 Diagrama alungirilor naturale la deformarea pătratului în calibrul oval.

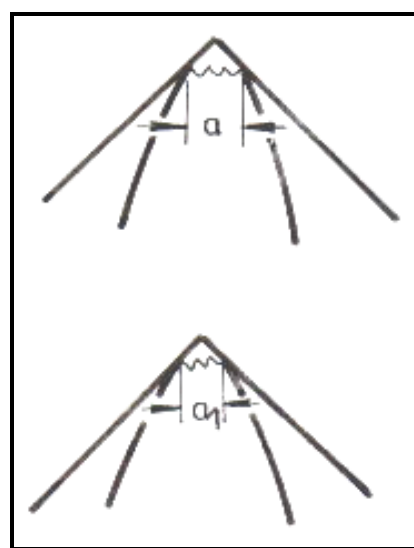


Fig.3.9 Scheme care prezintă formarea fisurilor pe oval la introducerea acestuia în calibrul pătrat.

Formarea acestor fisuri este proprie sistemului oval-pătrat. Ele se pot diminua cu cât fețele laterale ale profilului sunt mai rotunjite. Coeficienții medii de alungire pentru acest sistem de calibrare au valori de 1,3 ... 1,45.

Sistemul oval-oval este un sistem care elimină, într-o oarecare măsură, dezavantajele sistemului oval-pătrat, în ceea ce privește uniformizarea reducerilor pe treceri și apariția rizurilor. De asemenea, la acest sistem, ca de altfel și la varianta sa *oval-rotund*, reducerile maxime apar în zona centrală a laminatului, scăzând apoi spre salt, ceea ce nu va mai genera rizuri.

Ca dezavantaje ale sistemului se pot menționa: suprafața mică de contact dintre laminat și cilindrii; prinderea se efectuează mai greu, cu atât mai greu cu cât și oțelul este mai dur, acest dezavantaj apărând și la sistemul oval-rotund; dacă ghidarea nu este perfectă apare pericolul răsucirii ovalului în oval; ghidarea imperfectă determină și înrăutățirea prinderii.

Sistemul oval-rotund a căpătat în ultimii ani o largă răspândire ca urmare a faptului că prin acest sistem se asigură o calitate superioară a suprafeței laminatelor, coeficienții medii de alungire pentru acest sistem având valori cuprinse în limitele $\lambda = 1,2...1,4$. Calibrele rotunde și ovale favorizează o îndepărtare foarte bună a oxidului de pe laminat, mai ales la laminarea ovalului în rotund, ceea ce, după cum s-a mai menționat, asigură laminate finite cu o calitate superioară a suprafeței. La laminarea în calibrul oval laminatul este mai stabil decât în cazul sistemelor oval-pătrat sau oval-oval. Laminarea efectuându-se în calibre ovale umplute, pericolul formării fisurilor este redus. Dezavantajul principal al acestui sistem îl reprezintă stabilitatea redusă la laminarea ovalului în rotund și neuniformitatea mare a deformației pe lățimea calibrului (fig.3.10).

Calculul calibrărilor pentru laminarea oțelurilor aliate trebuie să țină cont de doi parametrii importanți ai procesului de laminare care condiționează în ultimă instanță umplerea calibrelor și anume de coeficientul de frecare f și de lățimea Δb pentru care se recomandă următoarele relații de calcul:

$$f = a m c_v (0,005 t - 0,006 e^{0,005t}) \quad (3.2)$$

$$\Delta b = m c_b \left(1 + \frac{1}{\varepsilon}\right) \left(f l_c - \frac{\Delta h}{2}\right) \frac{1}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

în care:

a este coeficientul care ține cont de materialul și de starea suprafețelor cilindrilor (v. tabelul 3.1);

m - coeficient care ține cont de compoziția oțelului laminat (v. tabelul 3.2);

c_v - coeficientul care ține seama de influența vitezei de laminare: $c_v=1,3$ pentru $v < 1,5\text{m/s}$ și $c_v = 1,0$ pentru $v > 1,5 \text{ m/s}$;

c_b - coeficient de corecție care ține cont de lățimea laminatului (fig. 3.11);

t - temperatura de laminare;

l_c - lungimea arcului de contact;

ε - gradul de deformare .

La calculul lățirii, coeficientul de frecare nu se va mai amplifica cu coeficientul m .

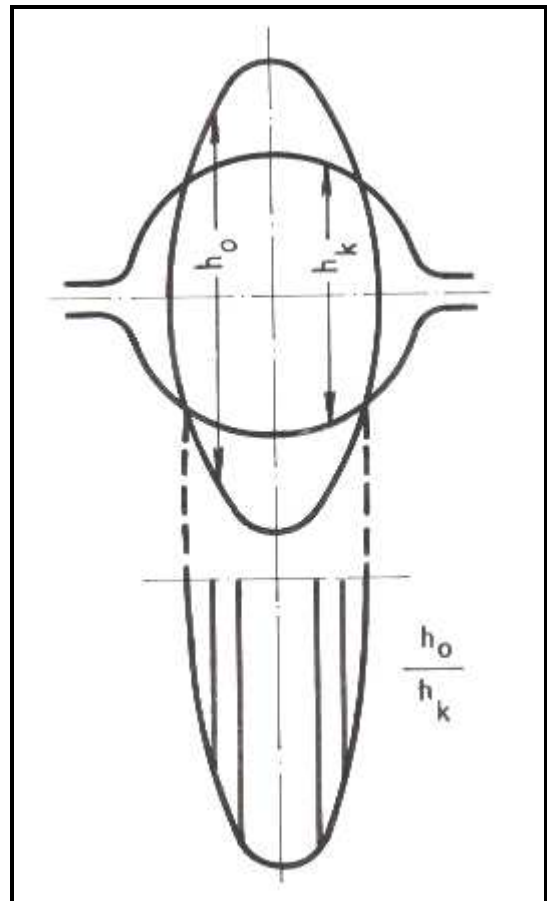


Fig.3.10. Diagrama alungirilor naturale la laminarea ovalului în calibrul rotund.

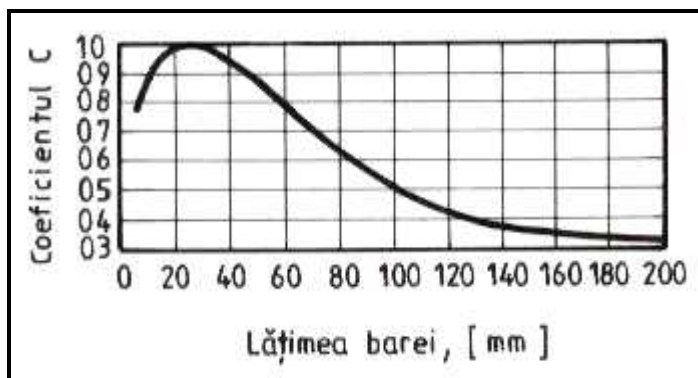


Fig.3.11. Curba pentru determinarea coeficientului de corecție C_b care ia în considerare influența lățimii asupra lățirii.

Tabelul 3.1

Valorile coeficientului a pentru determinarea coeficientului de frecare f

Materialul cilindrilor		Starea suprafeței cilindrilor		
		Rectificați	Strunjiți	Folosiți
Oțel	turnat	-	0,10...0,12	0,13...0,15
	forjat	0,05...0,07	0,09...0,10	0,12...0,14
Fontă	semidură	0,07...0,08	0,08...0,09	0,10...0,12
	călită	0,04...0,06	0,07...0,08	0,08...0,10

Tabelul 3.2

Valorile coeficientului m pentru determinarea coeficientului de frecare f și pentru determinarea coeficientului de lățire Δb

Grupa structurală a oțelului	Exemple de mărci de oțel	Valorile coeficientului m
Oțeluri nealiate	OL 32	1,00
Oțeluri ledeburitice	Rp 3	1,10
Oțeluri perlitice, perlito-martensitice și martensitice	OSC 7	1,24
	RUL 1; E - III - 2,5	1,29
	40 C 130; 38MoCrAl 09	1,33
Oțeluri austenitice	Cr- Ni 13 ... 15 %; Mo 0,4 %; W 3 %	1,36
	22 MoNiCr 130	1,42
Oțeluri austenitice cu fază în exces	10TiNiCr 180	1,44
	15NiCr230	1,53
Oțeluri feritice cu Cr și Al	Kantal	1,55
Oțeluri austenitice cu carburi		1,62