

### 3. OCELE

V materiálových vedách sa rozdeľujú kovy na *železo* a *neželezné kovy*. Toto delenie zdôrazňuje technický význam železa, ktorého zliatiny majú veľmi výhodnú kombináciu pevnostných vlastností a ceny. Od zdokonalenia výroby ocele v polovici minulého storočia sa za krátku dobu stali najvýznamnejším konštrukčným materiálom. V ostatných desaťročiach výroba aj význam zliatin železa klesá, ale aj tak sú (a v reálne prognostikovanej perspektíve aj zostanú) veľmi dôležitou skupinou kovových materiálov [4, 37].

*Zliatiny železa* rozdeľujeme na:

- *ocel*, t. j. zliatiny do 2,14 % C, ktoré je možné ohrevom previesť do oblasti austenitu, sú charakteristické dobrou tvárnosťou a určené predovšetkým na výrobu tvárnených polovýrobov;
- *liatiny*, t. j. zliatiny s viac ako 2,14 % C, ktoré obsahujú v štruktúre eutektikum (ledeburit) alebo grafit, ktoré prakticky znemožňujú ich tvárnosť, ale zlepšujú tekutosť, preto sú určené na výrobu odliatkov (pozri kap. 3.9).

*Ocele* rozdeľujeme:

- podľa chemického zloženia na *uhlíkové* (obsahujú okrem Fe a C sprievodné prvky, definíciu upravuje STN 42 0002 určením max. obsahov jednotlivých prvkov 0,9 % Mn, 0,5 % Si, 0,3 % Ni, Cr, 0,2 % W, Co, 0,1 % Mo, V, Ti, Al) a *zliatinové* (obsahujú jeden alebo viac zliatinových prvkov);
- podľa obsahu uhlíka na *nízkouhlíkové* (do 0,25 % C), *stredne uhlíkové* (0,25 až 0,6 %) a *vysokouhlíkové* (nad 0,6 % C);
- podľa obsahu legujúcich prvkov na *nelegované* (bez prísad, uhlíkové), *nízkolegované* (do 5 %), *stredne legované* (5,0 % do 10 %) a *vysoko-legované* (nad 10 %);
- podľa spôsobu spracovania na *tvárnené ocele* (dodáva hutný priemysel v tvare rôznych tvárnených polovýrobov) a *ocel na odliatky* (spracovávajú sa zlievarenskou technológiou);
- podľa záruk chemického zloženia zo strany dodávateľa na *ocel zvyčajnej akosti* (výrobca buď nezaručuje chemické zloženie vôbec - ocele triedy 10, alebo zaručuje iba horný obsah C, P, S, resp. výnimočne

aj ďalších prvkov - ocele triedy 11) a *ušľachtilé ocele* (výrobca zaručuje ich chemické zloženie, tj. minimálny aj maximálny obsah prvkov);

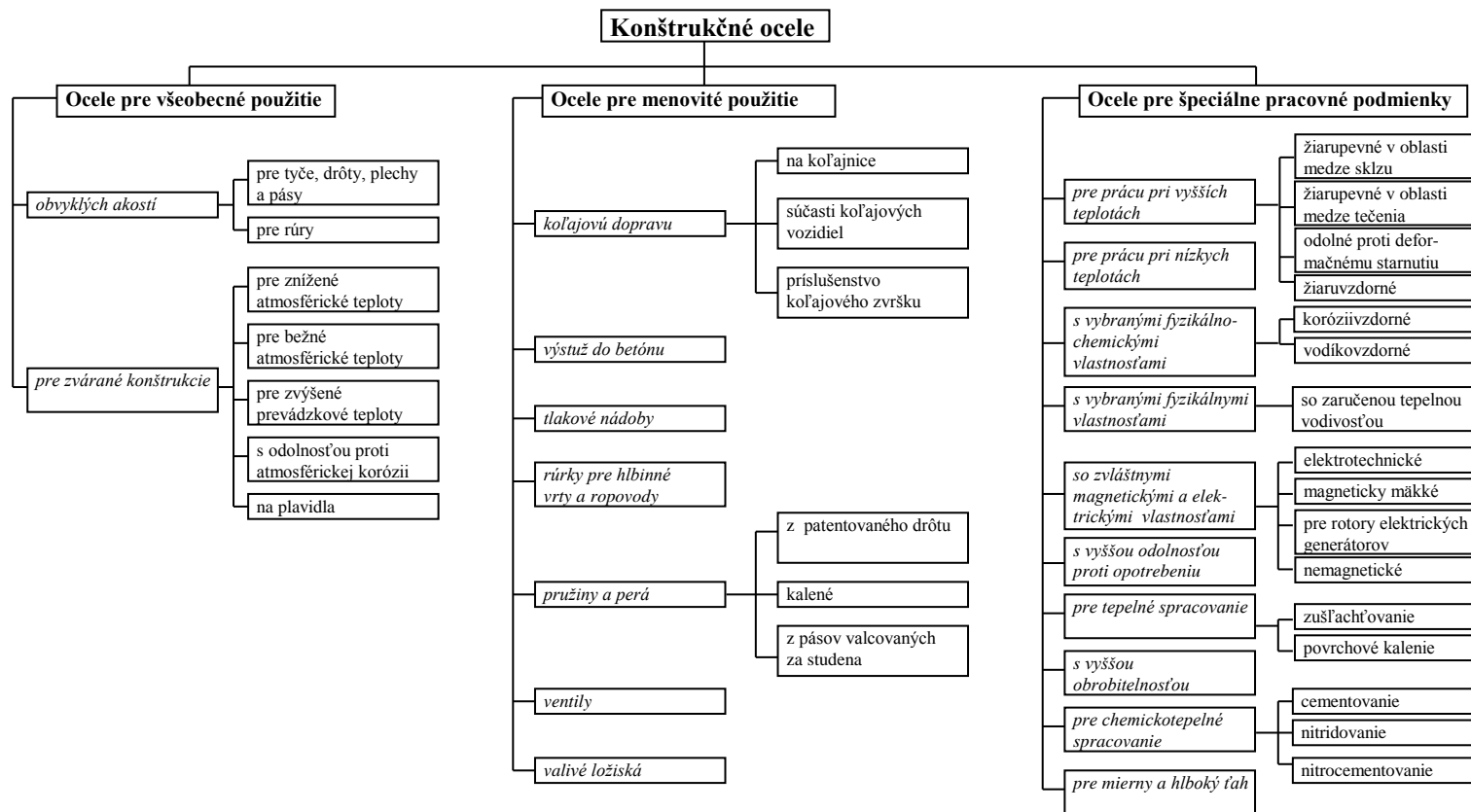
- podľa použitia na *konštrukčné* a *nástrojové*, podrobnejšie členenie konštrukčných ocelí podľa použitia udáva tab. 3.1.

Podľa STN sa tvárnené ocele rozdeľujú podrobnejšie na *triedy*. Ocele zvyčajnej akosti sú *oceli triedy 10* alebo *triedy 11* (pozri vyššie), uhlíkové konštrukčné ocele patria do *triedy 12*, konštrukčné ocele legované sa zadeľujú podľa druhu obsiahnutých legúr: *oceli triedy 13* sú legované Mn, Si, Mn-Si, Mn-V, *oceli triedy 14* sú legované Cr, Cr-Mn, Cr-Si, Cr-Al, *oceli triedy 15* sú legované Cr-Mo, Cr-V, *oceli triedy 16* obsahujú Ni (oceli legované Ni-Cr, Ni-Mn-Cr, Cr-Ni-W-V a pod.). Do *triedy 17* sa zaraďujú ocele so zvláštnymi vlastnosťami (antikorózne ai.), patriace podľa obsahu prísad prevažne medzi vysokolegované. Všetky nástrojové ocele sú zaradené v *triede 19*. Tvárnené ocele sa podľa STN označujú päťmiestnou *základnou* značkou, pričom dvojčíslo z dvoch prvých číslíc označuje triedu ocele. Podľa STN EN 10027-2 sa označujú ocele trojprvkovým označením 1+ +++, kde 1 značí ocel, druhý prvok (dvojčíslic) triedu (pozri tab.3.2.) a tretí prvok (dvojčíslic) má význam poradového čísla.

Základným druhom ocelí pre všeobecné použitie sú venované kap.3.1 (tr.10 a 11) a 3.4 (tr.12 až 16) a najdôležitejším trendom a novým materiálom na tieto skupiny nadväzujúcim kap.3.2, 3.3 a 3.5. Ocele menovitého použitia, vyvinuté na výrobu konkrétnych súčiastok, spracováva kap. 3.6. Ocele triedy 17 spolu s trendmi v tejto oblasti prezentuje kap. 3.7.

Tab. 3.1

Rozdelenie konštrukčných ocelí podľa použitia



Označovanie ocelí podľa STN EN 10027-2

Ozn.	Charakteristika	Ozn.	Charakteristika
00	základné ocele	48	žiaruvzdorné ocele s $Ni \geq 2,5 \%$
01	ocle pre všeobecné použitie, $R_m < 500 \text{ MPa}$	49	žiarupevné materiály
02	Iné konštrukčné ocele nevhodné na tepelné spracovanie s $R_m < 500 \text{ MPa}$	50	konštrukčné zliatinové ocele Mn-Si- Cu
03	ocle s nízkym obsahom uhlíka, $C < 0,12 \%$ , alebo $R_m < 400 \text{ MPa}$	51	konštrukčné zliatinové ocele Mn-Si, Mn-Cr
04	ocle s nízkym obsahom uhlíka, $0,12 \leq C < 0,25 \%$ , alebo $400 \leq R_m < 500$ MPa	52	konštrukčné zliatinové ocele Mn-Cu, Mn-V, Si-V, Mn-Si-V
05	ocle so stredným obsahom uhlíka, $0,25 \leq C < 0,55 \%$ , alebo $500 \leq R_m < 700$ MPa	53	konštrukčné zliatinové ocele Mn-Ti, Si-Ti
06	ocle s vyšším obsahom uhlíka, $0,55 \geq C$ , alebo $700 \text{ MPa} \leq R_m$	54	konštrukčné zliatinové ocele Mo, Nb, Ti, V, W
07	ocle so zvýšeným obsahom fosforu alebo síry	55	konštrukčné zliatinové ocele B, Mn- B, ak $Mn < 1,65 \%$
10	ocle so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami	56	Ni konštrukčné zliatinové ocele
11	konštrukčné, strojné ocele a ocele pre tlakové nádoby s $C < 0,50$	57	Cr-Ni konštrukčné zliatinové ocele, ak $Cr < 1,0 \%$
12	konštrukčné, strojné ocele a ocele pre tlakové nádoby s $C \geq 0,50$	58	Cr-Ni konštrukčné zliatinové ocele, ak $1,0 \leq Cr < 1,5 \%$
13	konštrukčné, strojné ocele a ocele pre tlakové nádoby so špeciálnymi požiadavkami	59	Cr-Ni konštrukčné zliatinové ocele, ak $1,5 \leq Cr < 2,0 \%$
15-18	nástrojové ocele nelegované	60	Cr-Ni konštrukčné zliatinové ocele, ak $2,0 \leq Cr < 3,0 \%$
20	Cr legované nástrojové ocele	62	Ni-Si, Ni-Mn, Ni-Cu konštrukčné zliatinové ocele

## Označovanie ocelí podľa STN EN 10027-2

Ozn.	Charakteristika	Ozn.	Charakteristika
21	Cr-Si, Cr-Mn, Cr-Mn-Si legované nástrojové ocele	63	Ni-Mo, Ni-Mo-Mn, Ni-Mo-Cu, Ni-Mo-V, Ni-Mn-V konštrukčné zliatinové ocele
22	Cr-V, Cr-V-Si, Cr-V-Mn, Cr-V-Mn-Si legované nástrojové ocele	65	Cr-Ni-Mo konštrukčné zliatinové ocele, ak $Mo < 0,4 \%$ a $Ni < 2,0 \%$
23	Cr-Mo, Cr-Mo-V, Mo-V legované nástrojové ocele	66	Cr-Ni-Mo konštrukčné zliatinové ocele, ak $Mo < 0,4 \%$ a $2,0 \leq Ni < 3,5 \%$
24	Cr-W, W legované nástrojové ocele	67	Cr-Ni-Mo konštrukčné zliatinové ocele, ak $Mo < 0,4 \%$ a $3,5 \leq Ni < 5,0 \%$ alebo $Mo \geq 0,4 \%$
25	Cr-W-V, W-V legované nástrojové ocele	68	Cr-Ni-V, Cr-Ni, Cr-Ni-V-W konštrukčné zliatinové ocele
26	W legované nástrojové ocele, s výnimkou skupín 24, 25, 27	69	Cr-Ni konštrukčné zliatinové ocele, s výnimkou skupiny 57 až 68
27	Ni legované nástrojové ocele	70	Cr a Cr-B konštrukčné zliatinové ocele
28	určité nástrojové ocele	71	Cr-Si, Cr-Mn, Cr-Mn-B, Cr-Si-Mn konštrukčné zliatinové ocele
32	rýchlorezné ocele legované kobaltom	72	Cr-Mo-B konštrukčné zliatinové ocele, ak $Mo < 0,35 \%$
33	rýchlorezné ocele neobsahujúce kobalt	73	Cr-Mo konštrukčné zliatinové ocele, ak $Mo \geq 0,35 \%$
35	ocel pre valivé ložiská	75	Cr-V konštrukčné zliatinové ocele, ak $Cr < 2,0 \%$
36	materiály so zvláštnymi magnetickými vlastnosťami nelegované kobaltom	76	Cr-V konštrukčné zliatinové ocele, ak $Cr \geq 2,0 \%$
37	materiály so zvláštnymi magnetickými vlastnosťami legované kobaltom	77	Cr-Mo-V konštrukčné zliatinové ocele

## Označovanie ocelí podľa STN EN 10027-2

Ozn.	Charakteristika	Ozn.	Charakteristika
38	materiály so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami nelegované niklom	79	Cr-Mn-Mo, Cr-Mn-Mo-V konštrukčné zliatinové ocele
39	materiály so zvláštnymi fyzikálnymi vlastnosťami legované niklom	80	Cr-Si-V, Cr-Si-Mn-Mo, Cr-Si-Mo-V, Cr-Si-Mn-Mo-V konštrukčné zliatinové ocele
40	antikorózne ocele nelegované Mo, Nb a Ti, obsahujúce Ni < 2,5 %	81	Cr-Si-V, Cr-Mn-V, Cr-Si-Mn-V konštrukčné zliatinové ocele
41	antikorózne ocele nelegované Nb a Ti, obsahujúce Ni a Mo < 2,5 %	82	Cr-Mo-W, Cr-Mo-W-V konštrukčné zliatinové ocele
43	antikorózne ocele nelegované Mo, Nb a Ti, obsahujúce Ni ≥ 2,5 %	84	Cr-Si-Ti, Cr-Mn-Ti, Cr-Si-Mn-Ti konštrukčné zliatinové ocele
44	antikorózne ocele nelegované Nb a Ti, obsahujúce Ni < 2,5 % s obsahom Mo	85	ocеле na nitridovanie
45	antikorózne ocele so zvláštnymi prísadami	87	konštrukčné zliatinové ocele nevhodné na tepelné spracovanie
46	niklové zliatiny, vrátane vysoko- pevných	88- 89	vysokopevné zvariteľné ocele
47	žiaruvzdorné ocele s Ni < 2,5 %		

### 3.1 Ocele zvyčajnej akosti

Konštrukčné ocele zvyčajnej akosti sú určené pre hromadnú spotrebu (okolo 80 % celkového objemu ocelí). Je pre ne charakteristická horšia čistota (vyšší obsah P a S) a vlastnosti a vo všeobecnosti nie sú určené na zušľachtovanie alebo chemicko - tepelné spracovanie. Ocele triedy 10 sú najlacnejšími materiálmi na výrobu málo namáhaných súčiastok nepodstatného významu pre väčší celok (stroj ap.). Do triedy 10 sú zaradené aj ocele pre výstuž betónových konštrukcií (tvarové tyče). Väčší technický význam majú ocele triedy 11.

**Ocele triedy 10.** Dodávajú sa ako tyče, plechy, drôty a výkovky. V týchto oceliach sa väčšinou nezaručuje chemické zloženie, v niektorých materiálových listoch je len ohraničený obsah fosforu a síry. Obsah medi býva obyčajne max. 0,30 %, pretože meď zhoršuje zvárateľnosť a tváriteľnosť. Ocele triedy 10 sa tavia ako neuspokojené, polospokojené a uspokojené. Dodávajú sa väčšinou bez tepelného spracovania, hrubé plechy aj ako normalizačne žíhané, alebo sa tepelné spracovanie nahrádza riadeným valcovaním, pričom sa konečná teplota tvárnenia volí taká, aby ocele mali jemné zrno. Ocele triedy 10 nie sú vhodné na použitie pri teplotách pod  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pretože príliš klesá ich vrubová húževnatosť. Nepoužívajú sa ani na cementované, zušľachtované a povrchovo kalené súčiastky.

*Ocele obchodnej akosti* sú normované v dvoch značkách (10 000 a 10 004) a nie sú u nich zaručované mechanické vlastnosti ani chemické zloženie. Norma predpisuje len uhol ohybu pri stanovenom priemere trňa pri skúške lámavosti. Používajú sa na výrobu súčiastok podružného významu ako plechy na lemované súčasti, pásy a pruhy na obíjanie debien a pod.

*Ocele tr. 10 so zaručenou pevnosťou*, t. j. značky 10 340, 10 370 a 10 420. Jednotlivé druhy sa odlišujú obsahom uhlíka, jeho obsah však nie je zaručovaný. Ocele sú zvárateľné, výrobca však nemôže zvárateľnosť zaručovať, hoci ide o uhlíkové ocele s nízkym obsahom uhlíka a to preto, že trieda 10 je charakteristická najnižšou čistotou. U tejto skupiny ocelí dozerá oceliareň na to, aby obsah fosforu u ocelí konvertorových nebol väčší ako 0,09 % a u ocelí martinských väčší ako 0,07 %. Maximálny obsah síry je 0,06 %, súčet obsahu (P + S) u ocelí konvertorových max. 0,13 %, u ocelí martinských 0,11 %. Tieto obsahy nečistôt však nie sú materiálovými listami zaručované. Uvedené ocele sú najlacnejšími materiálmi pre výrobu súčastí a konštrukcií dimenzovaných podľa pevnostného výpočtu. Ak sa však pri spracovaní ocele alebo pri prevádzke hotovej súčasti vytvoria podmienky vyvolávajúce starnutie (tvárnenie za studena, nasledujúci ohrev na  $200\text{ až }300\text{ }^{\circ}\text{C}$  vplyvom prevádzkovej teploty alebo v okolí zvaru a pod.), dochádza u týchto ocelí k závažným zmenám vlastností (najmä pokles húževnatosti), a preto je ich použitie v takýchto podmienkach a najmä pre dynamické namáhanie nevhodné.

Tab. 3.3

Rozdelenie ocelí zvyčajných akostí na zvarované konštrukcie do tried ISO

ISO	R <sub>e</sub> (MPa)	Zaručené hodnoty KCV				
		A bez zár.	B 20 °C	C 0 °C	D -20 °C	E -40 °C
Fe 310	175	11 343				
Fe 360	235 až 215	11 373	11 375 11 378	11 375 11 378 11 369	11 378 11 381 11 369	11 369
Fe 410	255 až 225	11 423	11 425	11 425 11 428	11 342 11 428	11 419
Fe 430	275 až 255		11 455	11 457	11 431 11 481 11 457 11 402	
Fe 510	355 až 335	11 523	11 523	11 523 11 483 11 484 11 503	11 523 11 484 11 531 11 483 11 503	11 484 11 503

**Ocele zvyčajných akostí na zvarované konštrukcie.** Sú to ocele triedy 11 s nízkym obsahom uhlíka. Pre konštrukčné ocele triedy 11 sa zaručuje maximálny obsah uhlíka, Pretože však nie je obmedzená jeho spodná hranica a dodávajú sa prevažne ako neuspokojené, neodporúča sa používať ich na zušľachtované, cementované a povrchovo kalené súčiastky. Pretože zvarateľnosť zhoršuje najmä uhlík, obmedzuje sa jeho obsah v oceliach na zvarované konštrukcie na max. 0,22 %, mimoriadne na max. 0,25 %. Neuspokojené ocele sú vhodné na zvarované súčiastky s hrúbkou steny maximálne 16 mm, ocele uspokojené kremíkom do 25 mm. Pri väčšej hrúbke steny sa už používajú ocele uspokojené hliníkom alebo mikrolegované niómom, vanádom alebo titánom. Podľa medzinárodného odporúčania ISO/DIS 630 sa ocele rozdeľujú podľa pevnosti do štyroch skupín - Fe 310, Fe 360, Fe 430, Fe 510. V prvej skupine je ocel so



zaručenou maximálnou medzou klzu 175 MPa. V skupine Fe 360 až Fe 510 je vždy niekoľko ocelí s rovnakou medzou klzu, ale s rôznou prechodovou teplotou. Rozdelenie československých ocelí podľa tohto odporúčania uvádza tab. 3.3 [37], v ktorej sú zaradené aj zvárateľné ocele so zníženým sklonom k starnutiu (11 381, 11 431, 11 481, 11 531).

Tab. 3.4

Chemické zloženie ocelí zvyčajných akostí na zvarované konštrukcie

Zvárateľné ocele zvyčajných akostí

Trieda	Chemické zloženie (%)							
	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Ti	Cr max.	Cu max.
11 342	0,10	0,45	0,15	0,030	0,025	0,06-0,20		
11 343	0,17			0,050	0,050			
11 373	0,22			0,050	0,050			
11 375	0,20			0,050	0,050			
11 378	0,16			0,045	0,045			
11 402	0,10	0,55	0,15	0,030	0,025	0,06-0,20		
11 423	0,24			0,050	0,050			
11 425	0,22			0,050	0,050			
11 428	0,22			0,045	0,045			
11 455	0,20			0,050	0,050			
ON 11 457	0,18	1,30	0,40	0,040	0,040		0,2	0,3
Trieda	Chemické zloženie (%)							
	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	Al min.		
11 381	0,16	0,70	0,35	0,030	0,030	0,020		
11 431	0,20	0,80	0,35	0,035	0,030	0,020		
11 481	0,20	1,30	0,45	0,035	0,030	0,020		
11 531	0,20	1,50	0,55	0,035	0,030	0,020		

Chemické zloženie ocelí zvyčajných akostí na zvarované konštrukcie uvádza tab. 3.4. Najbežnejšie sa používajú značky 11 343, 11 373 a 11 423. Ocele 11 375 a 11 425 sú vyrábané prevažne ako martinské ocele uspokojené, čo umožňuje zaručiť zvárateľnosť do väčších hrúbok súčastí

ako u predchádzajúcich značiek. Vývojové tendencie smerujú u lacných zvärateľných ocelí k jemnozrnným oceliam so zvýšenou medzou klzu (kap. 3.2).

**Ocele na tyče, plechy a rúrky.** Tvárnené polovýrobky (tyče, plechy, pásy, rúrky, drôty) sa vyrábajú zo širokej škály ocelí triedy 11. Môžeme ich rozdeliť na nízkouhlíkové a so zvýšeným obsahom uhlíka. Pri nízkouhlíkových oceliach ide o analogické značky ako pri oceliach na zvarované konštrukcie.

Tenké plechy zvyčajných akostí sa valcujú za studena, hrubšie za tepla. Pri tepelnom spracovaní sa odporúča normalizačné žihanie z teploty 900 °C. Moderné pece pracujú s ochrannou atmosférou, aby sa povrch plechov neokysličoval a zostal po tepelnom spracovaní lesklý. Tenké plechy valcované za studena v hrúbke 0,50 až 2,00 mm sa dodávajú podľa STN 42 0117 z ocelí akosti 10 004, 11 343, 11 373 v tabuliach alebo vo zvitkoch. Hrubé plechy v hrúbke 3 mm a viac sa vyrábajú podľa STN 42 0209 z ocelí akosti 10 000, 10 004, 10 005, 10 370, 10 420, 11 300, 11 320, 11 342, 11 343, 11 373, 11 375, 11 378, 11 379, 11 381, 11 402, 11 423, 11 425, 11 428, 11 431, 11 455, 11 457, 11 483, 11 500, 11 523, 11 524, 11 529, 11 531, 11 600, 11 700.

Tab. 3.5

Ocele na hlboké ťahanie

Trieda	Chemické zloženie (%)				Iné
	C max.	Mn max.	P max.	S max.	
11 300	0,09		0,040	0,040	
11 301	0,08	0,40	0,030	0,030	
11 304	0,07	0,40	0,025	0,025	
11 305	0,07	0,40	0,025	0,025	min. 0,025 % Al
11 320	0,11		0,045	0,045	
11 321	0,10	0,45	0,035	0,035	
11 325	0,10	0,45	0,035	0,035	min. 0,020 % Al
11 330	0,13		0,050	0,050	
11 331	0,11	0,45	0,035	0,035	

*Ocele na hlboké ťahanie* tvoria samostatnú skupinu ocelí na plechy a pásy. Z ocelí tejto skupiny sa vyrábajú tvárnením za studena alebo za tepla plechy vhodné na ďalšie spracovanie za studena. Aby prebiehala plastická deformácia pri ťahaní už pri nízkom napätí, vyžaduje sa čo najnižšia medza klzu. Najakostnejšie ocele majú  $R_e$  maximálne 160 MPa, pevnosť v ťahu 280 MPa, ťažnosť minimálne 45 %. Pomer  $R_e/R_m$  100 pre akostné ocele je asi 60 %, pre bežné ocele je vyšší ako 75 %. Ak je tento pomer nízky, plech pri tvárnení nepruží a dá sa ľahko plasticky deformovať. Hlbokoťažné ocele musia mať dobré plastické vlastnosti v celom tvárnenom objeme, vyhovujúcu hrúbkovú toleranciu, minimálny sklon k starnutiu a nízku cenu. Pri lisovaní sa nemajú na povrchu tvoriť deformačné čiary. Vlastnosti hlbokoťažných ocelí ovplyvňuje teplota dovalcovania a zvinutia a chemické zloženie. Medzu klzu zvyšuje najmä uhlík, ktorého obsah sa preto znižuje pod 0,10 %. Matricu má tvoriť ferit s malým množstvom perlitu. V štruktúre nemá byť vylúčený na hraniciach zŕn terciálny cementit, ktorý znižuje plastické vlastnosti. Sekundárna metalurgia používaná dnes v hutníckych závodoch umožňuje ekonomicky vyrábať ocele s obsahom uhlíka nižším ako 0,02 %. Tento obsah je už taký nízky, že uhlík zostáva pri rýchlejšom ochladzovaní rozpustný vo ferite. Tvárniteľnosť plechov sa zlepšuje, ak sú v štruktúre feritické zrnká šošovicovitého tvaru orientované dlhšími osami do smeru valcovania [40]. Obsah mangánu sa pohybuje od 0,20 do 0,40 %, pretože mangán zvyšuje pevnosť feritu. určité množstvo mangánu je potrebné na viazanie síry, aby sa zaručila tvárniteľnosť za tepla. Obsah kremíka má byť čo najnižší, pretože zvyšuje medzu klzu a medzu pružnosti. podľa niektorých autorov sa má znížiť aj v uspokojených oceliach pod 0,05 %. Fosfor spevňuje ferit a zvyšuje jeho krehkosť. Preto sa obmedzuje maximálne na 0,030 až 0,035 %, Obsah síry musí byť čo najnižší, pretože sulfidy zhoršujú plasticitu. Chróm, nikel, molybdén a meď zvyšujú pevnosť feritu, preto má byť ich obsah nižší ako 0,12 až 0,15 %. Pri oceliach na hlboké ťahanie treba venovať pozornosť aj veľkosti zrna, pretože jemnozrnné ocele majú vyššiu medzu klzu. Optimálna veľkosť zrna podľa STN v neuspokojených oceliach je 5 a viac, v uspokojených 6 až 7. Ocele na hlboké ťahanie sa odlievajú ako neuspokojené alebo uspokojené. Plechy z neuspokojených ocelí majú lepší povrch a hrubšie zrno. Ak sa však vyrábajú valcovaním za studena, je nevyhnutné spracovať ich asi do štyroch týždňov, pretože po dlhšom skladovaní starnú, pričom sa zvyšuje medza klzu a znižuje ťažnosť. Pretože sa dlhším skladovaním vlastnosti neuspokojených ocelí menia, záväzné mechanické vlastnosti sa zisťujú u výrobcu. Pri vzorkách odobratých za 8 dní po tvárnení sa povoľuje zvýšenie medze klzu

o 10 MPa a zníženie ťažnosti o 1 %. S deformačným starnutím sa musí rátať aj pri niekoľkostupňovej redukcii za studena. Ocele uspokojené hliníkom majú menší sklon k starnutiu, ale jemnejšie zrno, takže majú vyššiu medzu klzu. Výhodné je, že hliník nezvyšuje medzu klzu feritu. Jeho obsah sa pohybuje medzi 0,02 až 0,05 %. Dusík možno viazať titánom alebo vanádom, ktoré tvoria nitrídy TiN a VN. nevýhodou uspokojených ocelí je horší povrch ingotu, a tým aj plechu. K zvlášť hlbokému ťahu sú určené plechy a pásy z ocelí značiek 11 300 a 11 305. Maximálny obsah uhlíka u ocelí M je 0,09 %, u ocelí K o 0,01 až 0,02 % nižší. K hlbokému ťahu sa používajú plechy a pásy zo značiek 11 320 a 11 325, ktoré majú maximálny obsah uhlíka 0,10 až 0,11 %. K miernemu ťahu (jednoduchšie lisované dielce) sú určené plechy a pásy so značiek 11 330 a 11 331, ktoré obsahujú 0,13, resp. 0,11 % uhlíka. U všetkých ocelí tejto skupiny je zaručená tavná zvárateľnosť plechov, pásov a pruhov, bodová a švová zvárateľnosť je dobrá. Prevažná časť plechov zo značiek 11 30+ a 11 32+ sa používa na výrobu jemných plechových obalov, hlavným odberateľom plechov a pásov zo značiek 11 33+ je automobilový priemysel (karosárske výlisky).

*Povrchovo upravené plechy* sú významným hutným polovýrobkom. Dôležitými plechmi povrchovo upravenými sú plechy na konzervárenské a iné plechové obaly, plechy pozinkované a plechy smaltované. Obalové plechy sa upravujú lakovaním (nanášanie špeciálnych „zlatolakov“, vyvinutých hlavne na báze epoxidových živíc, ktoré odolávajú účinkom zložiek potravín) a pocínovaním (cín dobre odoláva koróznym účinkom potravín, pričom nemá negatívny vplyv na ich zdravotnú nezávadnosť, chuť, vzhľad a pod.). Pozinkované plechy sú vysoko odolné proti atmosférickej korózii a nachádzajú uplatnenie predovšetkým ako krytina v stavebníctve. Vyrábajú sa tiež ako plechy vlnité. Pri smaltovaných plechoch sa odporúča dodržiavať toto chemické zloženie: max. 0,10 % C, max. 0,5 % Mn, max. 0,08 % P, max. 0,04 % S, max. 0,08 % Si, max. 0,1 % Cu, max. 0,2 % Ni, max. 0,2 % Cr, max.. 0,1 % Mo. Uhlík sa nesmie vylúčiť vo forme ostrovčekov cementitu na hraniciach zŕn, pretože v tejto podobe reaguje s oxidmi smaltu a tvoria sa bublinky. Ocele majú mať nízky obsah vodíka, ktorý spôsobuje tzv. rybie šupiny. Vyšší obsah kremíka znižuje difúznú rýchlosť vodíka, takže šupinatosť je častejšia aj pri neuspokojených oceliach. U nás sa používajú na smaltované plechy prevažne neuspokojené ocele akosti 11 301, 11 304, 11 321 alebo polouspokojená oceľ 11 373 [41]. Okrem už uvedených povrchových úprav sa u nás vyrábajú i plechy poolovené, ktoré sú určené na benzínové nádrže, plynomery, obklady

zariadení v chemickom priemysle a pod., polohliníkové a s povlakmi z plastov.

Ocele na rúrky sú uvedené v tab. 3.6. Podľa spôsobu výroby rozlišujeme bezšvové, pozdĺžne zvarané rúrky a rúrky so skrutkovicovým zvarom. Bezšvové rúrky sa dodávajú ako oceľové bezšvové, bezšvové presné, závitové, hrdlové, štvorhranné, profilové a rebrové. Vyrábajú sa väčšinou z ocelí triedy 11 (tab. 3.6).

Tab. 3.6

Chemické zloženie ocelí tr. 11 na rúrky

Trieda	Chemické zloženie (%)									Pozn.
	C max.	Mn	Si	P max.	S max.	Cr max.	Ni max.	Cu max.	Al kov min.	
11 320	0,11			0,045	0,045					2
11 343	0,17			0,050	0,050					2
11 353	0,18			0,050	0,050					1
11 373	0,22			0,050	0,050					2
11 378	0,16			0,045	0,045					2
11 431	0,20	max. 0,80	max. 0,35	0,035	0,030			0,030	0,020	2
11 449	0,15	max. 1,50	max. 0,40	0,035	0,035	0,30	0,20	0,01 až 0,05 Nb		1, 2
11 453	0,24			0,050	0,050					1
11 481	0,20	max. 1,30	max. 0,45	0,035	0,030				0,020	2
11 523	0,20	max. 1,50	max. 0,55	0,050	0,045				0,015	1,x
11 550	0,40			0,050	0,050					1
11 559	0,45			0,040	0,040					3
11 658	0,50			0,040	0,050					3
11 707	0,49			0,040	0,050					3

1 - bezšvové, 2 - zvarané, 3 - bezšvové rúrky na hlbinné vŕtanie a ťažbu nafty, x - pri obsahu mangánu do 1 % nesmie obsah chrómu prekročiť 0,60 %, pri obsahu mangánu nad 1 % nesmie prekročiť o 0,30 %

**Automatové ocele.** Sú určené pre hromadnú výrobu súčiastok na automatických obrábacích strojoch, pre ktorú nevyhovujú mäkkšie ocele pre svoju veľkú húževnatosť (prácu by sťažovali húževnaté triesky, ktoré tvoria dlhé špirály). Automatové ocele (tab. 3.7) sa vyznačujú ľahkou lámavosťou triesky pri dobrej obrábateľnosti (kvalitný povrch pri veľkej reznej rýchlosti). Naše automatové ocele majú vysoký obsah síry, ktorá zhoršuje húževnatosť ocele, a tým podporuje lámavosť triesky (obsah S až 0,25 %). Jej škodlivý vplyv musí byť eliminovaný zvýšeným obsahom mangánu (až 1,1 %). Obrábateľnosť ocelí závisí nielen od množstva sulfidov, ale aj od ich morfológie a veľkosti. Obrábateľnosť priaznivo ovplyvňujú sulfidy s priemerom väčším ako 10  $\mu\text{m}$ , najmä ak sú málo pretiahnuté v smere tvárnenia. Vhodný tvar sulfidov majú ocele tvárnené pri vyššej teplote; základná kovová matrica sa deformuje silnejšie ako sulfidy [42]. Automatové ocele majú nízky obsah kremíka, pretože  $\text{SiO}_2$  tvoriaci sa pri deoxidácii zhoršuje obrábateľnosť. V niektorých značkách ocelí je znížený až pod 0,01 %. Kremík zvyšuje tvárnosť sulfidov, a tým ich plastickú deformáciu v smere tvárnenia. S ohľadom na nízku húževnatosť sa používajú tieto ocele výlučne pre hromadnú výrobu drobných súčiastok, ktoré nie sú určené pre dynamické namáhanie.

V zahraničí sa vyrábajú ocele s prísadou 0,1-0,3 % olova. Olovo umožňuje ľahkú obrábateľnosť, nakoľko nie je v oceli rozpustné; je jemne rozptýlené a jeho častice spôsobujú lámavosť triesky. Síra, mangán, nikel a meď jeho rozpustnosť vo ferite zvyšujú, uhlík, chróm, kremík, cín a hliník ju znižujú [43]. Olovo je mäkké, takže znižuje opotrebovanie ostria. Výhodné je aj to, že sa medzi nástrojom a obrobkom vytvára jemný film. Ocele s prísadou olova možno obrábať rýchlosťou 100 až 115  $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ . Pri vysokých obrábacích rýchlostiach sa však už olovo vyparuje, čím sa jeho účinok znižuje. Pri tavení a odlievaní ocelí s prísadou olova treba rátať s jeho sklonom k odmiešavaniu a s vyparovaním pri prísade do taveniny. Aby sa znížilo množstvo jedovatých exhalácií pri pretavovaní odpadu, boli vyvinuté ocele obsahujúce 0,020 až 0,040 % S a 0,04 až 0,06 % Pb, ktoré sa deoxidujú silikokalcium. Obrábateľnosť ocelí možno zvýšiť aj prísadou selénu, telúru a bizmutu, ktoré sa v oceliach nerozpúšťajú. V praxi sa tieto prvky nepoužívajú pre ich toxický účinok.

Chemické zloženie vybraných automatových ocelí

Trieda	Chemické zloženie (%)				
	C	Mn	Si max.	P max.	S
11 109	max. 0,13	0,90 až 1,50		0,100	0,21 až 0,32
11 110	0,07 až 0,16	0,60 až 1,10	0,40	0,100	0,15 až 0,25
11 120	0,15 až 0,25	0,60 až 1,10	0,40	0,100	0,14 až 0,24

### 3.2 Zvárateľné ocele s vyššou medzou klzu

Oceľ je dobre zvárateľná vtedy, keď možno jednoducho a bez obmedzujúcich podmienok vyhotoviť zvarový spoj požadovaných vlastností. Zvárateľnosť vyjadrujeme podľa návrhu STN 05 1312 tromi skupinami ukazovateľov. K výpočtovým ukazovateľom zaradujeme uhlíkový ekvivalent a výpočty tvrdosti. Hlavným prvkom, ktorý ovplyvňuje zvárateľnosť ocele, je uhlík [46]. Vplyv ďalších prvkov na zvárateľnosť sa posudzuje podľa hodnoty *uhlíkového ekvivalentu*  $C_E$  [46]:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Co + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (3.1)$$

Kvalitné ocele s obsahom  $C \leq 0,20 \%$  a  $C_E \leq 0,45 \%$  s hrúbkou menšou ako 25 mm nevyžadujú pri zváraní použitie predhrevu. Druhú skupinu ukazovateľov zvárateľnosti tvorí náchylnosť ocele na jednotlivé typy praskania. Tretiu skupinu ukazovateľov reprezentujú ukazovatele vlastností zvarového spoja, ktoré súvisia so štruktúrnymi zmenami pri zváraní ocelí.

Na zvárané konštrukcie sa bežne používajú uhlíkové ocele (obr. 3.1) so zaručenou tavnou zvárateľnosťou, t. j. s nízkym obsahom uhlíka a nízkym uhlíkovým ekvivalentom uvedené v kap. 3.1. Z ich chemického zloženia vyplýva, že majú nízku medzu klzu, ktorá neprekračuje 300 MPa. Pevnosť ocele, a teda aj medzu klzu, možno zvýšiť rôznymi spôsobmi: substitučným spevnením (najmä Mn, Si, Mo), intersticiálne, precipitačne, dislokačne a zjemnením zŕn, pričom jediným neskrehujúcim mechanizmom spevnenia je zjemnenie zŕn [44].

Zvárateľné ocele s medzou klzu vyššou ako 350 MPa, pri ktorých sa využíva niektorý z uvedených spôsobov spevnenia, nazývame *ocеле so zvýšenou medzou klzu*.

Obr. 3.1. Mikroštruktúra ocele 11 523, lept. 1 % Nital, zv. 100 x

Ocele so zvýšenou medzou klzu môžeme rozdeliť do dvoch skupín podľa chemického zloženia na *ocеле mikrolegované* (obsahujú vo veľmi malých množstvách prísady ako Al, Ti, Nb, V ap.), a *ocеле nízkolegované* (obsahujú viaceré prísady v celkovom množstve okolo 3 %).

Mikrolegované ocele so zvýšenou medzou klzu. Mikrolegovaná oceľ je oceľ, v ktorej súhrnný obsah mikrolegúr nepresahuje 0,15 %, pričom v prípade jednotlivých mikrolegúr je maximálny obsah nasledovný: hliník - min. 0,015 %, titán - max. 0,1 %, niób - max. 0,04 %, vanád - max. 0,15 %, resp. 0,10 %. Mikrolegované ocele majú zvyčajne feriticko-perlitickú štruktúru, pričom samostatný typ predstavujú ocele s acikulárnym feritom.

*Feriticko-perlitické ocele* sú jemnozrnné ocele (obr. 3.2) s malou prísadou (max. 0,15 %) jedného prvku alebo kombinácie prvkov skupiny Al, Ti, Nb a V. Podstata účinkov mikrolegujúcich prvkov súvisí s ich afinitou k uhlíku a dusíku, rozpustnosti karbidov, nitridov a karbonitridov v austenite a schopnosťou precipitovať vo forme disperzných častíc v austenite a vo ferite a spôsobiť spevnenie rôznymi mechanizmami. Pevnosť jemnozrnej ocele bez mikroprísad je dosiahnutá spolupôsobením hraníc zrn (veľkosti zrna), substitučných prísad vo ferite (Mn, Si, Mo) a podielom perlitu v matrici.



V mikrolegovaných oceliach je zvýraznené spevnenie hranicami zŕn (zjemnenie zrna) a výrazne prispieva disperzné spevnenie intermediárnymi zlúčeninami (karbidmi, nitridmi a karbonitridmi) mikrolegúr [45].

Obr. 3.2. Mikroštruktúra mikrolegovanej ocele, lept. 1 % Nital, zv. 100 x

Pretože medzi veľkosťou primárnych (austenitických) a sekundárnych (feritických a perlitických) zŕn je priama súvislosť, cieľom je získanie jemného austenitického zrna. Pri výrobe valcovaných produktov (plechy, profily) je treba kontrolovať kinetiku rekryštalizácie (t. j. brzdiť jej začiatok), alebo kontrolovať etapu rastu zŕn. Jednoduchšie je kontrolovať etapu rastu zŕn tým, že počas valcovania v austenitickej oblasti (teploty 1000 - 1150 °C) dochádza v mikrolegovaných oceliach s hliníkom a titánom k deformačne indukovanej precipitácii nitridov hliníka  $AlN$ , alebo karbonitridov titánu  $Ti(C,N)$ . Tieto častice potom brzdia migráciu hraníc austenitických zŕn, a tým aj ich rast, takže zrná zostávajú jemné až do okamihu ďalšej redukcie prierezu a nakoniec aj po ukončení valcovania. Po ochladení vývalku je dosiahnutá jemnozrnná feriticko-perlitická mikroštruktúra. V druhom prípade prísada nióbu znižuje kinetiku rekryštalizácie a deformovaný austenit zostáva nerekrystalizovaný aj pri vstupe predvalku do ďalšieho valcového poradia. Výsledný austenit je tiež jemnozrnný, navyše počas chladnutia a premene  $\gamma \rightarrow \alpha$  dochádza k interfázovej precipitácii karbidov, resp. karbonitridov nióbu  $NbC$ , resp.  $Nb(C,N)$  a neskôr aj karbidov, resp. karbonitridov vanádu  $V(C,N)$ . Aby sme takýto efekt dosiahli, musíme kontrolovať parametre valcovania (teplotu

bramy, stupne úberu, rýchlosť valcovania, teplotu ukončenia valcovania) a takémuto valcovaniu hovoríme *riadené*, resp. *kontrolované valcovanie*.

Mikrolegujúce prvky sú v oceliach viazané na uhlík vo forme karbidov alebo karbonitridov (okrem Al, ktorý tvorí iba nitrid). V prípade hliníka je to hexagonálny nitrid AlN, v prípade titánu kubicky plošne centrovaný karbid titánu TiC alebo karbonitridy Ti(C,N) a nitridy TiN, v prípade vanádu rovnako karbid alebo karbonitrid  $V_4C_3$ , resp. VC a v prípade nióbu NbC, Nb(C,N). Kým nitridy hliníka a karbonitridy titánu vznikajú vo vysokoteplotnej oblasti (okolo 900 °C), teda v austenite, karbonitridy vanádu a nióbu môžu vznikáť žiňaním pri nižších teplotách (napr. VC pri 600-700 °C, NbC v dvojfázovej oblasti 750-780 °C), alebo počas premeny austenitu na ferit ako interfázový precipitát. To isté však platí aj o karbonitride titánu. Častice AlN môžu mať aj geometrické tvary, častice VC zasa tvary diskov [47]. Ak sa precipitáty vylučujú na dislokáciách počas deformácie ocele, sú vylúčené v radoch sledujúcich dislokačnú čiaru. Precipitáty majú tri základné priaznivé vplyvy:

1. Tým, že okrem uhlíka viažu aj intersticiárny dusík, robia oceľ nestarnúcou. Ale aj chemické viazanie uhlíka je z hľadiska zváratelnosti priaznivý faktor, pretože znižuje jeho obsah v tuhom roztoku, a teda aj hodnotu  $C_E$ .
2. Precipitáty zvyšujú pevnosť ocele mechanizmom disperzného spevnenia.
3. Prítomnosť precipitátov vhodnej veľkosti (do  $\approx 50$  nm) bráni migrácii hraníc zrn po rekryštalizácii a bráni tak rastu (zhrubnutiu) zrn.

Vplyv hlavných prísad je nasledujúci:

- Hliník má dezoxidačný účinok, pozitívny vplyv na stabilizáciu proti starnutiu a ako mikrolegúra sa využíva skôr v kombinácii (najčastejšie s Ti). V kombinácii s iným prvkom sa využíva aj prísada zirkónu. Sama o sebe nespôsobuje totiž zjemnenie zrna. Hlavným účinkom Zr je tvorba tvrdých netvárných sulfidov a globulizácia sulfidov mangánu.
- Niób sa v oceli zlučuje s C a N na karbonitridy. Pri voľnom ochladzovaní prebieha ich precipitácia, ktorú urýchľuje tvárnenie - plasticky indukovaná precipitácia. Tým sa docieli zjemnenie austenitického zrna brzdením rekryštalizácie a súčasne sa oceľ spevňuje disperzne. Vysoká teplota rozpúšťania karbonitridu nióbu (1300 °C) bráni rastu austenitického zrna pri ohreve na tvárniacu teplotu. Ďalšia precipitácia prebiehajúca vo ferite má okrem spevňujúceho účinku aj negatívny dôsledok - zvýšenie prechodovej teploty. Veľmi účinná je preto

kombinácia mikrolegovania Nb + V, nakoľko vanád (má tiež vysokú afinitu k C aj N, ale nebráni rekryštalizácii austenitu pri ohreve ako Nb) znižuje prechodovú teplotu zjemnením zrna feritu a znížením podielu perlitu účinkom väzby uhlíka na stabilné karbonitridy nerozpustné vo ferite. Optimálne množstvo Nb sa pohybuje medzi 0,02 až 0,06 %.

- Titán má vysokú afinitu ku kyslíku, preto musí byť oceľ pred pridaním ferotitánu najskôr dezoxidovaná. Titán viaže C a N na stabilné karbidy, nitridy či karbonitridy. Karbonitridy Ti sa rozpúšťajú v austenite pri 1100 °C. Pod touto teplotou spôsobujú výrazné disperzné spevnenie. Obsah Ti sa pohybuje najčastejšie okolo 0,08 %. Pri obsahu 0,02 % Ti sa tvorí predovšetkým TiN, ktorý zjemňuje zrno, ale vytvrdzovací účinok je slabý.
- Vanád ovplyvňuje vlastnosti podobne ako Ti a Nb, ale rozpustnosť vanádu v austenite je vyššia. Pri ochladzovaní na vzduchu precipituje v austenite najskôr nitrid vanádu VN, ktorý síce spomaľuje rast zrna, ale nemá vplyv na spevnenie feritu. Vanád výrazne zvyšuje medzu klzu až do obsahu 0,1 %. Malá časť vanádu sa substitučne rozpúšťa vo ferite a zvyšuje jeho pevnosť.

*Ocele s acikulárnym feritom* bývajú dovalcované pri nižšej teplote, pod teplotu  $A_{c3}$  ocele, a preto sa označujú ako termomechanicky valcované ocele. Vyššia hustota dislokácií, indukovaných do ocele v procese valcovania, zotrúva aj po transformácii. Takémuto valcovaniu hovoríme *termomechanické valcovanie*, alebo vysokoteplotné termomechanické spracovanie (pozri aj kap.3.5). Termomechanicky valcované mikrolegované ocele majú štruktúru acikulárneho feritu (ihlicovitého - názov acikulárny je podľa jeho pretiahnutej morfológie), ktorá je veľmi výhodná, pretože efektívne zrno je dostatočne jemné, vďaka vyššej hustote dislokácií je acikulárny ferit aj dostatočne pevný. Rýchlejšie chladnutie vývalkov po valcovaní priaznivo vplýva na vlastnosti plechu, a preto sa neskôr začalo používať zrýchlené chladnutie pomocou riadených vodných spŕch. Pri výrobe plechov alebo valcovaných profilov je možno aplikovať riadené valcovanie, vysokoteplotné termomechanické spracovanie a zrýchlené chladnutie.

Ocele s acikulárnym feritom obsahujú zvyčajne 0,06 % C, do 2 % Mn, 0,24 až 0,40 % Mo, 0,04 až 0,10 % Nb, max. 0,05 % Al. Prísady Mn a Mo posúvajú krivky začiatku rozpadu austenitu v diagrame ARA k nižším teplotám a dlhším časom, a preto podporujú vylučovanie acikulárneho feritu. Mikroprísada Nb má rovnaký význam ako pri predchádzajúcej

skupine ocelí (precipitačné spevnenie karbonitridmi). Dosahuje sa medza klzu 450 až 550 MPa, pri zachovaní dobrých plastických vlastností.

Prísada mikrolegujúcich prvkov je výhodná z hľadiska jemnozrnnosti ocele a viazania intersticiálneho dusíka [47], ale mikrolegúry, najmä však titán a niób, majú aj vyššiu afinitu k síre a môžu modifikovať fyzikálne vlastnosti sulfidov. V mikrolegovaných oceliach sa požaduje vysoká metalurgická čistota ocele s obsahom síry v tisícinách %. Ak nie je možné tak nízky obsah síry získať, potom sa odporúča kontrolovať tvar sulfidov tým, že sa vhodne legujú napr. zirkónom alebo prvkami vzácnych zemín (lantán, céry), stanú sa tak málo deformovateľnými a počas jednosmerného valcovania sa nedeformujú do tvaru tenkých plátok. Pokiaľ ide o vhodný typ mikroštruktúry, zdá sa, že štruktúra založená na acikulárnom ferite je už prekonaná a dáva sa prednosť extrémne jemnozrnej polyedrickej feritickej (feriticko-perlitickej) štruktúre.

*Nízkolegované ocele so zvýšenou medzou klzu.* Nízkolegované zväratel'ne ocele so zvýšenou medzou klzu (obvykle  $R_e > 500$  MPa) sú komplexne legované ocele, kde celkový obsah zliatinových prvkov (Mn, Cr, Ni, Mo, V, Ti, Nb) neprekračuje 4 %, obsah C < 0,2 % a prísada B je max. 0,005 % (stabilizuje austenit). Obsahujú v štruktúre bainit alebo popustený martenzit, príp. ferit. Podľa toho môžeme najdôležitejšie nízkolegované ocele so zvýšenou medzou klzu rozdeliť na *bainitické ocele* a *feriticko-martenzitické* (DPLA-double phase low alloy steels). Požadovanú štruktúru získame (pri vhodne volenom chemickom zložení) po riadenom ochladzovaní z dovalcovacích teplôt, alebo samostatným tepelným spracovaním.

*Bainitické ocele.* Bainitickú maticu v nízkouhlíkových oceliach možno získať pri ochladzovaní na vzduchu, ak sú komplexne legované mangánom, chrómom a molybdénom. Na zvýšenie medze klzu sa pridáva malé množstvo vanádu alebo nióbu. Ocele so štruktúrou horného bainitu majú  $R_e = 470$  MPa, v oceliach so štruktúrou dolného bainitu je možné dosiahnuť  $R_e$  až 700 MPa.

Bainitické zväratel'ne ocele [48] s vyššou medzou klzu majú obsah uhlíka maximálne 0,16 %, alebo maximálne 0,03 %. V oceliach s obsahom uhlíka nižším ako 0,02 až 0,03 % legovaných mangánom, molybdénom a bórom možno získať bainitickú maticu riadeným ochladzovaním z dovalcovacej teploty. Chemické zloženie niektorých vhodných ocelí je uvedené v tab.3.8. Niektoré ocele majú prísadu titánu, vanádu alebo nióbu, takže je možné vytvrdzovanie. Mechanické vlastnosti závisia od obsahu bainitu v matici. Plechy s úplne bainitickou maticou majú v prírodnom stave medzu klzu

$R_p$  0,2 medzi 540 až 600 MPa. Vytvrdzovaním pri riadenom ochladzovaní z dovalcovacej teploty ju možno zvýšiť až na 700 MPa.

Do skupiny zvärateľných ocelí s vyššou medzou klzu patrí aj oceľ s nízkym obsahom uhlíka a s vysokým obsahom mangánu so smerným zložením 0,045 % C; 0,40 % Si; 4 % Mn; 0,12 % V. Bainit sa tvorí v širokom pásme ochladzovacích rýchlostí (2 až 25 °C.s<sup>-1</sup>), takže mechanické vlastnosti len málo závisia od hrúbky vývalku. Húževnatosť možno zvýšiť popúšťaním nad teplotu  $A_{c1}$ , keď sa v matrici tvorí malé množstvo austenitu, ktorý pri nasledujúcom ochladzovaní netransformuje. Napr. po výdrži na teplote 680 °C boli v matrici asi 4 % austenitu. Po ochladení z teploty 900 °C a po popustení na teplote 600 °C počas 6,5 h mali plechy hrubé 45 mm medzu klzu 600 až 650 MPa, pevnosť 700 až 750 MPa, ťažnosť 20 až 25 %, KCU<sub>-50</sub> 30 až 40 J.cm<sup>-2</sup>.

Tab. 3.8

Chemické zloženie zvärateľných bainitických ocelí s nízkym obsahom uhlíka

Oceľ	Chemické zloženie (%)								
	C	Mn	Si	N	Al	Mo	Nb	B	Ti
2 MnMoNb	0,03	2,10	0,10	0,008	0,020	0,33	0,12		
2 MnMoNbB	0,02	2,47	0,17	0,005	0,013	0,33	0,12	0,003	
2 MnMoNbTiB	0,03	2,10	0,65	0,006	0,057	0,23	0,09	0,002	0,04

*Feriticko-martenzitické ocele* majú nízky obsah C max. 0,15 %. Obsah legujúcich prvkov (Mn, Si, Cr, V a Mo) sa volí tak, aby transformácia austenitu na martenzit prebehla pri ochladzovaní na vzduchu. Výhodná je najmä prísada Mo (zabraňuje vzniku perlitu), kedy ocele majú aj vyššiu ťažnosť. Obsah Mo nesmie byť veľmi vysoký, pretože sa zhoršujú plastické vlastnosti (zvýšená hustota Mo<sub>2</sub>C v matrici). Východiskovú matricu pred tepelným spracovaním má tvoriť jemný ferit s rovnomerne rozloženým perlitom. Pri tvárnení treba potlačiť riadkovitosť. Pretože ju spôsobuje hlavne mangán, znižuje sa jeho obsah pod 1,5 %.

Po tepelnom spracovaní tvorí základnú matricu ferit, v ktorom sú pravidelne rozložené drobné ostrovčeky martenzitu. Ak sa tvorí spojité sieťovie, prudko klesajú plastické vlastnosti. Dvojfázovú štruktúru možno získať kalením z teplôt medzi  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  alebo riadeným valcovaním. V prípade kalenia sa pri austenitizácii vytvoria vo feritickej matrici malé zrná

austenitu, ktorý pri nasledujúcom ochladzovaní transformuje na martenzit. Jeho obsah sa pohybuje medzi 5 až 30 %. Podľa metalografického prieskumu obsahuje každý ostrovček martenzitu asi 25 % zvyškového austenitu. Kalenie ocelí z teplôt medzi  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  je prevádzkovo náročné, pretože sa musí udržať úzke pásmo kaliacich teplôt. Preto je často výhodnejšie získavať feriticko-martenzitickú štruktúru riadeným valcovaním komplexne legovaných ocelí.

Ocele vyrobené riadeným valcovaním majú jemnejšie zrno, takže možno znížiť obsah martenzitu v matrici. Ak chceme získať napr. oceľ s pevnosťou 620 MPa, môže byť v štruktúre po riadenom valcovaní 8 až 12 % martenzitu, zatiaľ čo po kalení z teplôt  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$  musí byť v matrici 20 až 24 % martenzitu. V prvom prípade možno znížiť obsah uhlíka na 0,05 až 0,07 %, zatiaľ čo v druhom prípade musí byť obsah uhlíka 0,11 až 0,13 %. Tým sa ešte zlepšuje zvárateľnosť.

Ocele s feriticko-martenzitickou matricou majú vysokú pevnosť a výborné plastické vlastnosti, ale nízku medzu klzu. Pretože majú malý sklon k starnutiu a pri plastickej deformácii sa deformujú plynulo, sú vhodné na hlboké ťahanie. V zahraničnej literatúre sa označujú aj ako dvojfázové ocele DPLA (t. j. double phase low alloy steel). Chemické zloženie niektorých dvojfázových feriticko-martenzitických ocelí je uvedené v tab. 3.9. Tieto ocele majú vyššie plastické vlastnosti než nízkolegované ocele s rovnakou pevnosťou. Na deformačnej krivke pri skúške ťahom sa neobjavuje výrazná medza klzu (obr. 3.2), takže prechod z pružnej do plastickej deformácie prebieha spojit.

Tab. 3.9

Chemické zloženie feriticko-martenzitických ocelí (DPLA)

Chemické zloženie (%)								
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al	N	Nb
0,11	1,47	0,53		0,17		0,044		
0,10	1,57	0,51			0,058	0,042		
0,12	1,70	0,58			0,043	0,057	0,008	0,010
0,06	1,20	0,50	0,50					
0,10	1,50	1,55						
0,07	1,80	1,40						
0,10	1,00	1,20	0,50	0,15				

Používanie dvojfázových ocelí sa stále rozširuje, pretože majú vysoký koeficient deformačného spevnenia a vyššiu rovnomernú deformáciu za studena. Vyrábajú sa z nich nárazníky, časti podvozkov a pod.

Obr. 3.3. Ťahový diagram [37], 1 - nelegovaná oceľ, 2 - mikrolegovaná zvärateľná oceľ s vyššou medzou klzu, 3 - dvojfázová feriticko-martenzitická oceľ

Príklady zvärateľných ocelí s vyššou medzou klzu (min. 350 MPa) zaradených v STN sú uvedené v tab. 3.10 a príklady zvärateľných ocelí s vyššou medzou klzu vyrábaných vo VSŽ Košice sú uvedené v tab. 3.11 a základné mechanické vlastnosti týchto ocelí v tab. 3.12.

Základnú maticu ocele E 700 tvorí acikulárny ferit. Na tvárnenie za studena sú vhodné ocele s minimálnym obsahom perlitu (max. 0,10 % C) mikrolegované titánom. Medzi ocele s vyššou medzou klzu možno zaradiť aj oceľ KOHAL 36 E a KOHAL 42 E s medzou klzu minimálne 360 a 420 MPa, ktoré majú dobrú tvárnosť a znížený sklon k starnutiu. Ďalšiu skupinu ocelí tvoria ocele na skrutkovicovo zvarené rúry KX 52, 56, 60, 65, 70 s medzou klzu 360 až 480 MPa.

Tab. 3.10

## Zvárateľné ocele s vyššou medzou klzu

Oceľ		Chemické zloženie (%)									
		C	Mn max.	Si max.	Cr max.	Ni max.	Mo	V	Mikro- prísady	R <sub>e</sub> min. [MPa]	A <sub>5</sub> min. [%]
1	11 503.1	max. 0,2	1,4	0,4	0,3	0,3			Nb, Al	350	22
2	11 523.1	max. 0,2	1,5	0,55	0,3	0,3			Al	360	20
3	11 483.1	max. 0,2	1,2	0,55					Ti	380	22
4	Kodur 55	max. 0,2	1,5	0,5	0,3	0,3			Al, Ti	400	21
	Kodur 57	max. 0,2	1,6	0,5	0,3	0,3			Nb, V	430	20
	Kodur 60	max. 0,2	1,65	0,5	0,3	0,3			N	460	19
5	13 220.1	0,15-0,20	1,5	0,3				0,2	Nb, Al	440	17
6	15 223.9	0,12-0,17	1,4	0,3		0,25	0,4			400	16
7	15 228.6	0,12-0,17	1,4	0,3			0,4			500	15
8	15 422.5	0,14-0,19	1,5	0,3	1,5		0,5		B	550	18
9	15 227.6	0,12-0,17	1,2	0,3	0,7		0,6		Nb, B	600	15
	700									14	
10	15 224.6	0,12-0,17	0,8	0,2	0,7	0,9	0,4	0,1	B	700	15

Tab. 3.11

Chemické zloženie a mechanické vlastnosti zvárateľných ocelí s vyššou medzou klzu,  
VSŽ Košice

Značka	Chemické zloženie (%)										
	C max.	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	V max.	Nb max.	Al max.	Zr max.	Ti	Mo
E 390	0,12	1,2-1,6	0,50	0,035	0,030		0,05	0,015			
E 420	0,12	1,2-1,6	0,50	0,035	0,030		0,05	0,015			
E 460	0,12	1,2-1,6	0,50	0,035	0,030	0,08	0,06	0,015			
E 490	0,12	1,2-1,6	0,50	0,035	0,030	0,08	0,06	0,015			
E 700	0,12	1,2-1,6	0,50	0,035	0,030		0,10		0,15	0,16	0,50



Mechanické vlastnosti zvárateľných ocelí s vyššou medzou klzu, VSŽ Košice

Značka	Mechanické vlastnosti			
	R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	KCV <sub>-20</sub> [J.cm <sup>-2</sup> ]
E 390	390	490-650	20	40
E 420	420	520-680	19	40
E 460	460	550-720	17	40
E 490	490	580-750	17	40
E 700	700	790-960	15	40

### 3.3 Ocele so zvýšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii

Nelegované konštrukčné ocele pri použití na vonkajšie konštrukcie sú natierané ochrannými nátermi pre zvýšenie odolnosti proti atmosférickej korózii. Aby sa vonkajšie konštrukcie nemuseli natierať, boli vyvinuté nízkolegované ocele, ktorých zvláštnosťou je schopnosť vytvoriť na povrchu za pôsobenia atmosféry za dva až tri roky ochrannú tmavohnedú až fialovú vrstvičku hrdze (patinu), ktorá zbrzdí ďalší priebeh korózie. Tieto ocele, ktoré podľa spôsobu použitia patria medzi zvárateľné konštrukčné ocele a podľa chemického zloženia sú to nízkouhlíkové nízkolegované ocele, sú *oceli so zvýšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii*.

Korózia ocelí so zvýšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii prebieha najskôr rovnako rýchlo ako u nelegovaných ocelí, pretože sa povrchová vrstvička oxidov zmýva a olupuje. S týmto javom je potrebné počítať pri stavbách, pretože oplachová voda môže znečisťovať stavivo. Pod vrstvičkou patiny sa však vytvára postupne nová kompaktná vrstva, ktorá po odpadnutí povrchovej vrstvičky pevne prilne k oceľovému podkladu a ďalšiu koróziu veľmi spomaľuje.

Tvorba ochrannej vrstvičky závisí od chemického zloženia ocele a od vonkajších podmienok. Odolnosť proti atmosférickej korózii týchto ocelí predurčuje kombinácia prvkov meď - fosfor - chróm - nikel. Priaznivý vplyv

legujúcich prvkov súvisí s procesmi, ktoré prebiehajú na styčnej ploche konštrukcie a atmosféry:

- na povrchu ocele sa tvorí vrstvička sulfidov a fosfidov, ktorá má dobrú priľnavosť a malý počet pórov;
- zásadité sírany medi, chrómu a niklu sú nerozpustné a pevne viažu SO<sub>2</sub>;
- ušľachtilé prvky sa hromadia v povrchovej vrstvičke a čiastočne ju pasivujú.

Hlavný priaznivý vplyv sa pripisuje prísade medi. Prísada medi však neúčinkuje, keď sú ocele v zemi alebo vo vode. Nevýhodou je, že meď nerozpustená v matrici zhoršuje zvárateľnosť aj tvárnosť, preto sa často kombinuje prísada Cu s prísadou Ni. Koróznú odolnosť výrazne zvyšuje fosfor, najmä za prítomnosti medi. Zvýšený obsah P (0,06 až 0,07 %) má však nepriaznivý vplyv na húževnatosť zvarových spojov (väčšie hrúbky, náročnejšie zvárané konštrukcie). Vysokú odolnosť proti atmosférickej korózii a vyhovujúcu húževnatosť má komplexne legovaná oceľ, vyrábaná od r.1933 pod obchodnou značkou Cor-Ten A. Oceľ má zloženie 0,12 % C; 0,25 až 0,55 % Cu; 0,07 až 0,15 % P; 0,30 až 1,25 % Cr; 0,65 % Ni. Jej odolnosť proti atmosférickej korózii je 3 až 6-krát väčšia než odolnosť nelegovanej ocele. Plechy z týchto ocelí sa používajú napr. pri stavbe vagónov. Fosfor a meď je možné nahradiť prísadou 0,13 až 0,15 % arzénom, ktorý menej zhoršuje zvárateľnosť a húževnatosť pri záporných teplotách, ale znečisťuje vratný odpad. Koróznú rýchlosť znižuje tiež malé množstvo antimónu a bizmutu.

Chróm zvyšuje odolnosť proti atmosférickej korózii menej ako meď. Kladný vplyv Cr sa prejavuje pri súčasnej prísade Cu (Cu > 0,04 %). Nikel zvyšuje odolnosť proti atmosférickej korózii, spomaľuje koróziu v tropickej atmosfére a pri uložení do zeme. Výhodná je aj kombinácia Ni s asi 0,06 % P. Podľa skúšok sa znížil pri prísade 3 % Ni úbytok z 1300 g.m<sup>2</sup> na 385 g.m<sup>2</sup>. Nikel spomaľuje koróziu v tropických oblastiach a pri uložení konštrukcie v zemi. Pretože sa však zvyšuje cena ocele, nemusí byť legovanie niklom vždy ekonomické.

Prvky Cu, Cr, Ni zvyšujú hodnotu C<sub>E</sub>, ale ich nepriaznivý vplyv je kompenzovaný zníženým obsahom C max. 0,12 % (ocеле typu CuCrNiP) a max. 0,20 % (ocеле bez zvýšeného % P). Obsah uhlíku sa volí podľa požadovanej pevnosti a zvárateľnosti. Hľadiskom dobrej zvárateľnosti sú obmedzované ako obsahy prvkov priaznivých pre koróznú odolnosť, tak aj ďalších prvkov, ktoré majú vplyv na vhodnú kombináciu medze klzu

a húževnatosti. Sú to prvky ako Mn, Si a Mo. Väčšinou sa chemické zloženie volí tak, aby pri zvýšenej odolnosti proti korózii sa dosiahli zaručované vlastnosti odpovedajúce vlastnostiam príslušných zvarateľných konštrukčných ocelí. Prísada molybdénu sa prejavila priaznivo v anglických agresívnych atmosférach. Až do obsahu 0,07 % zostala rýchlosť korózie takmer rovnaká, pri obsahu 0,28 % sa však životnosť zvýšila o 20 %. Molybdén je drahý prvok, takže sa cena ocele neúmerne zvyšuje. Kremík nemá až do obsahu 0,2 % vplyv na odolnosť proti atmosférickej korózii. Pri vyššom obsahu ju mierne zvyšuje. Ocele s prísadou 0,25 % Si boli stálejšie v prímorskej a priemyselnej atmosfére.

Dôležitou prísadou u týchto ocelí sú prvky, ktoré zjemňujú zrno a umožňujú precipitačné spevňovanie - Al, Nb, Ti, V a Zr. Obsah mikrolegúr je max. do 0,1 až 0,15 % a ocele mikrolegované Nb majú obsah 0,04 až 0,06 % Nb. Väčšina nízkolegovaných ocelí so zvýšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii sa dodáva v stave prirodzenom alebo normalizačne žíhanom s feriticko-perlitickou maticou. U niektorých výrobkov sa dosahujú požadované kombinácie vlastností riadenými pochodmi valcovania. Výnimočne sa hutné výrobky zušľachtujú, kedy je štruktúra tvorená popusteným martenzitom.

Zvarateľné ocele so zvýšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii boli u nás vyvinuté pod obchodným označením ATMOFIX (tab. 3.13).

Tab. 3.13

Zvarateľné ocele so zvýšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii

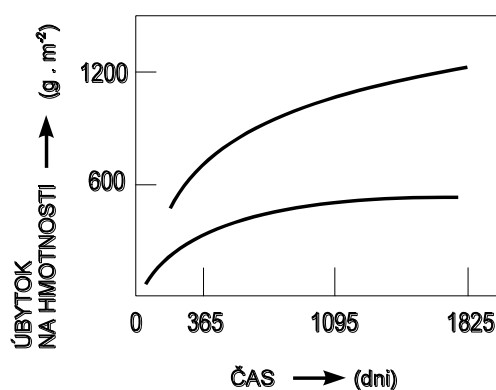
Označenie		Chemické zloženie (%)											Re [MPa]
podľa STN	obchodné	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Nb	V	Al	P max.	S max.	
15 117	ATMOFIX 37	0,10- 0,60	0,20- 0,55	0,10- 0,35	0,30- 0,60	0,20- 0,40	0,30- 0,50			0,02	0,045	0,040	min. 270
15 117	ATMOFIX 52B	0,10- 0,16	0,90- 1,10	0,20- 0,45	0,40- 0,80	0,30- 0,60	0,30- 0,50	0,02- 0,06	0,02- 0,06	0,01	0,040	0,040	340 až 360
15 217	ATMOFIX 52A	max. 0,12	0,30- 1,00	0,25- 0,75	0,50- 1,25	0,30- 0,60	0,30- 0,55			0,01	0,06- 0,15	0,040	340
15 327	ATMOFIX 60	max. 0,16	1,10- 1,50	0,20- 0,40	0,60- 1,00	0,30- 0,50	0,30- 0,50	0,03- 0,08		0,01	0,050	0,040	410 až 440

Oceľ ATMOFIX 37 má minimálnu medzu klzu 270 MPa, pevnosť v ťahu 380 MPa. Obsah uhlíka je nízky, takže je zaručená zvárateľnosť. Obsah medi sa volí tak, aby sa nevylučovala na hraniciach zŕn ani po troch hodinách výdrže na teplote 1250 °C [49]. Oceľ je upokojená hliníkom. Pretože nemá zvýšený obsah fosforu, možno ju tvárniť za studena a môžu sa zvärať aj hrubšie profily [50].

Na tvárnenie za studena a na zváranie hrubších profilov je vhodná oceľ ATMOFIX 52 B, ktorá má nižší obsah fosforu ako oceľ ATMOFIX 52 A. Pretože má naopak vyšší obsah uhlíka ako oceľ 15 217 a malú prísadu vanádu a nióbu, má vyššiu medzu klzu. Obsah mangánu sa preto zvolí tak, aby pri ochladzovaní z austenitizačnej teploty neprebehla ani čiastočná bainitická premena.

Z ocelí odolných atmosférickej korózii má najvyššiu pevnosť oceľ ATMOFIX 60 ( 15 327). Pri normalizačne žíhaných plechoch hrubých 4 až 16 mm sa zaručuje medza klzu 420 MPa, pri hrúbke plechu 25 až 50 mm ešte 370 MPa.

Do skupiny ocelí s pevnosťou okolo 520 MPa patrí oceľ ATMOFIX 52 A, ktorá má zvýšený obsah fosforu, takže nie je vhodná na výrobu profilov ohýbaných za studena, na súčiastky namáhané dynamicky a na zvárané konštrukcie, najmä ak sa nedá odstrániť napätie. Hrúbka plechov býva 12 až 16 mm. Priebeh korózie za pôsobenia vzdušnej atmosféry (Letňany) je viditeľný z obr. 3.4. Pre porovnanie je na tomto obrázku zakreslená tiež krivka udávajúca rýchlosť korózie nelegovanej ocele 0,01 % C; 0,02 % Cu; 0,05 % Ni). Z diagramu je vidieť, že korózia ocele ATMOFIX sa po piatich rokoch takmer zastavila, pretože sa vytvorila dostatočne silná ochranná vrstvička.



Obr. 3.4. Priebeh korózie u nelegovanej ocele (1) a u ocele 15 217 (2) [51]

Ocele so zvýšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii sa používajú na stožiare, vonkajšie priemyselné konštrukcie, žeriavové dráhy, spojovacie lávky, mosty, fasády budov, pútače a pod.

Ocele so zvýšenou odolnosťou proti atmosférickej korózii je možné používať bez ochranných náterov v dedinských, mestských a stredne agresívnych atmosférach. Vo veľmi znečistenom prostredí sa neosvedčili. Vo veľmi agresívnych prostrediach musia mať ocele ochranný náter. Konštrukcie s touto úpravou majú vyššiu životnosť ako pri použití náteru na nelegovaných oceliach. Rovnako sa používa ochranný náter napr. u konštrukcií umiestnených vo vnútri budov a pod. Podľa literárnych údajov je životnosť náterov na nízkolegovaných oceliach odolných proti atmosférickej korózii až trikrát vyššia. Tento jav súvisí s tým, že korózná vrstva na nízkolegovaných oceliach má menší objem, uľpieva na povrchu a je nepriedušná.

### 3.4 Ušľachtilé ocele uhlíkové a zliatinové

Ušľachtilé ocele majú výrobcom zaručené chemické zloženie a ich vlastnosti sú lepšie a rovnomernejšie ako pri oceliach zvyčajnej akosti. Vyplyva to z vyššej čistoty (danej výberom surovín a spôsobom výroby, dokonalejšou kontrolou), prípadne z prísad zliatinových prvkov. V porovnaní s ocelami zvyčajnej akosti sú drahšie a zväčša sú určené na zušľachtovanie alebo chemicko-teplné spracovanie. Spomedzi ušľachtilých konštrukčných ocelí zaoberá sa táto časť uhlíkovými a nízkolegovanými (t. j. triedy 12-16) ocelami na všeobecné použitie. Pretože sú tieto ocele určené na zušľachtovanie alebo chemicko-teplné spracovanie, je účelné ich rozdeliť podľa spôsobu spracovania na:

- ocele k zušľachtovaniu;
- ocele k povrchovému kaleniu;
- ocele k cementovaniu;
- ocele k nitrocementovaniu;
- ocele k nitridovaniu.

**Ocele k zušľachtovaniu.** Zušľachtovaním rozumieme cyklus tepelného spracovania, pozostávajúci z kalenia (na martenzit) a popúšťania na vysoké teploty (zvyčajne nad 400 °C), po ktorom je štruktúra ocele tvorená jemnou feriticko-karbidickou zmesou - sorbitom [4]. Cieľom postupu je dosiahnutie

vyšších pevnostných charakteristík pri relatívne vysokej húževnatosti. Kaliteľnosť ocele závisí od obsahu uhlíka a prísad (dolná hranica obsahu uhlíka sa pohybuje približne na 0,35 % pri uhlíkových a 0,25 % pri zliatinových oceliach), pričom prekaliteľnosť narastá s rastúcim obsahom uhlíka a vhodných prísad. Na druhej strane požiadavka vysokej húževnatosti vyžaduje čo najnižší obsah uhlíka. Z týchto protichodných požiadaviek potom vyplýva, že typické zušľachtiteľné ocele obsahujú stredný obsah uhlíka:

- 0,4 až 0,6 % (najčastejšie 0,5 až 0,6 %) pri uhlíkových oceliach;  
až 0,5 % (najčastejšie 0,4 až 0,5 %) pri nízkolegovaných zliatinových oceliach.

Tab. 3.14

Chemické zloženie vybraných ocelí k zušľachtovaniu

Značka	Chemické zloženie v %										
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr max.	Ni max.	Cu max.	V	B	Mo
12 040	0,32-0,40	0,50-0,80	0,17-0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30			
12 042	0,32-0,40	0,50-0,80	max. 0,35	0,040	0,040					0,001-0,005	
12 050	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30			
12 052	0,42-0,50	0,50-0,80	max. 0,35	0,040	0,040					0,001-0,005	
12 060	0,52-0,60	0,50-0,80	0,17-0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30			
12 061	0,57-0,65	0,50-0,80	0,17-0,37	0,040	0,040	0,25	0,30	0,30			
13 141	0,27-0,35	1,20-1,60	0,17-0,37	0,035	0,035						
13 142	0,36-0,44	1,00-1,30	0,14-0,40	0,030	0,035						
13 240	0,33-0,41	1,10-1,40	1,10-1,40	0,035	0,035						

## Chemické zloženie vybraných ocelí k zušľacht'ovaniu

Značka	Chemické zloženie v %										
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr max.	Ni max.	Cu max.	V	B	Mo
13 242	0,36- 0,46	1,50- 2,00	0,15- 0,40	0,035	0,035				0,07- 0,15		
13 151	0,42- 0,50	0,50- 0,80	1,30- 1,70	0,040	0,040						
14 140	0,35- 0,42	0,50- 0,80	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,80- 1,10					
14 230	0,28- 0,35	0,90- 1,20	max. 0,35	0,035	0,035	0,80- 1,10	max. 0,40			0,001- 0,005	
14 240	0,32- 0,40	1,50- 1,90	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,20- 0,40					
14 331	0,28- 0,35	0,80- 1,10	0,90- 1,20	0,035	0,035	0,80- 1,10					
14 341	0,34- 0,42	0,30- 0,60	1,00- 1,30	0,035	0,035	1,30- 1,60					
15 130	0,22- 0,29	0,50- 0,80	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,90- 1,20					0,15- 0,25
15 131	0,26- 0,34	0,40- 0,70	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,80- 1,10					0,15- 0,25
15 142	0,38- 0,45	0,50- 0,80	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,90- 1,30					0,15- 0,25
15 230	0,24- 0,34	0,40- 0,80	0,17- 0,37	0,035	0,035	2,20- 2,50			0,10- 0,20		
15 231	0,24- 0,30	1,00- 1,30	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,60- 0,90			0,10- 0,20		
15 240	0,30- 0,40	0,70- 1,00	0,17- 0,37	0,035	0,035	0,70- 1,10			0,10- 0,20		
15 241	0,35- 0,43	0,60- 0,80	0,17- 0,37	0,035	0,035	1,70- 2,00			0,10- 0,20		

## Chemické zloženie vybraných ocelí k zušľachtovaniu

Značka	Chemické zloženie v %										
	C	Mn	Si	P max.	S max.	Cr max.	Ni max.	Cu max.	V	B	Mo
15 243	0,32-0,42	0,50-0,80	0,15-0,40	0,040	0,040	1,60-2,00			0,10-0,20		
16 140	0,35-0,43	0,50-0,80	0,15-0,40	0,040	0,040	0,40-0,70	0,40-0,70				0,20-0,50
16 240	0,32-0,40	0,35-0,70	0,17-0,37	0,035	0,035	0,50-0,90	1,20-1,70				
16 250	0,40-0,50	0,35-0,70	0,17-0,37	0,035	0,035	0,50-0,90	1,20-1,70				
16 343	0,32-0,40	0,50-0,80	0,15-0,40	0,035	0,035	1,30-1,70	1,30-1,70				0,20-0,30
16 440	0,30-0,40	0,40-0,80	0,17-0,37	0,035	0,035	0,60-1,00	3,20-3,70				
16 540	0,30-0,40	0,50-0,80	0,15-0,40	0,035	0,035	0,70-1,10	2,75-3,25	0,25-0,40			
16 640	0,30-0,38	0,35-0,60	0,17-0,37	0,035	0,035	0,80-1,20	4,70-5,20				

Ako prísady sa v oceliach na zušľachtovanie používajú predovšetkým mangán, kremík, chróm, nikel, molybdén, vanád a bór. Vplyv jednotlivých prísad možno stručne charakterizovať takto:

*Mangán* sa v nezušľachtenej oceli nachádza predovšetkým rozpustený vo ferite a zvyšuje tvrdosť a pevnosť ocele, ale znižuje jej húževnatosť. Ovplyvňuje výrazne tepelné spracovanie ocelí. So zvyšujúcim sa obsahom mangánu sa spomaľuje transformácia austenitu v perlitickej aj bainitickej oblasti. Krivky v diagrame ARA a IRA sa posúvajú doprava, takže sa zvyšuje prekaliteľnosť. Súčasne sa začínajú obe oblasti oddeľovať, takže sa vytvára pásmo, v ktorom je austenit dlhšiu dobu stabilný. Odolnosť zakalených ocelí proti popúšťaniu mangán nezvyšuje. Pretože mangán aj uhlík znižujú teplotu  $M_s$ , zvyšuje sa v matrici ocelí s vyšším obsahom uhlíka po kalení obsah zvyškového austenitu. Mangánové ocele sú citlivé na



hrubnutie zrna, takže je potrebné dodržiavať pri tepelnom spracovaní austenitizačnú teplotu. U nízkoalegovaných ocelí sa objavuje vysokoteplotná popúšťacia krehkosť, ktorá znižuje vrubovú húževnatosť. Po skončení výdrže na teplote nad pásmom popúšťacej krehkosti sa súčiastky ochladzujú do vody. U väčších prierezov sa znižuje popúšťacia krehkosť prísadou 0,2 až 0,3 % Mo, pri obsahu mangánu nad 2,5 % však už molybdén popúšťaciu krehkosť neodstráni. Mangán je lacný a ľahko dostupný. U bežných konštrukčných ocelí sa používa až do obsahu 2 %.

*Kremík* sa pri oceliach k zušľachtovaniu zvyčajne kombinuje s prísadou mangánu alebo chrómu. Prekaliteľnosť ocelí zvyšuje menej než chróm a mangán. Pri popúšťaní posúva začiatok rozpadu martenzitu k vyšším teplotám. Napr. u ocele obsahujúcej 0,6 % C a 2 % Si zostáva zachovaný smer pôvodných martenzitických ihlíc až do teploty asi 500 °C. Tiež rozpad zvyškového austenitu prebieha pri vyšších teplotách než u nelegovaných ocelí. Pretože sa pri popúšťaní kremíkových ocelí vyvíja vysokoteplotná popúšťacia krehkosť, je potrebné popúšťať ich nad pásmom popúšťacej krehkosti a po výdrži na popúšťacej teplote rýchlo ochladiť.

*Chróm* je najčastejšou prísadou konštrukčných nízkoalegovaných ocelí na zušľachtovanie, pretože je relatívne lacný a ovplyvňuje mnoho vlastností. U nízkoalegovaných ocelí na zušľachtovanie sa obyčajne využíva vplyv chrómu na zvýšenie prekaliteľnosti. Krivky začiatku transformácie austenitu v diagramoch ARA a IRA sa posúvajú doprava. Zvýšenie prekaliteľnosti je však podmienené rozpúšťaním karbidov chrómu pri austenitizácii, pretože prekaliteľnosť zvyšuje len chróm rozpustený v austenite. Nerozpustené karbidy pôsobia ako kryštalizačné zárodky, ktoré prekaliteľnosť znižujú. S týmto javom je potrebné počítať pri stanovení kaliacej teploty, pretože karbidy chrómu sa rozpúšťajú až pri vyšších teplotách. Pri zvyšovaní obsahu chrómu sa postupne oddeľuje perlitická a bainitická oblasť. Pri obsahu asi 3,5 % Cr sa už vytvára pásmo teplôt, pri ktorých je austenit pri izotermickej výdrži stabilný dlhšiu dobu. Chróm zvyšuje teplotu  $A_{c1}$ , takže chrómové ocele sú odolnejšie proti popúšťaniu. Pri pomalom ochladzovaní z vyšších popúšťacích teplôt sa objavuje vysokoteplotná popúšťacia krehkosť. Po popúšťaní na teplote nad pásmom popúšťacej krehkosti je potrebné ochladzovať vo vode. Na výrobu väčších alebo zložitejších súčiastok sa preto používajú ocele s prísadou 0,2 až 0,3 % Mo.

*Nikel* podobne ako mangán zväčšuje stabilitu austenitu. Pretože má malú afinitu k uhlíku, sústreďuje sa pri perlitickej premene vo ferite. Znižuje transformačné teploty, zvyšuje prekaliteľnosť, zlepšuje tvárnosť

a húževnatosť ocelí pri nízkych teplotách, najmä v kalenom a nízko popustenom stave. Procesy pri popúšťaní nebrzdí. Jeho uplatnenie ako legúry limituje pomerne vysoká cena.

*Molybdén* patrí medzi stredne silné karbidotvorné prvky. Pri nízkom obsahu molybdénu sa tvorí podvojný cementit  $(Fe,Mo)_3C$ , v ktorom môžu byť rozpustené až 4 % Mo. V diagramoch ARA a IRA posúva molybdén krivky  $F_s$  a  $P_s$  doprava, bainitická oblasť však zostáva vysunutá doľava. Pretože sa súčasne posúva perlitická oblasť k vyšším teplotám a bainitická oblasť k nižším teplotám, tvorí sa medzi nimi pásmo, v ktorom je austenit po dlhú dobu stabilný. Molybdén znižuje začiatok a koniec martenzitickej transformácie. Po zakalení zvyšuje stabilitu martenzitu, t. j. posúva jeho rozpad k vyšším popúšťacím teplotám. Tento vplyv je možné využiť napr. u zakalených ocelí, pokiaľ je treba žihať na zníženie napätia pri vyšších teplotách. U zušľachtených ocelí znižuje prísada 0,2 až 0,3 % Mo vysokoteplotnú popúšťaciu krehkosť. U nízkolegovaných chrómniklových ocelí sa považuje za optimálnu prísada 0,3 % Mo. Tento jeho vplyv sa využíva najmä u súčiastok s väčšou hrúbkou steny. Molybdén je drahý prvok. Má sa preto používať len v prípadoch, kedy ho nie je možné nahradiť lacnejším prvkom.

*Vanád* pôsobí pozitívne na zjemnenie zrna. Vplyv vanádu na mechanické vlastnosti závisí vo veľkej miere od kaliacej teploty, t. j. od stupňa rozpúšťania vanádu v austenite. Pokiaľ sa kalia oceľ s prísadou vanádu z normálnej teploty, získavajú sa menšie tvrdosti, pretože časť uhlíka zostáva viazaná ako karbid  $V_4C_3$ . Prísada vanádu sa zvyčajne kombinuje s inými legujúcimi prvkami. V oceliach na zušľachtovanie býva obsah vanádu asi 0,1 %.

*Bór* predlžuje začiatok austenitickej transformácie, a preto sa zvyšuje prekaliteľnosť. Tento vplyv bóru sa využíva u niektorých ocelí na zušľachtovanie, predovšetkým uhlíkových.

Chemické zloženie vybraných ocelí k zušľachtovaniu je uvedené v tab. 3.14. Charakteristické vlastnosti niektorých ocelí uvádza tab. 3.15.

*Ocele triedy 12* (uhlíkové) majú po zušľachtovaní v malých prierezoch veľmi dobré vlastnosti. Tento priaznivý jav sa s rastúcim prierezom súčiastok postupne stráca. Ide o najlacnejšie a najviac používané ocele k zušľachtovaniu. V súčasnej praxi sa používajú predovšetkým ocele 12 050, 12 060, 12 061. Prekaliteľnosť uhlíkových ocelí zvyšuje malá prísada bóru (do 0,005 %) u ocelí 12 042 a 12052.

Charakteristické vlastnosti vybraných ocelí k zušľachtovaniu [37]

Značka ocele	R <sub>m</sub> (MPa)	KCU (J.cm <sup>-2</sup> )	Maximálna prekaliteľnosť (priemer; vo vode)
12 050	700	100	40 mm
12 060	770	60	40 mm
13 141	770	100	40 mm
13 240	900	100	50 mm
14 240	870	150	50 mm
14 331	1 100	50	40 mm
15 231	1 000	80	50 mm
15 241	1 200	60	60 mm
16 240	870	150	70 mm
16 250	1 000	170	120 mm
16 640	1 800	50	150 mm

*Ocele triedy 13* (legované Mn, Mn-Si, Mn-V) majú v porovnaní s uhlíkovými ocelami s rovnakým obsahom uhlíka vyššiu pevnosť v normalizovanom aj v zušľachtenom stave vplyvom prísady Mn, Si, resp. obidvoch prvkov. Legujúce prvky priaznivo ovplyvňujú prekaliteľnosť týchto ocelí, preto súčiastky do hrúbky asi 20 mm možno kaliť do oleja. So stúpajúcim obsahom mangánu sa zvyšuje prekaliteľnosť, pričom však treba rátať s ťažkosťami, ktoré spôsobuje odmiešanie. Mangánové ocele majú sklon k rastu zrna pri austenitizácii. Aby sa tento nepríjemný jav zmiernil, legujú sa malým množstvom vanádu (13 242). Obsah kremíka v tvárnených konštrukčných oceliach na zušľachtovanie nebýva vyšší ako 1,8 %, pretože už pri jeho vyššom obsahu sa príliš znižujú plastické vlastnosti. Oceľ 13 240 je mangánovo-kremíková so stredným obsahom uhlíka. Ak sa zušľachtuje na pevnosť vyššiu ako 1 100 MPa, potom je výhodnejšie kaliť ju izotermicky, pretože sa získava vyššia húževnatosť ako pri zušľachtovaní na rovnakú pevnosť. Pri pevnosti 900 až 1 000 MPa alebo 1 300 až 1 400 MPa nahradzuje drahšie chrómovo-vanádové ocele 15 241 a 15 230.

*Ocele triedy 14* (legované Cr, Cr-Mn, Cr-Si, Cr-Mn-Si) vplyvom prísady Cr majú výhodnejšie mechanické vlastnosti, najmä po zušľachtení. Chróm

významne zvyšuje prekaliteľnosť, takže súčiastky do 30 mm možno kalit' do oleja. Pretože chróm brzdí vývoj popúšťacích procesov a spomaľuje pokles tvrdosti pri popúšťaní, bežné popúšťacie teploty sú dosť vysoké (550 až 600 °C). Nízkoalegované chrómové ocele na zušľachtovanie sa často legujú mangánom a kremíkom. Chrómovo-mangánové ocele majú vysokú prekaliteľnosť a dobrú húževnatosť, takže v mnohých prípadoch môžu nahradiť drahšie, chrómniklové ocele. Ich nevýhodou je, že rýchlejšie strácajú húževnatosť pri záporných teplotách. Zaráďujeme sem aj ocel' akosti 14 240. Medzi chrómovo-kremíkové ocele patrí ocel' akosti 14 341. Vyšší obsah kremíka posúva pásmo nízkoteplotnej popúšťacej krehkosti k vyšším teplotám, takže možno popúšťať po zakalení aj pri nízkych teplotách, kedy si ocel' zachováva vysokú pevnosť. Kombináciou chrómu, mangánu a kremíka sa získavajú nízkoalegované konštrukčné ocele, ktoré možno zušľachtit' na pevnosť 1 100 až 1 800 MPa, takže niektoré sa dajú zaradiť do skupiny ocelí s vysokou pevnosťou. Obsah uhlíka sa spravidla pohybuje okolo 0,30 %, aby ocele mali dostatočnú húževnatosť (akosť 14 331). Ak sa obsah uhlíka zníži pod 0,25 %, možno kalit' súčiastky do vody bez vzniku prasklín.

*Ocele triedy 15* (legované Cr-V, Cr-Mo) sú veľmi akostné konštrukčné materiály, vhodné na vysokonamáhané súčiastky lietadiel a vozidiel, na výkovky rotorov a pod. Malá prísada vanádu (0,2 %) pôsobí veľmi priaznivo na zjemnenie štruktúry a zníženie náchylnosti ocele na prehriatie. Chrómvanádové ocele (15 230, 15 241, 15 143) preto nevyžadujú takú starostlivosť pri tepelnom spracovaní ako ocele triedy 14. Ocele triedy 15 sa preto obyčajne kalia do oleja. Chrómvanádové ocele majú strednú pevnosť, ale dobrú húževnatosť a ťažnosť. Prísada Mo (15 130, 15 131, 15 142) pôsobí podobne ako prísada vanádu, navyše ocele s Mo sú odolné proti popúšťacej krehkosti. Ich použitie však treba so zreteľom na deficitnosť Mo dobre uvážiť.

*Ocele triedy 16* (legované Ni-Cr, Ni-Cr-Mo) obsahujú vždy okrem Ni aj Cr. Majú najvýhodnejšiu kombináciu vlastností pri prísade týchto prvkov v pomere Ni:Cr = 3:1. Nikel a chróm zvyšujú prekaliteľnosť, takže ocele triedy 16 sa kalia do oleja a pri vyšších obsahoch prísad sú dokonca samokaliteľné. Ocele triedy 16 sú najakostnejšie ocele na zušľachtovanie. Vzhľadom na deficitnosť niklu ich možno použiť iba vtedy, keď ich voľba je skutočne nevyhnutná, napr. na výrobu súčiastok s najväčším namáhaním, ktoré sú rozhodujúce pre spoľahlivosť chodu celého stroja. Úsporne legované nikelchrómové ocele (16 240, 16 250) majú strednú pevnosť, ale vysokú

plasticitu a húževnatosť. So zvyšovaním obsahu niklu (ocele 16 440, 16 640) sa zvyšuje prekaliteľnosť a u zušľachtených súčiastok sa dosahuje veľmi vysoké hodnoty pevnosti v ťahu. Prísadou ďalších legujúcich prvkov, najmä Mo, možno ďalej zlepšovať vlastnosti týchto ocelí. Ocele Ni-Cr-Mo (16 140, 16 343, 16 540) sú vhodné pre súčiastky s veľkou hrúbkou steny.

S určitým poklesom húževnatosti po popúšťaní treba rátať, pretože popúšťacia krehkosť sa celkom odstráni, až keď sa zníži obsah fosforu pod 0,003 %. Sklon k popúšťacej krehkosti sa znižuje s klesajúcim obsahom niklu. Pretože však súčasne klesá prekaliteľnosť, treba v oceliach s nižším obsahom niklu zvýšiť obsah molybdénu.

**Ocele na povrchové kalenie** musia byť kaliteľné a málo náchylné na prehriatie. Používajú sa preto vybrané typy ocelí na zušľachtovanie (chemické zloženie pozri v tab.3.14 - ocele odporúčané na povrchové kalenie z uvedených sú 12 050, 12 060, 12 061, 14 140, 14 341, 15 142, 15 230, 15 241, 16 440).

*Uhlíkové zušľachtiteľné ocele* sú najpoužívanejšou skupinou ocelí na povrchové kalenie. Obsah uhlíka sa pohybuje podľa požadovanej tvrdosti povrchovej vrstvy a pevnosti jadra obvykle medzi 0,3 až 0,5 %. U jednoduchých nekomplikovaných súčastí je možné ho zvýšiť až na 0,6 %. U zložitejších súčiastok alebo u ocelí na odliatky sa už objavujú drobné prasklinky. Tiež u ocelí kalených indukčne môže byť obsah uhlíka trochu vyšší. Pred kalením sa používané ocele normalizačne žihajú alebo zušľachtujú. Používané ocele majú byť ukludnené hliníkom, aby sa znížil sklon k rastu zrna. Z tvárnených uhlíkových ocelí je vhodná na povrchové kalenie oceľ 12 050, pokiaľ sa požaduje vyššia tvrdosť povrchu, používa sa oceľ 12 061. Hĺbka zakalenej vrstvy u uhlíkových ocelí sa pohybuje v rozpätí 1 až 3 mm.

*Zliatinové zušľachtiteľné ocele* sa používajú na povrchové kalenie v osobitných prípadoch (iba pre vysokofrekvenčné kalenie), najmä vtedy, ak sa požaduje väčšia hrúbka zakalenej vrstvy než je možné dosiahnuť pri uhlíkových oceliach. Ocele tr.13 sa na povrchové kalenie zásadne nepoužívajú, pre ich náchylnosť k rastu zrna pri ohreve. Uvedené ocele tr.14-16 sa používajú hlavne na povrchovo kalené ozubené kolesá.

**Cementačné ocele** charakterizuje obsah uhlíka do 0,25 %. Ich voľba na daný účel závisí od požadovanej kombinácie vlastností povrchu a jadra súčiastky. V zásade v troch prípadoch sa používajú zliatinové ocele: 1. ak sú vyššie požiadavky na pevnosť jadra súčiastky (na dimenzovanie súčiastky

Tab. 3.16

## Chemické zloženie ocelí na cementovanie

Značka	Obsah v %								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ti	iné	P max.	S max.
12 010	0,07- 0,14	0,35- 0,65	0,17- 0,37	max. 0,15				0,040	0,040
12 020	0,13- 0,20	0,60- 0,90	0,17- 0,37	max. 0,25	max. 0,30			0,040	0,040
12 023	0,12- 0,19	0,35- 0,65	0,17- 0,37	max. 0,30	max. 0,30			0,040	0,040
12 024	0,17- 0,24	0,35- 0,65	0,17- 0,37	max. 0,25	max. 0,30			0,040	0,040
14 120	0,12- 0,18	0,40- 0,70	0,17- 0,37	0,70-1,00				0,035	0,035
14 220	0,14- 0,19	1,10- 1,40	0,17- 0,37	0,80-1,10				0,035	0,035
14 221	0,17- 0,22	1,00- 1,30	0,17- 0,37	1,00-1,30				0,035	0,035
14 223	0,17- 0,23	0,80- 1,10	0,17- 0,37	1,00-1,30		0,04- 0,10		0,035	0,035
14 224	0,17- 0,24	1,10- 1,24	0,17- 0,37				B 0,001- 0,005	0,035	0,035
14 231	0,23- 0,29	0,80- 1,10	0,17- 0,37	1,00-1,30	0,04- 0,10			0,035	0,035
16 121	0,14- 0,19	0,70- 1,00	0,17- 0,37	0,80-1,10	0,40- 0,70			0,035	0,035
16 220	0,14- 0,19	0,70- 1,00	0,17- 0,37	0,80-1,10	1,30- 1,60			0,035	0,035
16 231	0,19- 0,24	0,70- 1,00	0,17- 0,37	0,80-1,10	1,30- 1,60			0,035	0,035
16 420	0,10- 0,17	0,30- 0,60	0,17- 0,37	0,60-0,90	3,20- 3,70			0,035	0,035
16 520	0,10- 0,17	0,30- 0,60	0,15- 0,35	0,90-1,30	3,90- 4,70			0,040	0,035
16 720	0,14- 0,21	0,25- 0,55	0,17- 0,37	1,35-1,65	4,00- 4,50		W 0,80- 1,20	0,035	0,035

podľa výpočtu pevnosti sú rozhodujúce mechanické vlastnosti jadra); 2. ak prichádzajú do úvahy väčšie špecifické tlaky na vrstvu (treba uvažovať s dostatočnou pevnosťou jadra, aby sa vrstva neprelamovala); 3. ak sú väčšie požiadavky na tvrdosť povrchovej vrstvy než možno dosiahnuť u uhlíkových ocelí. Prehľad cementačných ocelí podáva tab.3.16. Charakteristické vlastnosti najpoužívanejších cementačných ocelí sú v tab. 3.17.

Tab. 3.17

Charakteristické vlastnosti vybraných ocelí na cementovanie

Značka ocele	Vlastnosti jadra		Tvrdosť vrstvy
	R <sub>m</sub> , MPa	KCU, Jcm <sup>-2</sup>	
12 020	600	100	62 HRC
14 220	1 000	50	63 HRC
16 220	1 000	60	62 HRC
16 520	1 300	40	60 HRC

*Uhlíkové ocele na cementovanie* sú vhodné na málo namáhané strojové súčiastky jednoduchého tvaru s menšou pevnosťou jadra. Po cementovaní má povrch síce vysokú tvrdosť (asi 62 HRC), ale vlastnosti jadra sa prakticky neodlišujú od normalizačne žíhaného stavu východiskového materiálu. Tieto ocele sa po nauhličené kalia do vody, a to je nebezpečné z hľadiska veľkých vnútorných napätí, ktoré pri tvarovo zložitejších súčiastkach môžu spôsobiť trhliny. Ocele triedy 12 nie sú preto vhodné ani na tvarovo zložité súčiastky, ani na súčiastky väčších rozmerov (malá prekaliteľnosť). Ich prednosťou je zaručená zvárateľnosť.

*Zliatinové ocele na cementovanie* sú legované Cr, Mn, Ni, Mo alebo Ti. U nás sa používajú v podstate len dve skupiny legovaných ocelí:

- chrómmangánové cementačné ocele (predovšetkým 14 220) a chrómmangánové cementačné ocele s prísadou titánu (predovšetkým 14 223),
- chrómniklové cementačné ocele (predovšetkým 16 220 a 16 520).

Chróm a mangán znižujú kritickú rýchlosť ochladzovania, a preto možno u CrMn-ocelí dosiahnuť tvrdú martenzitickú vrstvu aj kalením do oleja. Chróm zvyšuje pevnosť ocele, urýchľuje reakcie prebiehajúce na povrchu súčiastok, spomaľuje však difúziu uhlíka od povrchu do stredu, takže sa ľahko tvorí nadeutektoidná vrstva. Po zakalení v nej zostávajú nerozpustené

karbidy, ktoré zvyšujú odolnosť proti opotrebeniu. Chrómmangánové ocele majú dobré mechanické vlastnosti. Pretože sú okrem toho oba prvky lacné, nahradzujú tieto ocele v mnohých prípadoch drahšie chrómnikové ocele. Obsah mangánu v cementačných oceliach sa pohybuje od 0,8 do 1,4 %, obsah chrómu od 0,7 do 1,3 %. Pri vyššom obsahu mangánu sa už príliš znižujú transformačné teploty, takže sa predlžujú cementačné doby. Ocele tejto skupiny majú väčší sklon k rastu zrna. Na cementovanie sa často používa oceľ značky 14 220. Jej nevýhodou je vysoký rozptyl pevnosti po tepelnom spracovaní (800 až 1450 MPa), pretože má široké pásmo prekaliteľnosti. Aby sa tento rozptyl znížil, doporučuje sa zúžiť hranice chemického zloženia a zaručiť veľkosť zrna. K nedostatkom CrMn-oceli môžeme počítať ich nižšiu húževnatosť, ťažnosť a náchylnosť na prehriatie (vyžaduje presné dodržiavanie technologických postupov a zložitejšie tepelné spracovanie po cementovaní). Sú vhodné na cementovanie súčiastky s veľmi tvrdou cementačnou vrstvou a vysokou pevnosťou v jadre, ak nie sú vysoké nároky na húževnatosť.

Aby bolo možné cementovať pri vyšších teplotách a po cementovaní kalit' z cementačných teplôt, boli vyvinuté ocele s prísadou titánu (14 223). Titán tvorí s uhlíkom stabilný karbid, ktorý sa rozpúšťa v auzenite až pri vysokých teplotách, takže bráni rastu zrna. Ocele s titánom majú vyšší obsah uhlíka, pretože sa jeho časť viaže ako karbid.

Chrómnikové ocele na cementovanie sú podobne ako CrNi-occele na zušľachtovanie najakostnejším materiálom svojej kategórie, ale ich uplatnenie obmedzuje vysoká cena niklu. Chrómnikové ocele používané u nás je možné rozdeliť do dvoch skupín. Ocele prvej skupiny obsahujú asi 1,5 % niklu a 1 % chrómu. U ocelí druhej skupiny bol zvýšený obsah niklu na 3 až 5 %, obsah chrómu zostal rovnaký. Ocele so zvýšeným obsahom niklu majú vysokú pevnosť jadra, takže sú vhodné na ozubené kolesá so slabšími zubami, na ktorých nesmie byť silná cementovaná vrstva. Je však potrebné počítať s menšou tvrdosťou povrchu, pretože v matici zostáva relatívne vyšší obsah zvyškového auzenitu. Aby zostal jeho obsah prijateľný, doporučuje sa kalit' po cementovaní z teploty 800 °C, kedy je rozpustnosť uhlíka v auzenite ešte malá. Chrómnikové cementačné ocele nie sú náchylné na prehriatie.



Chemické zloženie ocelí na nitridovanie

Značka	Chemické zloženie v %								
	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	Al	P max.	S max.
14 340	0,28- 0,38	0,50- 0,90	0,17- 0,37	1,30- 1,90			0,90- 1,30	0,035	0,035
15 330	0,24- 0,34	0,40- 0,80	0,17- 0,37	2,30- 2,70	0,20- 0,30	0,15- 0,30		0,035	0,035
15 340	0,35- 0,42	0,30- 0,60	0,17- 0,37	1,35- 1,65	0,15- 0,25		0,70- 1,10	0,035	0,035

**Nitridačné ocele** musia byť kaliteľné (obsahujú 0,3 až 0,4 % C a na zvýšenie prekaliteľnosti prísadu Cr) a obsahovať prvky, ktoré tvoria tvrdé nitridy (Al, Mo, V). Pred nasycovaním povrchu dusíkom sa súčiastky zušľachtujú (popustenie pri teplote o 30-50°C vyššej ako nitridačná teplota). Sorbitická štruktúra jadra zabezpečuje dostatočnú tuhosť jadra pod tenkou, veľmi tvrdou a krehkou nitridačnou vrstvou. Obsah uhlíka nemá byť vyšší ako cca 0,4 %, pretože so zvyšujúcim sa obsahom uhlíka sa znižuje hrúbka nitridačnej vrstvy. Chróm zvyšuje prekaliteľnosť a tvorí nitridy, ktoré však zvyšujú tvrdosť menej než nitridy hliníka. V nitridačných oceliach bez hliníka sa preto zvyšuje obsah chrómu asi na 2,5 %. Hliník tvorí nitrid AlN, ktorý je veľmi jemne rozptýlený vo ferite. Nitridačné ocele legované hliníkom majú preto maximálnu tvrdosť. Vanád tvorí tiež jemný nitrid VN, ktorý podstatne zvyšuje tvrdosť povrchovej vrstvičky. Pretože sa ocele nitridujú za teploty, kedy sa vyvíja vysokoteplotná popúšťacia krehkosť, majú niektoré nitridačné ocele prísadu molybdénu. U ocelí bez molybdénu je potrebné počítať s poklesom vrubovej húževnatosti. Pri voľbe ocele je potrebné vziať do úvahy nielen schopnosť legujúcich prvkov tvoriť nitridy, ale tiež ich príbuznosť k uhlíku. Pokiaľ sa rozpúšťajú pri popúšťaní v cementite alebo tvoria špeciálne karbidy, znižuje sa obsah nitridov, a tým aj tvrdosť povrchu.

U nás sa používajú tri nitridačné ocele uvedené v tab. 3.18. Ocele obsahujúce cca 1 % Al, t. j. 14 340 (Cr-Al) a 15 340 (Cr-Al-Mo) majú v dôsledku vylúčenia nitridov AlN tvrdosť nitridačnej vrstvy až 1300 HV, oceľ 15 330 (Cr-Mo-V), obsahujúca ako nitridotvorný prvok vanád, dosahuje tvrdosť nitridačnej vrstvy do 1100 HV. Všetky uvedené nitridačné ocele spĺňajú

požiadavky na ocele k zušľachtovaniu a niekedy sa k tomuto účelu aj využívajú (najmä 15 330).

### 3.5 Ocele s vysokou pevnosťou

Základný význam využívania konštrukčných materiálov s vysokou pevnosťou spočíva v znižovaní nosných prierezov namáhaných súčastí a znižovaní celkovej hmotnosti strojov a konštrukcií. Znižovanie nosných prierezov je však obvykle limitované požiadavkou dostatočnej tuhosti telies. Základnými charakteristikami pre posúdenie materiálov s vysokou pevnosťou preto nemôžu byť len absolútne hodnoty  $R_m$  alebo  $R_{p0,2}$ , ale ako základné kritérium sa používa hodnota pomeru  $R_{p0,2}/E$ , v ktorom je na tuhosť telesa braný ohľad. Materiály s hodnotou  $R_{p0,2}/E > 1/150$  sa považujú za materiály s vysokou pevnosťou, často tiež nazývané superpevné materiály. Pre najnáročnejšie cyklicky namáhané strojné súčasti, u ktorých sa významne prejavuje aj zaťažovanie odstredivými a zotrvačnými silami, sa ako ďalšie kritérium hodnotenia materiálu uvažuje hodnota pomeru  $R_{p0,2}/\rho$  ( $\rho$  - hustota). Maximálna hodnota tohoto pomeru je dôležitou materiálovou požiadavkou aj tam, kde sa požaduje čo najnižšia hmotnosť konštrukcie (lietadlá a pod.).

Tab. 3.19

Porovnanie vlastností vybraných materiálov s vysokou pevnosťou podľa zložených ukazovateľov

Materiál	$R_m$ [MPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_{p0,2}/E$	$R_{p0,2}/\rho$
STN 41 6341	1800	1450	1/145	0,19
98Ni300grade	1990	1960	1/95	0,24
TiAl5CrFeMo	1500	1400	1/58	0,30

V tab.3.19 sú príklady superpevných materiálov. Uvedená oceľ 16 341 predstavuje hraničné možnosti konvenčne spracovaných ocelí, preto pre moderné superpevné ocele sa využívajú iné spôsoby ovplyvňovania štruktúry, predovšetkým termomechanické spracovanie, vytvrdzovanie martenzitickej matrice (ocelie maraging) a deformačne indukovaná martenzitická premena. Ako príklad takéhoto materiálu je uvedená jedna z ocelí maraging. Z tabuľky je ďalej zrejmé, že kritérium superpevných

materiálov spĺňajú aj niektoré zliatiny nezelezných kovov, predovšetkým zliatiny titánu. Oblasť mechanických vlastností superpevných ocelí znázorňuje obr. 3.5.

Obr. 3.5. Mechanické charakteristiky superpevných ocelí

**Nízkoлегované zušľachtiteľné ocele s vysokou pevnosťou.** Kritériá pre vysokopevné materiály spĺňajú niektoré špičkové konvenčné ocele. Obsah uhlíka sa pohybuje medzi 0,25 až 0,50 %, najčastejšie okolo 0,30 %. Pri voľbe obsahu uhlíka treba vziať do úvahy obsah kremíka, ktorý posúva pásmo nízkoteplotnej popúšťacej krehkosti (260 až 400 °C) k vyšším teplotám. Pretože je nevyhnutné popúšťať nad pásmom nízkoteplotnej krehkosti, musia mať ocele s nízkym obsahom kremíka obsah uhlíka na hornej hranici odporúčaného rozpätia, aby pevnosť po popúšťaní veľmi neklesla.

Na obr.3.6 je závislosť mechanických vlastností ocele E 4340 od popúšťacej teploty, ktorú je potrebné voliť podľa požadovanej kombinácie vlastností (zvyčajne v intervale medzi 300 a 500 °C). Diagram ukazuje, že vzorky popustené pri teplote 320 °C mali síce vysokú pevnosť, ale minimálnu vrubovú húževnatosť. Pri vyšších popúšťacích teplotách sa zvyšovala húževnatosť, pevnosť však rýchlo klesala. Chemické zloženie niekoľkých nízkolegovaných ocelí s vysokou pevnosťou uvádza tab.3.20.

Obr. 3.6. Vplyv popúšťacích teplôt na mechanické vlastnosti vysokopevnej ocele E 4340

Tab. 3.20

Chemické zloženie nízkolegovaných ocelí s vysokou pevnosťou

Značka ocle	Chemické zloženie (%)						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	V
E 4340	0,40	0,75	0,27	0,80	1,82	0,25	
15 241	0,35	0,60	0,17	1,70			0,10
	0,43	0,80	0,37	2,00			0,20
16 341	0,35	0,60	0,17	0,80	1,60	0,10	
	0,43	0,80	0,37	1,20	2,10	0,20	
16 532	0,27	1,00	0,90	0,90	1,40		
	0,34	1,30	1,20	1,20	1,80		

Oceľ akosti 16 341 má po zakalení do oleja a po popustení pri teplote 550 °C počas 1 hodiny medzu klzu 900 MPa, vrubovú húževnatosť 90 J.cm<sup>-2</sup> a lomovú húževnatosť  $K_{IC} = 150 \text{ MPa.m}^{1/2}$ . Pri znížení popúšťacej teploty na 300 °C sa medza klzu zvýši na 1700 MPa, vrubová húževnatosť klesá na 20 J.cm<sup>-2</sup>. Rovnaké mechanické vlastnosti mali vzorky kalené izotermicky pri teplote 300 °C počas troch hodín.

Pri použití ocelí s vysokou pevnosťou treba venovať pozornosť konštrukcii súčiastok, t.j.zaobleniu rohov, prechodom medzi stenami a pod., aby sa znížila koncentrácia napätia v týchto miestach. Väčšie nahromadenie materiálu v uzloch spôsobuje ťažkosti najmä pri odliatkoch. Príklady správneho riešenia uzlov sú na obr. 3.7. Vo všeobecnosti platí, že pri výrobe odliatkov z ocelí s vysokou pevnosťou je potrebná úzka spolupráca konštruktéra a technológa.

Obr. 3.7. Správna konštrukcia uzlov súčiastok z ocele s vysokou pevnosťou

**Termomechanicky spracované ocele.** Termomechanické spracovanie (TMS) je cieľavedome riadená kombinácia tvárnenia a fázových premien. Dotýka sa predovšetkým austenitickej matrice a jej martenzitickej transformácie. Spôsoby TMS je možné najprehľadnejšie rozdeliť podľa časovej postupnosti tvárnenia a deformácie podľa toho, či prebieha:

- deformácia pred transformáciou:
  - vysokoteplotné termomechanické spracovanie,
  - nízkoteplotné termomechanické spracovanie (ausforming),
  - kombinované termomechanické spracovanie,

- predbežné termomechanické spracovanie,
- deformácia v priebehu transformácie:
  - pri perlitickej premene (isoforming),
  - pri bainitickej premene,
  - deformácia po transformácii:
    - deformačné popúšťanie,
    - dynamické deformačné starnutie martenzitu.

*Deformácia pred transformáciou* je najbežnejšou časovou postupnosťou čiastkových procesov a je charakteristická pre skupinu postupov prevádzkovo úspešne overených (schémy na obr.3.8). Pri vysokoteplotnom termomechanickom spracovaní (obr.3.8 - vľavo) sa oceľ intenzívne tvárni v oblasti stabilného austenitu. Stupeň deformácie býva v rozmedzí 40 až 90 %. V silne deformovaných zrnách austenitu prebieha pri tvárniacej teplote zotavenie a rekryštalizácia. Ihneď po vzniku nových rekryštalizovaných zrn sa oceľ zakalí. Vznikne veľmi jemný martenzit, ktorý sa popustí na nízku teplotu. Tento postup je možné použiť aj u nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. U nízkolegovaných podeutektoidných ocelí sa po vysokoteplotnom termomechanickom spracovaní (VTMS) dosahuje pevnosť okolo 2500 MPa. Najviac používaný spôsob TMS je nízkoteplotné termomechanické spracovanie (NTMS, ausforming). Vyžaduje účinnú deformáciu (okolo 50 % a viac) metastabilného austenitu v inkubačnej perióde a nasledujúce martenzitické zakalenie. Deformácia prebieha najčastejšie v intervale teplôt 500 - 600 °C (t. j. v oblasti najväčšej stability podchladeného austenitu legovaných ocelí); popúšťacia teplota po kalení je obvykle 200 °C. Veľká hustota mriežkových porúch v nerekrystalizovanom austenite vedie k vzniku veľmi jemného martenzitu. Ocele s vyšším obsahom prísad dosahujú po NTMS pevnosti okolo 3000 MPa. Kombinované termomechanické spracovanie (KTMS) je kombináciou VTMS a NTMS. Austenit sa najskôr deformuje nad  $A_{c3}$ , potom v oblasti metastabilného austenitu a napokon zakalí na martenzit. Pri tzv. predbežnom termomechanickom spracovaní (PTMS) sa za studena alebo za tepla deformovaná oceľ rýchlo austenitizuje a zakalí. Pred austenitizáciu sa zaraďuje medzižíhanie pri 300 °C za účelom polygonizácie dislokačnej štruktúry.

Obr. 3.8. Schémy vysokoteplotného (vľavo) a nízkoteplotného (vpravo) termomechanického spracovania

*Deformácia v priebehu transformácie* je rýchle ochladenie z austenitizačnej teploty do oblasti perlitickej a bainitickej premeny, v ktorej sa oceľ intenzívne tvárni a po tvárnení necháva chladnúť na vzduchu (pri perlitickej premene, tzv. isoforming), alebo sa zakalí na zmes martenzitu a spodného bainitu (po tvárnení v bainitickej oblasti). Deformáciou v priebehu perlitickej transformácie sa dosahuje len malé zvýšenie pevnosti, ale podstatné zvýšenie húževnatosti. Využitím deformácie v priebehu bainitickej transformácie sa dosiahne väčší nárast pevnosti ako NTMS, ale tvárnosť a húževnatosť je relatívne nízka.

*Deformácia po transformácii* sa používa u martenzitu po malej deformácii za studena medzi prvým a druhým popúšťaním (tzv. deformačné popúšťanie, DP) alebo sa aplikuje priamo pri teplote popúšťania (150 - 200 °C, tzv. dynamické deformačné starnutie martenzitu, DDSM). Dosahuje sa podstatné zvýšenie medze klzu pri miernom znížení ťažnosti a  $K_{IC}$ . Významný je poznatok, že niektoré metódy TMS pôsobia aditívne, napr. kombinácia NTMS a DDSM.

Metódy TMS sú použiteľné pre širokú škálu ocelí; najväčší význam majú pre polymorfne nízkolegované až stredne legované ocele so stredným obsahom uhlíka (0,4 - 0,6 %), teda pre typické konštrukčné ocele k zušľachtovaniu. Príklady sú uvedené v tab.3.21. Termomechanicky spracované ocele sa používajú napr. na menšie zápustkovo kované namáhané súčiastky v automobilovom a leteckom priemysle, na kladivá drvičov, pancierovanie uhoľných mlynov a pod.

Vybrané termomechanicky spracované ocele

Spracovanie	Značka	Chemické zloženie [%]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	Poznámka
TMS	40Cr5MoV	0,40C; 5 Cr; 1,3 Mo; 0,5 V	2800	2600	9	NTMS 95 % pri 500 °C
	STN 41 4260	0,55 C; 0,65 Mn; 1,5 Si; 0,6 Cr	2120	200	9	NTMS 70 % pri 550 °C

**Ocele maraging.** O príslušnosti do tejto skupiny ocelí nerozhoduje chemické zloženie, ale základný mechanizmus spevňovania, ktorým je vylučovanie intermetalických fáz v matrici (starnutie) takmer bezuhlíkového martenzitu. Zo spojenia názvov dvoch za sebou nasledujúcich fázových premien, vyvolávajúcich spevnenie, t. j. premeny martenzitickej (martensite) a starnutia (aging) vznikol názov tejto skupiny ocelí maraging. Ocele maraging sa vyvíjajú asi 25 rokov. Spočiatku to boli nízkouhlíkové (do 0,03 % C) ocele, v ktorých hlavným prísadovým prvkom bol nikel v množstve 8 - 25 %. Išlo predovšetkým o ocele obsahujúce 20 a 25 % Ni s prísadou Ti, Al a Nb. Ďalšou etapou boli zliatiny zo sústavy Fe-Ni-Co-Mo s prísadou Ti. Najrozšírenejšie ocele tohoto typu obsahujú 18 % Ni. Chemické zloženie najdôležitejších ocelí maraging udáva tab.3.22. Americké označenie vyjadruje (okrem obsahu Ni) medzu klzu v jednotkách ksi (1 ksi = 7 MPa); ruské označenie charakterizuje chemické zloženie. Jednotlivé ocele sú známe aj pod rôznymi firemnými názvami; napr. oceľ 18Ni250grade pod názvami: Vascomax 250, Nimar 110, Almar 18-250, Marvac 250, Republic RSM-250, Murphy 1.

U ocelí maraging sa požaduje vysoká čistota: C < 0,03 %, Mn < 0,1 %, Si < 0,1 %, S < 0,01 %, P < 0,01 %. Zvlášť nežiaduce prímеси sú C, S, N. Zvyšujú hustotu bodov zakotvenia dislokácií a tvoria karbidy a nitridy, vylučujúce sa hlavne na hraniciach zrn. To má za následok zníženie plastických vlastností. Podobne pôsobia vtrúseniny na báze síry. Ocele maraging sa preto vyrábajú vo vákuových peciach, najmä oblúkových. Vákuové tavenie je nevyhnutné najmä v prípade zvýšeného obsahu Ti. Táto technológia znižuje segregácie zliatinových prvkov a zväčšuje ich čistotu. Najvýznamnejším prísadovým prvkom je Ni, ktorý zabezpečuje vznik martenzitickej štruktúry počas ochladzovania (a to aj na vzduchu). Určitá



časť niklu sa podieľa na starnutí ako súčasť intermetalických fáz  $Ni_3Ti$ ,  $Ni_3Ti$ ,  $Ni_3MoTi$ ,  $NiTi$ ,  $(Fe,Ni)_2Mo$ . Ďalšie vplyvy niklu, ako aj iných prísadových prvkov charakterizuje tabuľka 3.23.

Tab. 3.22

Chemické zloženie a mechanické vlastnosti ocelí maraging (po starnutí)

Typ	Príklady		C <sub>max.</sub> (%)	Približný obsah (%)						R <sub>p0,2</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	E (GPa)	A (%)	Z (%)	HRC	KCU (Jcm <sup>-2</sup> )
	USA	Rusko		Ni	Co	Mo	Ti	Al	Nb							
200	18Ni200 grade	N18K8M3T	0,03	18	8	3	0,2	0,1		1450	1460	180	15	65	45	66
250	18Ni250 grade	N18K8M5T	0,03	18	8	3	0,4	0,1	0,4	1730	1760	186	12	50	50	35
300	18Ni300 grade		0,03	18	9	5	0,6	0,1		1960	1990	190	10	45	54	30
350	18Ni350 grade	N18K12M5T2J	0,01	18	12	5	1,7	1,0		2470	2500	192	8	40	59	12
400			0,01	13	16	10	0,2			2880	2720	207	5	25	62	20

Tab. 3.23

Vplyv prísad na niektoré vlastnosti ocelí maraging

Druh pôsobenia	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Mn	Cr	Cu	V	Nb	W	Si	C	B, Zr
Zníženie teploty M <sub>s</sub>	xx		x			xx	xx						x	
Zvýšenie lomovej húževnatosti	xx	xx	xx								x			
Zníženie rozpustnosti vytvrdzujúcich prvkov	xx	xx				x	xx					x		
Zjemnenie martenzitu		xx	x	x	x				x	xx			x	xx
Zníženie vplyvu dusíka				xx	xx		x	x	xx					
Tvorba vytvrdzujúcich fáz	xx	x	xx	xx	xx	x		x	x	x	x	x	x	
Brzdzenie segregáčnych procesov			xx				x	x						
Zvýšenie koróznej odolnosti	x				x	xx	x	x			x			

x = významný vplyv, xx = zvlášť významný vplyv

Ocele maraging sa kalia z intervalu teplôt 800 až 900 °C po dobe austenitizácie najmenej 30 minút. Tieto podmienky zabezpečujú rozpustenie častíc v austenite a súčasne aj relaxáciu prípadných napätí, vyvolaných predchádzajúcim spracovaním. Kalí sa zvyčajne do vody. Pritom však treba poznamenať, že s ohľadom na vysoký obsah niklu nemá rýchlosť ochladzovania v prípade ocelí maraging podstatný význam. Vplyvom obsahu Ni (min.15 %) dochádza k výraznej teplotnej hysterézii medzi premenou  $\alpha \rightarrow \lambda$  pri ochladzovaní pri ohreve. Voľbou obsahu Ni je z jednej strany snaha maximálne zväčšiť túto hysteréziu s cieľom zabezpečiť stabilitu martenzitu do čo najvyššej teploty, z druhej strany získať počas ochladzovania štruktúru zloženú výlučne z martenzitu (pri Ni < 18 %). Po kalení tvorí štruktúru prakticky bezuhlíkový niklový martenzit, pre ktorý je charakteristická veľká plasticita, pomerne nízka tvrdosť (30 - 35 HRC), pevnosť v ťahu okolo 1000 MPa a dobrá obrábateľnosť. V zakalenej štruktúre sa pripúšťa výskyt zvyškového austenitu v množstve do 10 %. Ak je jeho obsah vyšší, používa sa zmrazovanie. Starnutie sa vykonáva zvyčajne pri teplotách 450 až 550 °C po dobu 3 hodín s ochladením na vzduchu. Počas starnutia sa v martenzite vylučujú disperzné častice intermetalických fáz, obsahujúce hlavne Mo a Ti. Ich účinkom sa zvyšuje tvrdosť až do 62 HRC.

Obr. 3.9. Tvrdosť ocele maraging v závislosti od teploty starnutia

Popísané tepelné spracovanie zabezpečuje optimálnu kombináciu pevnosti a plasticity spolu s vysokou odolnosťou proti krehkému porušeniu a propagácii trhlín. Dôležitý technologický význam má aj fakt, že zmeny rozmerov súčastí z ocelí maraging v priebehu tepelného spracovania sú

malé. Nárast rozmerov pri kalení neprekračuje 0,05 % (v konvenčných oceliach je do 1,5 %), aj zmrastenie počas starnutia je nepatrné, čo umožňuje realizovať dokončujúce výrobné operácie pred starnutím. Relatívne nízka tvrdosť po kalení vyplýva z malého obsahu uhlíka u týchto ocelí. Napriek tomu majú vysokú medzu klzu, pretože v martenzite je vysoká hustota dislokácií (cca  $10^{11}$  cm<sup>-2</sup>). Okrem toho vysoká hustota a rovnomerné rozloženie dislokácií zabezpečujú rovnomerné rozloženie a značnú disperzitu častíc vznikajúcich v martenzite počas starnutia. V skupine klasických ocelí maraging, obsahujúcich 18 % Ni, najmenšiu krehkosť a najväčšiu hodnotu  $K_{IC}$  vykazuje oceľ 18Ni200 ako v stave kalenom, tak i po starnutí a aj po tvárnení. Niektoré druhy možno tvárniť za studena (v kalenom stave) do stupňa deformácie 80 % bez medzižihania. Oceľ maraging si zachováva dobré plastické i pevnostné vlastnosti v širokom intervale teplôt. Niektoré druhy nestrácajú svoju pevnosť až do 600 °C. Vo všeobecnosti môžu oceľ maraging pracovať v mierne zvýšených teplotách bez zmeny tvrdosti (obr. 3.9) a pri veľkej zmene iných mechanických vlastností (obr. 3.10). Okrem toho, vďaka malému obsahu uhlíka a vysokému obsahu niklu si zachováva martenzitická matrica dobrú húževnatosť do teploty tekutého vodíka a medza klzu sa výraznejšie nemení do teploty tekutého dusíka. Skupina ocelí typu 18Ni má pomerne nízku odolnosť proti korózii v roztokoch solí a v iných aktívne pôsobiacich prostrediach.

Obr. 3.10. Vplyv teploty starnutia na mechanické vlastnosti ocele typu 250 (a) a 300 (b)

Ocele maraging majú veľa cenných technologických vlastností, ktoré je možné charakterizovať nasledovne:

- vysoká rozmerová stabilita počas tepelného spracovania i dlhodobej prevádzky;
- nízky súčiniteľ deformačného spevnenia a dobrá plasticita, čo umožňuje použitie všetkých druhov tvárnenia za tepla i za studena s vysokými stupňami deformácie;
- dobrá obrábateľnosť, najmä v kalenom stave;
- vhodnosť na vytvrdzovanie rôznymi spôsobmi spracovania povrchu;
- dobrá zvárateľnosť.

Vyššie charakterizovaný neobvyklý súbor vlastností predurčuje ocele maraging na použitie na konštrukcie, pracujúce v podmienkach vysokých zaťažení, vrátane dynamických. Navyše je možné z nich vyrábať súčasti s komplikovaným tvarom. Používajú sa predovšetkým v kozmickej technike a v leteckom, lodnom, zbrojnom a strojárskom priemysle. V konštrukcii kozmických lodí sú z týchto ocelí stavané raketové motory s priemerom nad 6,5 m. Takéto konštrukcie vyžadujú použitie materiálov s vysokou pevnosťou a odolnosťou proti korózii v plynoch. V leteckom priemysle sa v súčasnosti všeobecne využívajú pri výrobe katapultov a podvozkov lietadiel. V lodnom priemysle sa používajú okrem iného na plášte lodí, fóliové pokrytia pre hydroavióny, v konštrukcii batyskafov a iných hlbinných konštrukcií, ako aj ventilátorov lodných generátorov. V zbrojárstve boli využité ocele maraging na výrobu hlavných rýchlopalných diel, čo umožnilo asi štvornásobne zvýšiť ich životnosť. V strojárstve sú používané okrem iného na: časti parných turbín, súčiastky spaľovacích motorov, závodných automobilov, železničných vagónov, obrábacích strojov, na ozubené kolesá, ložiská, spojovacie elementy, pružiny a lopatky ventilátorov. Možno uviesť tiež precízne náradie, charakteristické veľkou stabilitou rozmerov a súčiastky hodínok. Z ocelí maraging sa okrem toho vyrábajú vysokotlakové tenkostenné nádoby s priemerom do 4 m a kotly a rúry s veľkým priemerom, pracujúce v zvýšených teplotách a pod tlakom do 2 GPa. Systematicky narastá využitie ocelí maraging na výrobu náradia. Typickými výrobkami tohto typu sú formy na tlakové liatie zliatin Al a Zn, tŕne, kovacie zápustky, frézovacie hlavice, formy pre plasty a iné. Možnosti širšieho uplatnenia ocelí maraging sú ohraničené ich vysokou cenou (asi 5 x prekračuje cenu nízkolegovaných ocelí s vysokou pevnosťou). V súvislosti s tým sa použitie ocelí maraging obmedzuje na tie aplikácie, kde prináša vysoké ekonomické

efekty. Výhodne sa uplatňujú najmä na vysokonamáhané súčiastky, ktoré majú vysoké nároky na presnosť. U nás sú normované špeciálne ocele na nástroje (19 901, 19 902), určené na presné formy.

**Ocele TRIP.** Medzi ocele s vysokou pevnosťou možno zaradiť aj ocele v literatúre označené ako TRIP-ocle. Vo všeobecnosti dosahujú pevnosť až 2200 MPa a ťažnosť v rozmedzí 20 až 80 %. Práve pre vysokú ťažnosť, ktorá je charakteristickým dôsledkom deformačne indukovanej martenzitickej transformácie sa príslušné ocele aj pochod označujú TRIP, čo značí premenou (transformačne) vyvolaná plasticnosť (transformation induced plasticity).

Podstatou procesov prebiehajúcich pri spevňovaní TRIP-ocelí je martenzitická transformácia, indukovaná napätím alebo deformáciou. Pri vonkajšom napätí preberajú oblasti austenitu zaťaženie a transformujú na martenzit, ktorý je súčasne ďalej deformovaný. Chemické zloženie týchto ocelí (pozri príklad v tab.3.21) je volené tak, aby mali austenitickú štruktúru a teplota  $M_s$  bola po rozpúšťacom žíhaní (homogenizácii) pod 0 °C. Homogenizovaná oceľ sa intenzívne tvárni pri teplote vyššej ako je  $M_d$  (hraničná teplota vzniku deformačného martenzitu). V priebehu tohto tvárnenia sa teplota  $M_d$ , ktorá je pôvodne asi 100 °C, zvýši o cca 100 °C a o rovnakú hodnotu poklesne  $M_s$  (pozri obr.3.11). Dôsledkom procesu deformácie je čiastočná martenzitická transformácia austenitu pri zaťažovaní ocele v rozmedzí teplôt  $M_s$  až  $M_d$ . Doštičky martenzitu, ktoré vznikajú v sklzových pásoch, sú veľmi účinnou prekážkou pre pohyb dislokácií. Pokiaľ v priebehu zaťažovania vznikne trhlinka, indikuje sa v deformovanej zóne na jej čele martenzitická transformácia a doštičky martenzitu bránia ďalšiemu šíreniu trhliny. Charakteristické pre tento proces je, že deformácia martenzitu v rozpätí teplôt  $M_s$ -  $M_d$  je homogénna, to znamená, že sa nekoncentruje v určitej miestnej oblasti, ale sa rovnomerne rozkladá v celom objeme.

Ocele TRIP sú známe od šesťdesiatych rokov, kedy boli opísané vlastnosti ocelí so zložením 0,3 % C, 9 % Cr, 8 % Ni, 4 % Mo, 2 % Mn, 2 % Si. Tepelné spracovanie pozostáva z rozpúšťacieho žíhania pri teplote 1120 °C, tvárnenia pri teplote 450 °C s 80 % deformáciou a ochladenia pod normálnu teplotu. Východiskovú štruktúru tvorí austenit s malým množstvom martenzitu. Polovýrobky sa potom tvárnia pri normálnej teplote a 15 % redukcii, aby sa zvýšil obsah martenzitu a tvrdosť austenitu. Nakoniec sa pri teplote 400 °C znižuje napätie. Po konečnom tepelnom spracovaní má oceľ pevnosť v ťahu asi 2000 MPa, ťažnosť 25 až 30 %, vrubovú húževnatosť asi

40 J.cm<sup>-2</sup> a vysokú lomovú húževnatosť. Pretože je v štruktúre vyšší obsah zvyškového austenitu, má oceľ vyššiu medzu únavy. Vo všeobecnosti majú TRIP-ociele vysokú pevnosť a súčasne vynikajúce plastické vlastnosti. Skúšky ukázali, že aj hnacia sila na šírenie trhlin je vysoká, takže ocele sú odolné proti vzniku krehkého lomu. Nevýhodou TRIP-ocelí je relatívne nízka medza klzu.

Obr. 3.11. Schéma pochodu TRIP

Ocele TRIP sú zatiaľ skupinou ocelí s vysokou pevnosťou, ktorá je najmenej zvládnutá v teórii a praxi. Vyrábajú sa zvyčajne vo forme plechov alebo drôtov. Z aplikácií je možné uviesť potahy v leteckom a raketovom priemysle, chirurgické ihly, špeciálne laná a pod.

### 3.6 Vybrané ocele menovitého použitia

Táto skupina ocelí je venovaná pomerne úzkej, ale dôležitej oblasti konštrukčných ocelí všetkých tried, okrem nástrojových. Ich vlastnosti sú volené tak, aby čo najlepšie vyhovovali danému použitiu pri najmenších nákladoch na výrobu aj prevádzku.

**Ocele pre koľajovú dopravu.** Integrácia železničnej dopravy v medzinárodnom meradle kladie čoraz vyššie nároky na podmienky prepravy, na jej bezpečnosť, spoľahlivosť, rýchlosť a kompatibilitu. S tým je spojené aj zvyšovanie spoľahlivosti a životnosti používaných konštrukčných materiálov. Rozhodujúcimi parametrami, ktoré majú vplyv na životnosť

materiálov používaných v koľajovej doprave, sú pevnostné vlastnosti, únavové vlastnosti, oteruvzdornosť a koróziivzdornosť.

Podľa použitia sa delia ocele pre koľajovú dopravu na podskupiny:

- ocele na koľajnice,
- ocele na súčasti koľajových vozidiel,
- ocele na príslušenstvo koľajových zvrškov.

*Ocele na koľajnice.* Pre súčasti drobného koľajiva vystačia bežné konštrukčné ocele triedy 10 a 11. Pre koľajnice žeriavových dráh a pre súčasti koľajových vozidiel, požadované vlastnosti materiálov sú pomerne dobre zastúpené v klasických uhlíkových oceliach triedy 12, prípadne v nízkolegovaných Mn a Cr oceliach triedy 13 a 14 (tab. 3.24). Zvláštnu skupinu predstavujú materiály pre širokopätné a výhybkové koľajnice. Vzhľadom na ich zaťaženie musia spĺňať zvýšené nároky na oteruvzdornosť a pevnosť. Mechanické a fyzikálne vlastnosti týchto koľajnic sa dosahujú chemickým zložením (zaručuje perlitickú štruktúru), použitím mikrolegúr (napr. Ti) a uplatňovaním vákuového (protivodíkového) procesu pri spracovaní tekutej ocele na potlačenie vločkovitosti [52].

*Ocele na súčasti koľajových vozidiel a koľajový zvršok.* Do tejto triedy patria hlavne ocele triedy 11 so stredným obsahom uhlíka, ocele mangánové a ocele mangán-chrómové. Niektoré vybrané typy týchto ocelí so základnými vlastnosťami u uvedené v tab. 3.25.

Na koľajový zvršok sa používajú ocele triedy 10 a 11, prípadne ocele, ktoré sú vyrábané špeciálne pre tento účel. Chemické zloženie týchto ocelí je zaručované iba v obsahu P, S, prípadne v obsahu C, alebo sa vôbec nezaručuje (tab. 3.26) [52].

**Ocele pre výstuž do betónu.** Táto skupina materiálov ešte stále predstavuje pomerne veľký objem vyrábaných polotovarov. Kedysi sa na valcovanie tyčovej ocele pre výstuž do betónu používal takmer výhradne technologický odpad alebo vypadnuté tavby vhodných konštrukčných akostí. Vzhľadom na požiadavky bezpečnosti, spoľahlivosti a nosnosti predstavujú tieto ocele v súčasnosti tvarovo, rozmerovo i akostne náročný sortiment.

Prvoradou požiadavkou na vlastnosti ocelí pre výstuž do betónu je vysoká medza klzu a veľký koeficient súdržnosti s betónom. Na zvýšenie súdržnosti sa využíva rebrovaný povrch tyčí. Zvýšenie medze klzu sa dosahuje buď modifikáciou chemického zloženia alebo tvárnením za studena. Okrem skrúcania tyčí za studena sa dnes uplatňuje stále viac ťahanie a profilovanie

za studena, najmä tyče s malým priemerom, ktoré sú určené pre výrobu prefabrikovaných armatúr, ako sú siete, rohože a pod.

Tab.3.24

Chemické zloženie ocelí pre koľajnice

Značka	Chemické zloženie [%]					Určená pre
	C	Mn	Si	P+S	Ti max	
	0,45-0,65	0,75-1,30	0,35 max.	0,1	-	Koľajnice širokopätné železničné
	0,50-0,75	0,75-1,35	0,40 max.	0,095	-	Koľajnice žliabkované
	0,55-0,80	0,75-1,40	0,15-0,50	0,095	-	Koľajnice nábehové
	0,50-0,75	1,30-1,80	0,15-0,40	-	0,09	Koľajnice širokopätné železničné
	0,55-0,75	0,75-1,40	0,15-0,50	0,095	-	Koľajnice jazykové a srdcovkové
10 420	Nepredpisuje sa					Koľajnice pre lanovky
10 500	Nepredpisuje sa					Koľajnice pre bane
10 650	Nepredpisuje sa					Koľajnice žliabkované, nábehové, žeriavové, banské
10 750	Nepredpisuje sa					Koľajnice žliabkované, jazykové, žeriavové, banské
13 152	0,46-0,56	0,90-1,30	0,15-0,40	0,09	-	Koľajnice žliabkované, nábehové, žeriavové
13 180	0,70-0,80	0,90-1,20	0,15-0,35	0,075	-	Koľajnice pre žeriavy

Kvalita ocelí pre výstuže do betónu sa hodnotí systémom matematicko-štatistickej kontroly medze klzu. Pri tejto kontrole minimum medze klzu hodnotenej ocele nesmie klesnúť pod stanovenú hodnotu s pravdepodobnosťou 0,9985. V tab. 3.27 sú uvedené parametre vybraných ocelí pre výstuž do betónu. Ocele pre zvárané armatúry musia mať zaručenú tavnú zvrátateľnosť [52, 53].



Tab. 3.25

## Ocele pre súčasti koľajových vozidiel

Značka	Re [MPa]	Rm [MPa]	KCU2 [Jcm <sup>-2</sup> ]	Určená pre
11 558.1	255 – 275	539 - 657	-	Predvalky a výkovky pre súčasti koľajových vozidiel
11 601.1	265 – 294	588 - 706	min. 29	Obruče a kolesá pre železničné dvojkoľesia
11 608.1	294	588 - 706	40	Surové obruče pre železničné dvojkoľesia
11 701.1	314-343	686-824	20-29	Obruče, celistvé kolesá a bandáže pre železničné dvojkoľesia
12 032.6	275-314	490-637	78 <sub>⊥</sub> / 29 <sub>  </sub>	Vývalky a výkovky pre nápravy železničných vozidiel
47Mn		735 - 845	29	Tyče a predvalky na výrobu súčastí ťahového zariadenia koľajových vozidiel
14 163.7	520-539	932-1079	HB 285-330	Tyče, obruče a celistvé kolesá pre koľajové vozidlá mestskej dopravy

Tab. 3.26

## Ocele pre príslušenstvo koľajového zvršku (drobné koľajivo)

Značka	Rm [MPa]	A <sub>5</sub> [%]	Uhol ohybu [°]	Určená pre
10 000	490	-	180	Tyče na ploché podkladnice pre banské dráhy
10 370	360-440	24-27	180	Tyče na opierky, oceľové podvaly, pre banské dráhy zvierky, spojky a podkladnice
10 420	410-510	22-25	180	Tyče na klzné stoličky
52 P	314-343	686-824	20-29	tyče na spojky a tyče na spojky „Rudert“
10 500	490	10	-	Tyče na vnútorné a vonkajšie spojky pre žliabkované koľajnice,
11 600	588-706	14	90	Tyče na prídržnice,
S38 Si 2	638-834	-	-	Drôt valcovaný na perové podložky

Parametre vybraných ocelí pre výstuž do betónu

Označenie	Chemické zloženie [%]			Re <sub>min</sub> [MPa]	Tvar	Zvárateľnosť STN 05 1317
	C <sub>max</sub>	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>			
10 216	nepredpisuje sa			206	tyč kruhová, hladká	dobrá
10 335	0,25	0,050	0,050	325	tyč rebrovaná	zaručená
10 338	nepredpisuje sa			325	tyč skrúcaná	obtiazna
10 425	0,28	0,050	0,050	410	tyč rebrovaná	zaručená
10 607	-	0,050	0,050	590	tyč rebrovaná	neodporúča sa

**Ocele pre tlakové nádoby.** Charakteristiky úžitkových vlastností ocelí na tlakové fľaše a nádrže sú rozdielne podľa účelu ich použitia. Vyžaduje sa od nich hlavne:

- zvýšená odolnosť proti koróznemu praskaniu a starnutiu v prípade nádob a zásobníkov pre chemický priemysel,
- pevnostné vlastnosti a odolnosť proti krehkému porušeniu v prípade tlakových nádob a fliaš na stlačené plyny,
- pevnostné vlastnosti a odolnosť proti krehkému porušeniu pri znížených teplotách (skvapalnené plyny).

Vyššie uvedeným požiadavkám je prispôsobené chemické zloženie ocelí a stav tepelného spracovania výrobkov (tab. 3.28). Obsah fosforu a síry sa môže pohybovať pre oceľ triedy 11 a 12 do 0,03 %, v triede 13 do 0,04 % a v triede 16 do 0,035 %. Všetky ocele so zvýšenou chemickou čistotou sú upokojené, jemnozrnné a mikrolegované vanádom a titánom. Vyrábajú sa v SM peciach prípadne v elektrických peciach (ocеле triedy 16). Všetky výrobky sú tepelne spracované alebo zušľachtované. Pri valcovaných výrobkoch sa tepelne spracováva východiskový materiál. Výkovky a bezšvové fľaše sa zušľachtujú až ako hotové výrobky [52, 53].

Voľba ocelí je daná požadovanými vlastnosťami a použitím tlakovej nádoby. Napríklad, rozdiel medzi bezšvovými fľašami na stlačené plyny z ocelí 13 142 a 16 140 je v tom, že fľaše z ocele 13 142 sú určené pre priemysel (mobilné aj stabilné) a fľaše z ocele 16 140 sú tzv. ľahké, prenosné pre dýchacie prístroje.

Vybrané ocele pre tlakové nádoby

Značka	Chemické zloženie [%]								
	C	Mn	Si	Cr	≤ Ni	≤ Mo	Cu	V	≥ Ti
12 016.2	0,09	0,30-0,80	0,25-0,45	0,25	0,20	-	0,25		5*%C
13 124.9	0,16-0,23	1,30-1,60	0,20-0,40	0,30	0,30	-	0,30	0,08	
13 142.6	0,36-0,44	1,00-1,30	0,15-0,40	-	-	-	-		
16 140.7	0,35-0,43	0,50-0,80	0,15-0,40	0,70	0,70	0,5	-		
16 228.5	max.0,19	1,10-1,65	0,15-0,40	0,30	0,70	-	0,30	0,12-0,2	
11 484.1	max.0,20	max.1,40	max.0,55	0,30	0,30	-	0,30		0,20

**Ocele pre rúrky na hlbinné vrtanie a pre ropovody.** Do tejto skupiny sú zaradené ocele na výrobu vrtných, pažnicových, čerpacích a olejovodných rúrok, ktoré sú používané pri ťažbe a doprave nafty (ropy) a zemného plynu a pre geologické prieskumné vrty. Do noriem sú z týchto ocelí zaradené len ocele 11 559, 11 658 a 11 707, ktoré sú používané pre zariadenia na geologické vrty. V naftárskom priemysle SR, podobne ako v prevažnej väčšine všetkých štátov, sú používané ocele vyrábané podľa noriem Amerického petrolejárskeho inštitútu (API). Ocele používané na výrobu ropovodných rúr a rúrok pre hlbinné vrtanie sú uhlíkové konštrukčné ocele s rôznym obsahom uhlíka. Ak je požadovaná tavná zvariteľnosť, používajú sa aj mikrolegované ocele. Rúrky vyšších pevnostných stupňov bez požiadavky na zvariteľnosť, sú vyrábané z uhlíkových alebo legovaných ocelí, ktoré sú vhodné na tepelné spracovanie zušľachtovaním. Vybrané ocele pre hlbinné vrtanie a ropovody sú uvedené v tab. 3.29 a ich chemické zloženie v tab. 3.30.

Vrtacie rúrky sú časťou vrtnej súpravy, ktorá prenáša krútiaci moment od vrtacej plošiny až k vrtacej hlave. Rúrky sú vystavené veľkému namáhaniu, ktoré je vyvolané premenlivým krútiacim momentom, ťahovým napätím spôsobeným vlastnou hmotnosťou a hmotnosťou záťažových tyčí, ďalej vnútorným pretlakom výplachovej kvapaliny a ohybom v miestach, kde sa vrt odchyľuje od zvislého smeru. Často sú vrtné rúrky vystavené nárazom, preto sa na tieto ocele kladie dôraz na ich húževnatosť.

Pažnicové rúrky slúžia na zaistenie vrtu pred zavalením okolitou horninou. S rastúcou hĺbkou vrtu stúpa ich namáhanie. Musia zniesť vonkajší tlak

vyvolaný horninami, ropou, plynom a vodou. Musia odolávať aj vysokým vnútorným tlakom vo vrtoch. Pažnicové rúrky sú takisto namáhané ťahom od hmotnosti celej kolóny.

Tab. 3.29

Ocele pre hlbinné vŕtanie a ropovody

Označenie	Norma	Použitie	Označenie	Norma	Použitie
H 40	API 5A	PA, ČR	S 135	API 5AX	VR
J 55	API 5A	PA, ČR	A	API 5L,5LS	RV, OV
K 55	API 5A	PA, ČR	B	API 5L,5LS	RV, OV
N 80	API 5A	PA, ČR	X 42	API 5X,5LS	RV, OV
C 75	API 5AC	PA, ČR	X 46	API 5X,5LS	RV, OV
L 80	API 5AC	PA, ČR	X 52	API 5X,5LS	RV, OV
C 95	API 5AC	PA, ČR	X 56	API 5X,5LS	RV, OV
P 105	API 5AX	ČR	X 60	API 5X,5LS	RV, OV
P 110	API 5AX	PA	X 65	API 5X,5LS	RV, OV
D	API 5A	VR	X 70	API 5X,5LS	RV, OV
E	API 5A	VR	11 559	ON 41 1559	PA, ČR, VR
X 95	API 5AX	VR	11 658	ON 41 1658	VR, PA
G 105	API 5AX	VR	11 707	ON 41 1707	VR, PA

PA – pažnice, ČR – čerpacie rúrky, VR – vŕtacie rúrky, RV – ropovody, OV – olejovody

Čerpacie rúrky dopravujú ťažené látky z ložiska na zemský povrch, a to pôsobením vlastného tlaku v ložisku alebo pomocou čerpadiel. Sú namáhané veľkým vnútorným pretlakom a vlastnou hmotnosťou. Okrem uvedených namáhání pažnicových a čerpacích rúrok ešte pristupuje nebezpečenstvo praskania trubiek pôsobením korózie pod napätím. Toto riziko je výrazné najmä pri vyšších pevnostných stupňoch a v prostredí obsahujúcom síru [52, 53].

Rúry pre ropovody a plynovody slúžia na konštrukciu vysokotlakových potrubí s veľkým priemerom, ktoré dopravujú pod veľkým tlakom vytážené produkty na miesta ďalšieho spracovania a k spotrebiteľovi. Aj v týchto materiáloch treba sledovať odolnosť proti krehkému porušeniu.

Chemické zloženie vybraných ocelí pre hlbinné vŕtanie

Značka	Chemické zloženie [%]							R <sub>e</sub> [MPa]	
	C	Mn	Si max	Cr	Mo	Ni max	Cu max	nad	do
L 80	max. 0,40	max. 1,90	0,35	-	-	0,25	0,35	551	655
C 95	max. 0,45	max. 1,90	0,35	-	-	-	-	655	758
P 110	-	-	-	-	-	-	-	758	965
X 95	-	-	-	-	-	-	-	655	862
G 105	-	-	-	-	-	-	-	724	931
S 135	-	-	-	-	-	-	-	931	1138
A	max. 0,22	max. 0,9	-	-	-	-	-	min. 207	
X 42	max. 0,27	max. 1,15	-	-	-	-	-	min. 241	
X 70	max. 0,23	max. 1,60	-	-	-	-	-	min. 482	
X 75/1	max. 0,50	max. 1,90	0,35	-	0,15-0,30	0,50	-	517	621
X 75/2	max. 0,40	max. 1,50	0,35	-	-	-	-	517	621
X 75/3	0,38-0,48	0,75-1,00	-	0,15-0,25	0,80-1,10	-	-	517	621
11 707	max. 0,49	-	-	-	-	-	-	549	755

**Ocele pre pružiny a perá.** Pružinové ocele sa používajú na výrobu všetkých druhov pružných elementov. Proti iným konštrukčným dielom sú pružiny spravidla omnoho viac namáhané staticky aj dynamicky. Pružné elementy sú namáhané dynamicky, prípadne kombinovane. Pri správnej funkcii musí pružina po odľahčení zaujať svoj pôvodný tvar. Pri pružinových oceliach sa preto vyžaduje vysoká medza pružnosti, vysoká medza únavy pri striedavom alebo kombinovanom namáhaní, vysoká medza klzu a pevnosti a dobré plastické vlastnosti, ktoré sú potrebné pri výrobe pružín. Podľa chemického zloženia môžeme pružinové ocele rozdeliť na ocele [52, 53]:

- ušľachtilé uhlíkové,
- nízkolegované,
- vysokolegované.

Uhlíkové ocele v prírodnom stave sa spravidla používajú pre málo namáhané pružiny. Pri malých priemeroch drôtov alebo šírky pásov možno zvýšiť pevnosť ocele tvárením za studena. Najvhodnejšie východiskové štruktúry pre tento spôsob výroby pružinových materiálov možno dosiahnuť patentovaním, prípadne riadeným ochladzovaním drôtu alebo pásu. Úroveň obsahu uhlíka sa volí podľa požadovanej pevnosti. Viac namáhané pružiny z uhlíkových ocelí sa používajú v stave kalenom a popúšťanom.

Tab. 3.31

Chemické zloženie vybraných ocelí pre pružiny a pružné elementy

Značka	Chemické zloženie [%]								skupina
	C	Mn	Si	Cr <sub>max</sub>	Ni <sub>max</sub>	Mo	V	Cu	
12 041	0,37-0,45	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	0,30	-	-	0,30	c
12 060	0,52-0,60	0,50-0,80	0,17-0,37	0,25	0,30	-	-	0,30	a, c
12 061	0,57-0,65	0,50-0,80	0,17-0,35	0,25	0,30	-	-	0,30	a, b
12 071	0,60-0,70	0,60-0,80	max. 0,35	-	-	-	-	-	b, c
12 081	0,70-0,80	0,40-0,65	max. 0,35	-	-	-	-	-	c
12 090	0,80-0,90	0,20-0,45	0,10-0,30	-	-	-	-	-	b
13 180	0,70-0,80	0,90-1,20	0,15-0,35	0,30	0,40	-	-	0,30	a, c
13 251	0,42-0,52	0,50-0,80	1,50-1,90	0,30	0,40	-	-	0,30	a
13 270	0,52-0,68	0,65-0,90	1,50-1,90	0,30	0,40	-	-	0,30	a
14 160	0,50-0,60	0,70-1,00	0,30-0,50	0,30-0,50	0,40	-	-	0,30	a, c
14 182	0,70-0,80	0,55-0,75	1,30-1,50	0,25-0,45		-	-	-	a, c
14 260	0,50-0,60	0,50-0,80	1,30-1,60	0,50-0,70	0,50	-	-	0,30	a, c
14 262	0,55-0,65	0,70-1,00	0,20-0,50	0,70-1,00	0,35	-	-	0,25	a
15 260	0,47-0,55	0,70-1,00	0,17-0,37	0,90-1,20	-	-	-	-	a
39Ni2Cr	0,33-0,43	0,70-1,00	0,90-1,20	0,80-1,10	1,40-1,70	0,20-0,30	min.0,05	0,10	a
17 023	0,26-0,35	max. 0,80	max. 0,70	12,0-14,0	-	-	-	-	a
17 024	0,36-0,45	max. 0,90	max. 0,70	12,0-14,0	-	-	-	-	a

Z nízkolegovaných ocelí sa pre výrobu pružín používajú ocele legované predovšetkým mangánom, kremíkom, mangánom a kremíkom, mangánom a chrómom, kremíkom a chrómom, chrómom a vanádom. Pre najviac namáhané pružiny sú vhodné ocele legované chrómom, niklom,

molybdénom a vanádom. Pružiny z týchto ocelí sú vždy kalené a popúšťané. Väčšina pružinových ocelí má zvýšený obsah kremíka, ktorý výrazne zvyšuje pevnostné charakteristiky, a mangán na zvýšenie prekaliteľnosti. Prísadou chrómu, prípadne vanádia sa zlepšuje odolnosť proti popúšťaniu. Takto legované ocele možno používať až do prevádzkových teplôt 300 °C. Pre korózne prostredie sa používajú pružiny z nehrdzavejúcich (koróziivzdorných) chrómových kaliteľných ocelí.

Pružinové ocele, najmä s obsahom kremíka nad 1 %, sú po valcovaní za tepla spravidla oduhličené. Dovoľená hĺbka oduhličenia je daná buď normou, alebo technickými podmienkami pre daný druh pružiny. Podľa spôsobu výroby pružín možno rozdeliť ocele do troch skupín:

- a) ocele na pružiny kalené,
- b) ocele na pružiny z patentovaného drôtu,
- c) ocele na pružiny z pásov valcovaných za studena.

Prehľadné rozdelenie ocelí podľa triedy a použitia je v tab.3.31.

**Ocele pre ventily spaľovacích motorov.** Ventily spaľovacích motorov sú vystavované vysokým pracovným teplotám. Výfukové ventily pracujú pri teplotách 700 – 900 °C a sacie okolo 500 °C. Vzhľadom na zachovanie funkčnosti a spoľahlivosti materiály ventilov musia až do najvyšších pracovných teplôt vykazovať nielen zodpovedajúcu medzu klzu, pevnosť a medzu únavy, ale i odolnosť proti opalu a proti splodinám horenia so zložkami olova, vysokú oteruvzdornosť, dobrú tepelnú vodivosť a dobré klzné vlastnosti. Splnenie všetkých požiadaviek súčasne je v praxi ťažko uskutočniteľné, a preto sa zvyčajne volí kompromisné riešenie (tab. 3.32). Vlastnosti ocelí využívaných na výrobu ventilov sú dané v prvom rade chemickým zložením, potom spôsobom výroby a tepelným spracovaním. Ak posudzujeme ventilové ocele z hľadiska chemického zloženia, môžeme ich rozdeliť na tri skupiny [52, 53].

Prvú skupinu tvoria ocele na zušľachtovanie, legované kremíkom a prípadne aj chrómom, určené pre najmenej namáhané a dobre chladené ventily stacionárnych a lodných motorov. Okrem toho sa tieto ocele používajú na pružiny a rôzne pružné diely. Typickým predstaviteľom je ocel STN 41 3251 (pozri ocele pre pružiny tab. 3.31).

V druhej skupine sú ocele legované chrómom, ktoré sú pre zvýšenie odolnosti proti opalu legované ešte kremíkom do obsahu 4 %. Jedná sa o kaliteľné ocele s obsahom uhlíka okolo 0,5 %. Typickým predstaviteľom

tohto typu je oceľ STN 41 7115 a vyrábajú sa z nej menej namáhané výfukové ventily alebo ventily nasávacie.

Tretia skupina zahŕňa austenitické ocele typu CrNiMoW, prípadne CrNiMn. Tieto typy sú u nás zastúpené ocelami STN 41 7322 a STN 41 7465. Sú používané na najviac namáhané výfukové ventily.

Tab. 3.32

Chemické zloženie vybraných ocelí pre ventily spaľovacích motorov

Značka	Chemické zloženie [%]							
	C	≤ Mn	≤ Si	Cr	Ni	≤ Mo	≤ W	≤ Cu
13 251	0,42-0,52	0,80	1,90	≤ 0,30	≤ 0,40	-	-	0,30
17 115	0,40-0,50	0,80	3,50	8,0-10,0	-	-	-	0,30
17 322	0,40-0,50	0,70	0,80	12,0-15,0	12,0-15,0	0,40	2,75	0,30
17 465	0,48-0,58	10,0	0,45	20,0-22,0	3,25-4,50	-	-	-
X 45 CrSi 8	0,45	0,60	3,05	8,75	≤ 0,50	-	-	-
X 45 CrNiW 18 9	0,45	1,15	2,5	18,00	9,00	-	-	-
X 55 CrMnNiN 21 9	0,53	9,00	0,25	21	3,85	-	-	-
X 80 CrSiNi 20	0,80	0,60	2,25	20,00	1,35	-	-	-

**Ocele pre valivé ložiská.** Podľa použitia sú zaradené medzi ocele konštrukčné, napriek tomu, že ich chemické zloženie, a tým súčasne ich vlastnosti, zodpovedajú viac oceliam nástrojovým. Ocele pre valivé ložiská sú nadeutektoidné chrómové ocele so základným obsahom uhlíka okolo 1 % a s obsahom chrómu najčastejšie okolo 1,5 % (tab. 3.33). Na súčasti valivých ložísk sa však používajú aj iné ocele, napr. ocele cementačné, prípadne nehrdzavejúce a pre ložiská pracujúce pri zvýšených teplotách aj ocele rýchlorezné. Pre ložiská väčších rozmerov sa používajú modifikované ocele so zvýšenou prekaliteľnosťou, ktorá sa dosahuje pridaním mangánu a molybdénu (prvkov zvyšujúcich prekaliteľnosť). Výroba valivých ložísk prebieha vo veľkých sériách, prípadne ide o hromadnú výrobu, a z toho dôvodu ocele pre valivé ložiská musia okrem technických parametrov spĺňať i vysoké technologické nároky. Ide hlavne o dobrú a rovnomernú obráťnosť a zodpovedajúcu prekaliteľnosť pri súčasnej stabilite rozmerov hotových ložísk.

Zaťaženie, a tým i namáhanie materiálu valivých ložísk sa podstatne líši od zaťaženia a namáhania iných strojných súčastí. Pôsobiacie zaťaženie



vyvoláva dotykové napätie v bode, prípadne v dotykovej "priamke" medzi valivým elementom a vnútorným či vonkajším krúžkom ložiska. Toto dotykové napätie je premenlivé a v špičkách môže dosahovať až 3000 MPa. Medzi relatívne sa pohybujúcimi časťami ložiska vzniká v stykových miestach valivé trenie, a tým aj únavové opotrebenie, a preto ocele na valivé ložiská musia mať vysokú tvrdosť (HRC min. 60), dostatočnú húževnatosť a súčasne priaznivé oteruvzdorné vlastnosti pri vysokom premenlivom napätí.

Tab. 3.33

Chemické zloženie vybraných ocelí pre valivé ložiská

Značka	Chemické zloženie [%]					
	≤ C	≤ Mn	≤ Si	Cr	Mo	Iné
14 109	1,10	0,50	0,35	1,30-1,65	-	Cu ≤ 0,25; (Ni+Cu) ≤ 0,50
14 209	1,10	1,20	0,65	1,30-1,65	-	Cu ≤ 0,25; (Ni+Cu) ≤ 0,50
80 MoCrV40 16	0,85	0,35	0,25	3,75-4,25	4,00-4,50	V (0,90-1,10)
100 Cr 6	1,10	0,45	0,35	1,35-1,65	-	-
100 CrMo 7	1,05	0,45	0,40	1,65-1,95	0,20-0,40	-
100 CrMnMo 7	1,05	0,90	0,40	1,60-1,95	0,20-0,40	-
X 75 WCrV 18 4 1	0,80	0,40	0,40	3,75-4,50	≤0,60	V (1,00-1,25) W(17,5-19,0)
X 80WMoCrV 6 5 4	0,88	0,40	0,40	3,80-4,50	4,70-5,20	V(1,70-2,00) W (6,00-6,70)

Na ocele pre valivé ložiská sú teda kladené zvláštne požiadavky ako z hľadiska funkcie ložiska, tak z hľadiska výrobných technológií. Jednou z najdôležitejších požiadaviek, kladených na ocele pre valivé ložiská je vysoká mikročistota. Je známe, že životnosť valivých ložisk závisí od množstva, druhu, tvaru, veľkosti a rozloženia vtrúsenín a od ich fyzikálnych vlastností. Tie nekovové vtrúseniny, ktoré majú menší súčiniteľ teplotnej rozťažnosti ako základná oceľová matrica, sú pri kalení okolitou oceľou stláčané, čím vzniká vnútorné pnutie. Nekovové vtrúseniny, nachádzajúce sa na funkčných plochách ložiska, alebo v ich blízkosti, pôsobia potom ako koncentrátoři kontaktného napätia a stávajú sa zárodkami porušenia (kontaktná únava), ktoré sa šíri v závislosti od polohy vtrúsenín a nimi vyvolanej koncentrácie napätia. S narastajúcim počtom zaťažovacích cyklov

vzniká na kontaktných plochách poškodenie - pitting, ktoré pokračuje vylupovaním dotykových vrstiev ocele a končí zničením ložiska.

Na špeciálne vysokootáčkové alebo extrémne zaťažené, či zvlášť presné ložiská, sa používajú ocele pretavené (pod troskou, vo vákuu či elektrónovým lúčom). Tieto ocele majú nižší obsah a hlavne priaznivejšiu morfológiu nekovových vtrúsenín, výhodnejšie rozdelenie karbidickej fázy a nižší obsah rozpustených plynov ako ocele nepretavené. Zrovnomenie štruktúry a zvýšenie čistoty obmedzuje vznik kontaktnej únavy, a tým zvyšuje životnosť a únosnosť ložísk [52, 53, 54].

Ocele pre valivé ložiská sú dnes väčšinou vyrábané v elektrických oblúkových peciach s cieľom minimalizovať množstvo nekovových vtrúsenín, hlavne oxidických. Okrem klasického spôsobu výroby sa používajú ešte zvlášť výrobné pochody, napr. pretavovanie pod troskou. Pretavovanie prebieha v elektrotroskovej peci, kde pretavovaná elektróda (vyrobená klasickým hutným procesom) je jedným koncom ponorená do zvlášť vyrobenej syntetickej trosky s vysokým elektrickým odporom.

Elektródou, troskou a pretaveným kovom prechádza striedavý elektrický prúd, ktorý trosku ohrieva na vyššiu teplotu ako je teplota tavenia ocele. Ponorený koniec elektródy sa postupne odtavuje a kvapky ocele prechádzajú roztavenou troskou, v ktorej sa rafinujú. Oceľ odkvapkáva do medeného vodou chladeného kryštalizátora a tvorí pomerne plytkú vrstvu tekutého kovu, ktorý postupne tuhne tak, ako ingot pribúda smerom nahor.

Ocele pretavené pod troskou sa používajú pre funkčne náročné ložiská a vyznačujú sa:

- zvýšením makročistoty a mikročistoty;
- zvýšením homogenity chemického zloženia, a tým aj mikroštruktúry;
- znížením obsahu síry a rozpustených plynov;
- zlepšením hustoty a podstatným znížením pórovitosti;
- zlepšením izotropie mechanických vlastností a zvýšením plasticity;
- zvýšením odolnosti proti kontaktnej únave.

### 3.7 Ocele pre špeciálne pracovné podmienky

**Antikorózne ocele.** Táto skupina zahŕňa legované ocele s chemickým zložením, ktoré zaručuje ich odolnosť voči korózii v rôznych pracovných prostrediach. Vzhľadom na to, že majú pomerne vysoký obsah drahých

legujúcich prvkov a vyžadujú i energeticky náročný spôsob výroby, ich využitie musí byť racionálne a ekonomické. Pre správnu voľbu ocele je preto bezpodmienečne nutná dôkladná znalosť vlastností materiálu vo vzťahu k podmienkam ich použitia. Optimálna voľba ocelí pre náročné podmienky v agresívnych prostrediach, najmä pri nových technológiách v chemickom a potravinárskom priemysle, vyžaduje hlbšie vedomosti, prípadne experimentálne overenie v modelových podmienkach blízkyh pracovnému zaťaženiu.

Korózna odolnosť koróziivzdorných materiálov je daná vytvorením ochrannej pasivačnej vrstvy na ich povrchu. Pasivačná vrstva oxidického charakteru je sústavne prostredím rozrušovaná, ale súčasne i obnovovaná. Čím vyššiu odolnosť proti narušeniu má pasivačná vrstva, tým vyššiu odolnosť proti koróznemu napadnutiu má daná oceľ. Intenzita korózneho napadnutia závisí od vlastnosti kovu a od vlastností prostredia. Vzhľadom na množstvo týchto kombinácií, stretávame sa s mnohými prejavmi korózneho napadnutia [56].

*Všeobecná korózia* napáda kovy, ktoré nemajú schopnosť pasivovať sa alebo inak chrániť. Korózia napáda rovnomerne celý povrch. Rovnomernosť určuje homogenita kovu, charakter korózných spodín a agresivita prostredia. Ocele odolné korózii by mali mať korózne produkty nerozpustné, neporézne a priľnavé, aby chránili povrch pred ďalším napadnutím [56].

*Bodová, štrbinová a nožová korózia* sú charakterizované tým, že napádajú iba malú plochu, ale postupujú intenzívne do hĺbky. Sú to „úskočné“ typy korózie vzhľadom na to, že rýchlosť po naštartovaní je nepredvídateľná. Napádajú hlavne materiály, ktoré vytvárajú pasivačnú vrstvu. Vzniká vtedy, ak niektoré ióny korózneho média majú schopnosť preniknúť pasivačnou vrstvou ocele (najčastejšie ju spôsobujú chloridy) [56].

*Mikrobiálna korózia* je vyvolaná činnosťou mikroorganizmov a môže sa vyskytovať v prostrediach s pH 4 až 8,5 pri teplotách 10-50 °C (niekedy až do 150 °C) [56].

*Medzikryštálová korózia* je charakterizovaná tým, že sa šíri po hraniciach zŕn. Je veľmi nebezpečná, pretože na povrchu je ťažko viditeľná a často spôsobuje úplnú degradáciu a poškodenie. Vzniká v dôsledku vylučovania precipitátov na hraniciach zŕn, čím sa zmení koncentrácia prvkov na hranici, a tým poklesne odolnosť proti korózii. Najčastejšími nežiaducimi fázami sú karbidické a nitridické precipitáty, vznikajúce spravidla pri tepelnom spracovaní a namáhaní ocele [56].

*Korózne praskanie* môžeme definovať ako krehké porušenie pri nízkom konštantnom napätí v koróznom prostredí. Citlivosť na korózne praskanie ovplyvňujú metalurgické faktory (chemické zloženie, vnútorné napätia, nehomogenita, stupeň deformácie) a elektrochemické faktory (elektrochemický potenciál, pasivačná schopnosť, korózne prostredie). Korózne praskanie môže byť iniciované buď vznikom trhliny v mieste rozpúšťania kovu, alebo vznikom vodíka pri katódovej reakcii, ktorá v atomárnom stave preniká do kovu, hromadí sa v ňom a rekombinuje na molekulárny  $H_2$ . Molekulárny vodík iniciuje potom trhlinu [56]. Korózne praskanie môže prebiehať transkryštalicky alebo interkryštalicky.

*Korózna únava* vzniká pri cyklickom zaťažovaní kovu v koróznom prostredí. Iniciačným miestom je dno koróznej jamky, kde sa pri namáhaní vytvoria extrúzie a intrúzie, ktoré sú reaktívne rozpúšťané. Toto miesto sa potom stáva zárodkom trhliny. Výskyt trhlín je v oboch prípadoch podmienený prítomnosťou chloridových iónov v prostredí.

*Vibračná korózia a kavitácia* sú špecifickými druhmi korózie. Pri kavitácii dochádza k lokálnemu napadnutiu (vytrhávaniu) častíc ocele z jej povrchu. Príčinou tohto porušenia sú rázy v rýchle prúdiacej kvapaline, vznikajúce tvorbou a zánikom bublín. Menej častým druhom korózie pri koróziivzdorných oceliach je korózia vibračná. Vzniká na styčných plochách nalisovaných častí, ktoré vzájomne kmitajú pri vysokom mernom tlaku a prejavuje sa červenohnedými koróznymi produktmi [56].

Základom koróziivzdorných ocelí sú rovnovážne diagramy binárne (Fe-Cr, Fe-Ni, Ni-Cr), ternárne (Fe, Cr-C, Fe-Cr-Ni) a kvadrálne (Fe-Cr-Ni-C). Rozdelenie koróziivzdorných ocelí do skupín podľa ich štruktúry vidieť na obr.3.11 a podľa koncentrácie chrómu a niklu na obr. 3.12. Základné charakteristiky týchto ocelí sú uvedené v tab. 3.34.

Za rozhodujúce vlastnosti koróziivzdorných ocelí všetkých typov možno považovať mechanické vlastnosti pri normálnych a zvýšených teplotách, vrubovú húževnatosť, polohu prechodovej teploty, pevnostné vlastnosti pri dlhodobej expozícii pri prevádzkovej teplote, štruktúrnu stabilitu zaisťujúcu odolnosť proti krehnutiu, vzniku trhlín a ich šíreniu a najdôležitejšia vlastnosť – odolnosť proti všetkým druhom korózie [57]. Pre použitie koróziivzdorných ocelí sú rozhodujúce aj ich technologické vlastnosti, najmä zvárateľnosť. Koróziivzdorné ocele sa môžu zvärať plameňom, elektrickým oblúkom, ale aj odporovo, na tupo, bodovo a šovo. Ich zváranie je náročné, pretože sa líšia od nízkolegovaných ocelí nižšou teplotou tavenia, menšou tepelnou vodivosťou a omnoho väčším merným

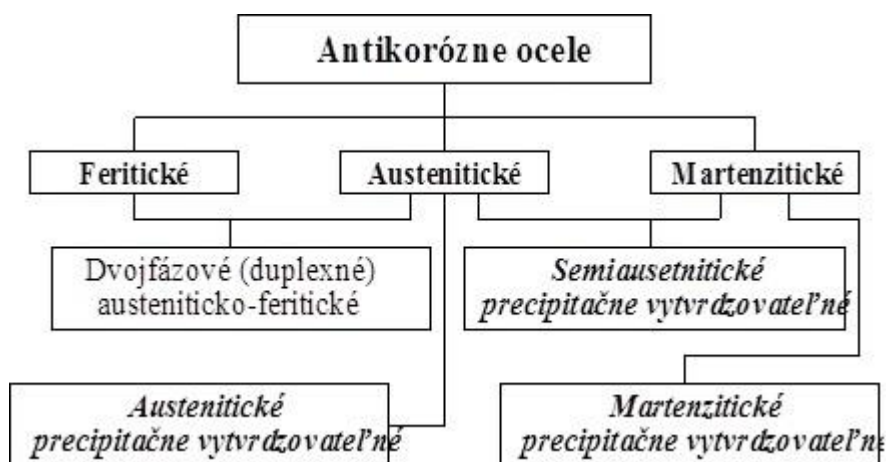
elektrickým odporom. Najobtiažnejšie sa zvárajú martenzitické ocele kaliteľné na vzduchu, ktoré vyžadujú predohrev na 300 – 400 °C a bezprostredne po zvarení dodatočné vyžihanie pri teplote 600 – 700 °C.

Tab. 3.34

Základné charakteristiky koróziivzdorných ocelí

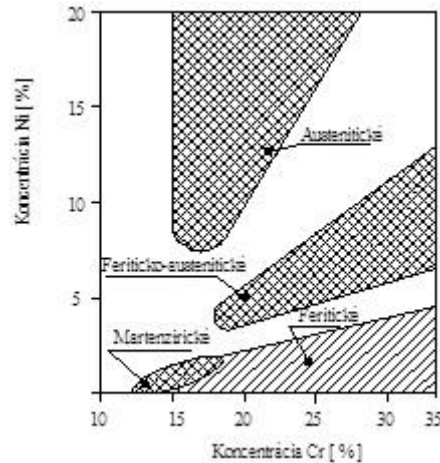
Parameter	Koróziivzdorné ocele					Uhlíková oceľ 12 022
	Austenitické	Feritické	Dvoj- fázové	Marten- zitické	Precipitačne spevnené	
$R_e, R_{p0.2}$ [MPa]	200-400	250-400	350-500	550-1800	500-1700	235-255
$R_m$ [MPa]	500-800	500-700	700-900	750-2000	950-1800	441-568
$A_5$ [%]	30-40	20-30	30-40	2-20	2-20	21
$Z$ [%]	55-70	40-60	50-60	5-55	10-40	-
KCV [Jcm <sup>-2</sup> ]	120-250	20-50	50-230	5-120	5-80	KCU <sub>3</sub> – 59
$\alpha$ [10 <sup>-6</sup> m/m°C]	17-19,2	11,2-12,1	-	11,6-12,1	1,19	11,7
$\gamma$ [W/mK]	18,7-22,8	24,4-26,3	-	28,7	21,8-23,0	47
$\rho$ [10 <sup>-8</sup> Ωm]	69-102	59-67	-	55-72	77-102	12
$T_t$ [°C]	1400-1450	1480-1530	-	1480-1530	1400-1530	1538

$\alpha$  - koeficient tepelnej rozťažnosti,  $\gamma$  - tepelné vodivosť,  $\rho$  - elektrický odpor,  
 $T_t$  – teplota topenia.



Obr. 3.12. Rozdelenie antikorózných ocelí podľa štruktúry

Austenitické ocele sa zvárajú podstatne lepšie a ľahšie, zvarový kov je však náchylný na praskanie za horúca. Vzniku trhlín vo zvare možno zabrániť použitím prídavných materiálov a podielom feritu asi 4 – 6 %.

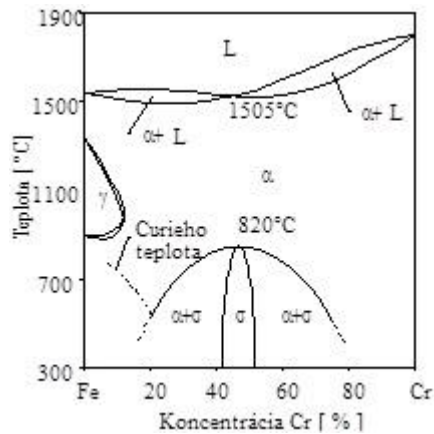


Obr. 3.13. Základné koncentračné oblasti koróziivzdorných ocelí

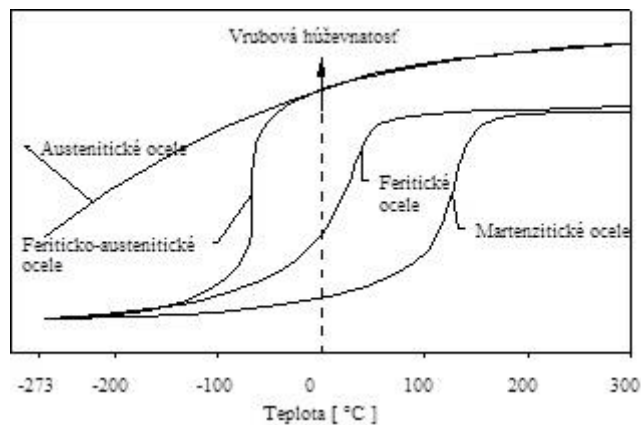
*Feritické ocele odolné korózii* (FOOK) sú zliatiny typu Fe-Cr-C, charakterizované obsahom uhlíka pod 0,1 % a chrómu od 10,5 do 30 %. Prísady ďalších feritotvorných prvkov (Mn, Mo, Al) potláčajú oblasť  $\gamma$  a z toho dôvodu sa nedajú tepelne spracovávať cez alotropickú premenu  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Feritické ocele vykazujú feritickú štruktúru (v celom intervale teplôt) s malým množstvom karbidov (obr. 3.14). Ich pevnostné vlastnosti možno zvýšiť deformáciou za studena. Pri spracovaní feritických ocelí je nutné rešpektovať tri druhy krehnutí, a to pri vysokých teplotách asi od 900 °C, ale hlavne nad 1000 °C, potom krehnutie vylučovaním fázy  $\sigma$  (pri teplotách okolo 700 °C) a krehnutie v oblasti teplôt okolo 475 °C. Intenzita krehnutia vylučovaním fázy  $\sigma$  závisí od chemického zloženia a času zotrvania na kritickej teplote. Krehnutie pri teplote 475 °C spôsobuje dekompozícia tuhého roztoku FeCr na zmes fáz  $\gamma$  a  $\gamma'$  ( $\gamma$  je bohatá na Fe a  $\gamma'$  je bohatá na Cr). Týmto trom oblastiam sa musíme vyhnúť, a preto sa v praxi najlepšie osvedčuje žihanie pri 780 – 800 °C s riadeným ochladzovaním.

Pri izbovej a zníženej teplote vykazujú feritické ocele nízku vrubovú húževnatosť, pretože oblasť prechodu od húževnatého ku krehkému lomu leží medzi 0 až 200 °C (obr. 3.15). Príklady feritických ocelí sú uvedené v tab. 3.35. Tento nedostatok možno odstrániť znížením obsahu uhlíka

a dusíka (17 158). V porovnaní s austenitickými majú feritické ocele vysokú tepelnú vodivosť a nižší súčiniteľ dĺžkovej rozťažnosti a lepšie odolávajú nízkocyklovej tepelnej únave. Významným znížením obsahu uhlíka a dusíka (pod 0,01-0,02 %) boli v poslednom období vyvinuté feritické ocele ELI (Extra Low Interstitials) s veľmi nízkym obsahom vtrúsenín. Vyrábajú sa na báze 18Cr-2Mo alebo 26Cr-1Mo a bývajú stabilizované karbidotvornými prvkami Ti a Nb. Ocele typu ELI majú zvýšenú húževnatosť a odolnosť proti jamkovej a medzikryštálovej korózii [52, 58, 59].



Obr. 3.14. Binárny diagram Fe – Cr

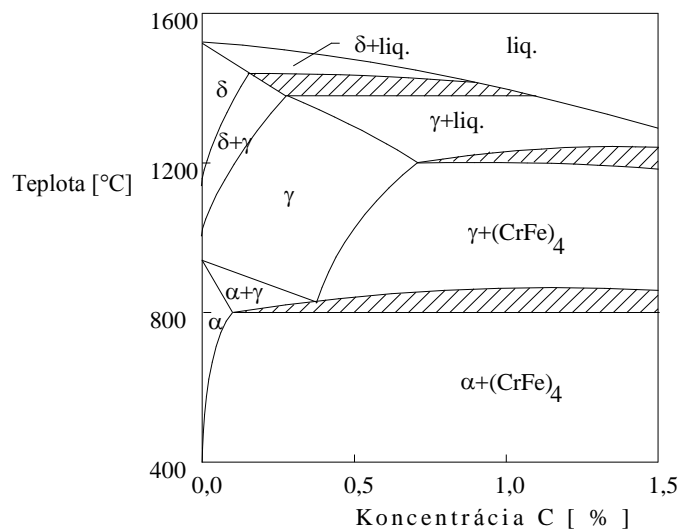


Obr. 3.15. Porovnanie polohy tranzitnej teploty koróziivzdorných ocelí v závislosti od ich štruktúry

Pri určitom zložení a spracovaní majú chrómové ocele pri vyšších teplotách zmiešanú štruktúru feritu a austenitu, ktorý je schopný premeny na martenzit. Získame tak poloferitické ocele so zmesou vlastností kaliteľných i feritických chrómových ocelí.

Ďalšou zvláštnou skupinou sú feriticko-karbidické ocele s obsahom 22-30 % chrómu. Patria viac do skupiny žiaruvzdorných ocelí vzhľadom na to, že odolávajú teplotám až do 1100 (1200) °C.

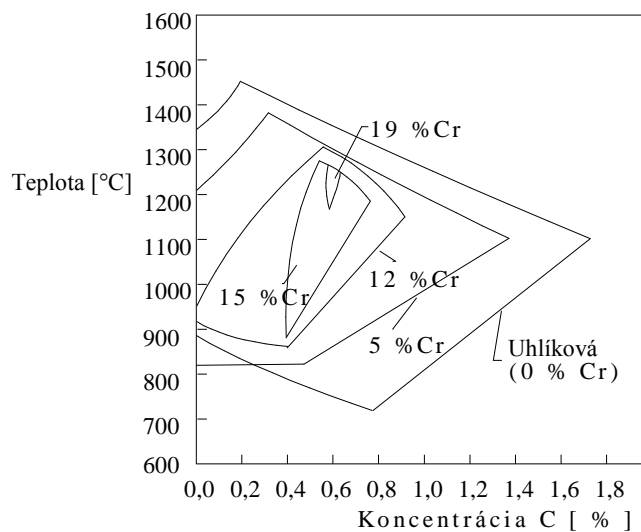
*Martenzitické (kaliteľné) ocele odolné korózii* sú charakterizované premenou austenitu na martenzit. Sú to osvedčené základné typy, ktoré možno nájsť v sortimente koróziivzdorných ocelí všetkých technicky vyspelých zemí. Schopnosť kalenia chrómových ocelí je daná prítomnosťou vyššieho obsahu uhlíka do 1,2 % pri obsahu chrómu od 11,5 do 18 %. Zvýšenie koróznej odolnosti sa dosiahne pridaním Mo a húževnatosti pridaním Ni (znižuje obsah voľného feritu). Tieto ocele sa vyznačujú schopnosťou prekonávať alotropickú premenu  $\gamma \rightarrow \alpha$ , ktorá pri bežných rýchlostiach ochladzovania vedie takmer vždy k martenzitickej štruktúre. Pre lepšiu orientáciu je na obr. 3.16 uvedený pseudobinárny fázový diagram chrómovej (12 % Cr) koróziivzdornej ocele. Prísada chrómu znižuje oblasť  $\gamma$ , znižuje eutektoidnú koncentráciu uhlíka na ~ 0,35 % a znižuje maximálnu rozpustnosť uhlíka v austenite na 0,7 %. Prísada chrómu tiež zvyšuje eutektoidnú teplotu a prekaliteľnosť ocele natoľko, že aj pri ochladení na voľnom vzduchu (aj pre veľké hrúbky) sa získa martenzitická štruktúra.



Obr. 3.16. Pseudobinárny fázový diagram koróziivzdorných ocelí s 12 % Cr



Vplyv rozdielneho obsahu chrómu a uhlíka na výskyt  $\gamma$ -oblasti je znázornený na obr. 3.17. Pri obsahoch chrómu nad 15 % sa môže získať martenzitická štruktúra iba pri obsahu uhlíka nad 0,4 %. Konštitúciu CrNi ocelí pre rozličné obsahy chrómu a feritotvorných prísad, ako aj niklu a austenitotvorných prísad, charakterizuje Schäfflerov diagram na obr. 3.18. Do chrómového ekvivalentu sú zahrnuté prísady Cr, Mo, Si, Nb, do niklového ekvivalentu Ni, C, Mn, resp. N. Maximálna tvrdosť chrómových ocelí je úmerná obsahu uhlíka do asi 0,60 %. Pri vyšších obsahoch sa už uhlík môže viazať na primárne karbidy, ktoré zvyšujú najmä odolnosť proti opotrebeniu.

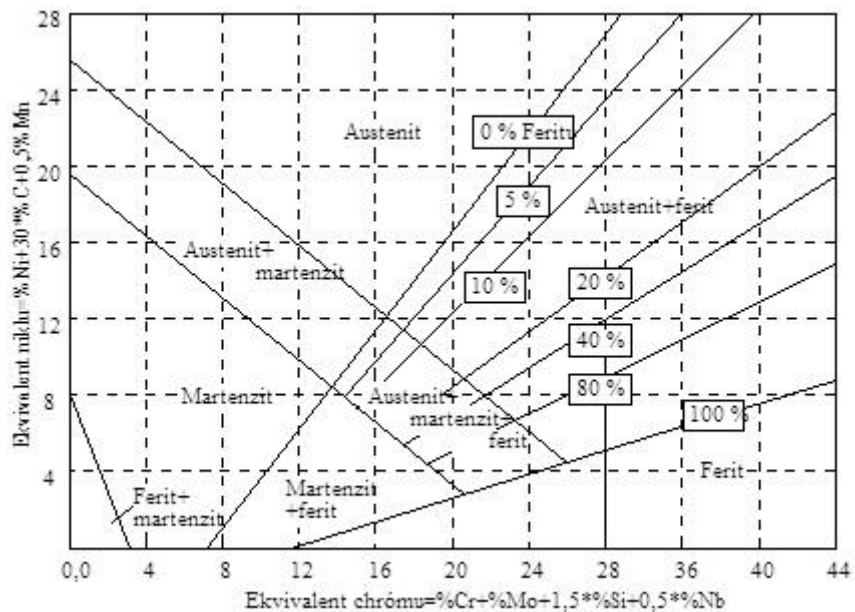


Obr. 3.17. Vplyv obsahu chrómu a uhlíka na austenitickú oblasť

Mechanické vlastnosti kaliteľných ocelí je možné meniť v relatívne širokom rozmedzí v závislosti od tepelného spracovania – zušľachtenia, rovnako ako u iných kaliteľných konštrukčných alebo nástrojových ocelí. Na zlepšenie plastických vlastností sa popúšťajú. Uplatnenie nachádzajú v parných a plynových turbínach, v chemickom priemysle, na chirurgické nástroje, pružiny, ozubené kolesá a ložiská [52, 57, 58, 59]. V tab. 3.36 sú uvedené niektoré martenzitické koróziivzdorné ocele.

Okrem martenzitickej matrice sa v týchto oceliach nachádza aj karbidická fáza. Najviac je zastúpený chrómom legovaný cementit  $M_3C$ , prípadne karbid  $Cr_3C$  izomorfný (vytvára rovnakú kryštálovú mriežku) s cementitom. Okrem nich sa vyskytuje aj karbid  $Cr_{23}C_6$  a po dlhodobom žíhaní aj karbid  $Cr_7C_3$ . Martenzitické ocele s prísadou molybdénu a vanádu majú schopnosť

vylučovať pri žíhaní precipitáty  $\text{Mo}_2\text{C}$  a VC, čo vedie k sekundárnemu precipitačnému vytvrdeniu. Pre klasické chrómové martenzitické ocele je teplota  $M_s = 300\text{-}350\text{ }^\circ\text{C}$  a  $M_f = 150\text{-}180\text{ }^\circ\text{C}$ .



Obr. 3.18. Schäffelerov konštitučný diagram pre koróziivzdorné ocele

Tab. 3.35

Vybrané antikoročné ocele feritické [52, 53]

Značka	Chemické zloženie [%]								
	≤ C	≤ Mn	≤ Si	≤ P	≤ S	Cr	Ni	Mo	Ostatné
17 020	0,08	0,90	0,70	0,040	0,035	12,0-14,0	-	-	-
17 040	0,10	0,90	0,70	0,040	0,035	16,0-18,5	≤0,60	-	poloferitická
17 158	0,03	1,00	1,00	0,035	0,030	17,0-20,0	≤0,50	1,80-2,30	Ti (0,4-0,7) N≤0,035
1Cr17Mo	0,12	1,00	1,00	0,035	0,030	16,0-18,0	≤0,060	0,75-1,25	-
1Cr19Al3	0,10	1,00	1,50	0,035	0,030	17,0-21,0	≤0,60	-	Al (2,00-4,00)
2Cr25N	0,20	1,00	1,50	0,040	0,030	23,0-27,0	-	-	N≤0,25

Vybrané antikoročné ocele martenzitické [52, 53]

Značka	Chemické zloženie [%]						
	C	Mn max.	Si max.	Cr	Ni	Mo	Ostatné
17 021	≤0,15	0,90	0,70	12,0-14,0	-	-	-
17 024	0,36-0,45	0,90	0,70	12,0-14,0	-	-	-
17 027	0,15-0,25	0,90	0,70	14,0-16,0	-	-	-
17 029	0,40-0,50	0,90	0,70	14,0-16,0	-	-	-
17 031	0,90-1,05	1,20	0,40	13,0-15,0	-	-	-
17 042	0,90-1,05	0,90	0,70	16,0-18,0	-	-	-
8Cr20Si2Ni	0,75-0,85	0,20-0,60	1,75-2,25	19,0-20,5	1,15-1,65	-	Cu 0,30
1Cr17Ni2	0,11-0,17	≤0,80	≤0,80	16,0-18,0	1,50-2,50	-	Cu ≤0,30

*Austenitické ocele odolné korózii* majú dominantné postavenie v skupine koróziivzdorných ocelí. Austenitická štruktúra týchto ocelí je výsledkom chemického zloženia, ktoré musí byť volené tak, aby sa dosiahla rovnováha medzi austenitotvornými (Mn, Ni) a feritotvornými prvkami. Teplota  $M_s$  je potlačená hlboko pod teplotu okolia. Austenitické ocele sú zväťateľné a majú približne o 50 % vyššiu tepelnú rozťažnosť, lepšiu húževnatosť a ťažnosť a približne o 30 % menšiu tepelnú vodivosť ako feritické ocele odolné korózii. Je to dané ich austenitickou štruktúrou, ktorá má kubickú plošne centrovanú mriežku (K12). Niektoré austenitické ocele si vynikajúcu húževnatosť zachovávajú aj pri kryogénnych teplotách (pozri Ocele pre prácu pri nízkych teplotách).

Pri obsahu 18 % chrómu, ktorý je z hľadiska koróziivzdornosti základným prvkom, postačí už 9 % niklu na dosiahnutie stabilnej austenitickej štruktúry pri obsahu uhlíka 0,10 až 0,12 %. Pri ďalšom znížení obsahu uhlíka sa musí počítať so zvýšením obsahu niklu, aby bola zachovaná stabilita austenitu. Takisto zvýšenie obsahu molybdénu a pridanie ďalších feritotvorných prvkov, ako kremíka, titánu a nióbu, je potrebné vyvážiť príslušným zvýšením obsahu niklu, príp. iného austenitotvorného prvku [57].

Najdôležitejšiu a súčasne najrozšírenejšiu skupinu koróziivzdorných austenitických ocelí predstavujú Cr-Ni a Cr-Ni-Mo ocele, stabilizované (titánom, niómom, menej vanád, zirkón a tantal) alebo nestabilizované,

vrátane typov s veľmi nízkym obsahom uhlíka. Zvýšená odolnosť proti korózii a zvýšenie pevnosti sa dosiahne prísadou molybdénu. (pozor – molybdén, titán, niób a vanád sú feritotvorné prísady – obsah  $\delta$  feritu v austenitických oceliach môže dosiahnuť hodnotu až 8 %). Veľmi dôležitú úlohu hrá v austenitických oceliach kremík. S rastúcim obsahom kremíka rastie oxidačná a nauhličovacia odolnosť ocele pri vyšších teplotách a znižuje viskozitu taveniny [52]. Chemické zloženie niektorých koróziivzdorných austenitických ocelí je uvedené v tab. 3.37.

Tab. 3.37

Vybrané antikoročné ocele austenitické [52, 53]

Značka	Chemické zloženie [%]						
	$\leq C$	$\leq Mn$	Si	Cr	Ni	Mo	Ostatné
17 240	0,07	$\leq 2,00$	1,00	17,0-20,0	9,0-11,5	-	-
17 246	0,21	$\leq 2,00$	1,00	17,0-20,0	8,0-11,0	-	Ti $\geq 5x(\%C-0,03)$
17 252	0,12	$\leq 1,50$	1,50	19,0-22,0	36,0-40,0	4,50-6,50	
17 257	0,03	$\leq 2,00$	0,60	23,0-26,0	19,0-22,0	-	Nb(0,15-0,3); N(0,12-0,22)
17 359	0,03	$\leq 2,00$	1,00	16,5-18,5	11,0-13,5	2,00-2,50	N(0,12-0,22)
1Cr17Mn6Ni5N	0,15	5,50-7,50	1,00	16,0-18,0	3,50-5,50	-	N $\leq 0,25$
1Cr18Ni9Ti	0,12	$\leq 2,00$	1,00	17,0-19,0	8,00-11,0	-	Ti $5x(\%C-0,02)$

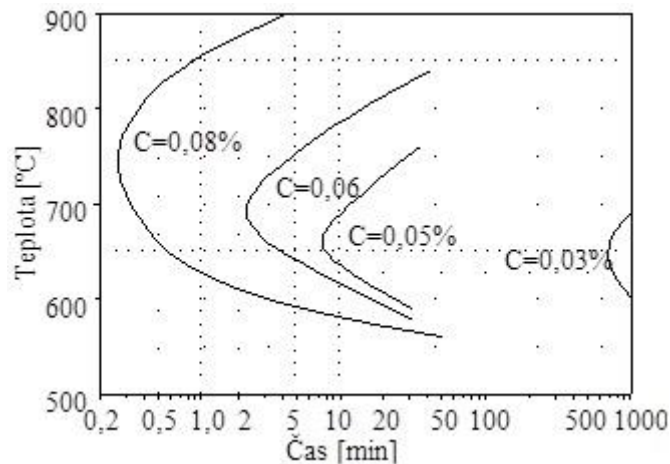
Austenitické ocele majú veľmi široké uplatnenie (energetika, chemický priemysel, potravinárstvo, letecká a raketová technika, kryogénna technika) vzhľadom na to, že svoje vlastnosti si zachovávajú v širokom rozsahu teplôt. Vyznačujú sa malou tepelnou vodivosťou, vysokým súčiniteľom teplotnej rozťažnosti a paramagnetickými vlastnosťami. Zhoršená obrábatelnosť sa dá zlepšiť prísadou síry alebo selénu (0,15%).

Obmedzenie medzikryštálovej korózie sa dosiahne stabilizáciou pomocou titánu alebo nióbu (príp. aj vanádom). Titán a niób viažu uhlík vo forme stabilných karbidov, ktoré sa nevyučujú prednostne na hraniciach zrn (na rozdiel od karbidov chrómu). Obmedzenie medzikryštálovej korózie možno docieľiť aj znížením obsahu uhlíka pod 0,02 %. Pokles odolnosti Cr-Ni koróziivzdorných ocelí proti medzikryštálovej korózii v závislosti od obsahu uhlíka dokumentuje obr. 3.19. Čiastočné obmedzenie medzikryštálovej korózie sa dosiahne tepelným spracovaním (ohrev na teplotu  $\approx 1100$  °C -

rozpustenie karbidov - s následným rýchlym ochladením). Náchylnosť na interkryštalovú koróziu pri zvýšených teplotách však naďalej trvá.

Do skupiny austenitických ocelí patria i Cr-Mn ocele, ktoré majú nižšiu odolnosť proti korózii a z toho dôvodu nie sú určené pre korózne vysokomamáhané zariadenia [52].

Austenitické chrómnikové ocele možno na rozdiel od chrómových ocelí použiť nie len v pasívnom, ale i v aktívnom stave. Neoxidujúce kyseliny, napr. kyselina chlorovodíková a chloridové ióny pôsobia na koróziivzdorné ocele veľmi zhubne. Isté zvýšenie odolnosti proti chloridovým iónom a iným aktívnym prostrediam (napr. redukčne pôsobiacim kyselinám ) sa získa prídavkom 2,0 až 3,5 % i viac molybdénu. Ocele bohatšie legované niklom a molybdénom vykazujú zlepšenú odolnosť v aktívnom stave proti kyseline sírovej stredných a vyšších koncentrácií, a to aj za tepla, a ďalej zvýšenú odolnosť napr. proti močovine, kyseline fosforečnej a chlorovodíkovej. Ocele s vyšším obsahom niklu vynikajú štruktúrnou stabilitou, pretože sa v nich netvorí pri teplotách 750 až 850 °C krehká fáza  $\sigma$  (pri spracovaní alebo prevádzke pri vyšších teplotách). Táto fáza nielenže znižuje ťažnosť, ale môže zhoršiť i koróziivzdornosť a vyvolať selektívnu koróziu (obr. 3.14) [52, 58].



Obr. 3.19. Závislosť medzikryštalovej korózie ocele typu Cr18Ni9 od obsahu uhlíka a času v roztoku  $\text{CuSO}_4/\text{H}_2\text{SO}_4$  pri teplote varu

*Dvojfázové (duplexné) feriticko-austenitické ocele odolné korózii* (Dual Phase) majú zmiešanú mikroštruktúru, ktorá sa skladá zo 40-80 % feritu a zvyšok tvorí austenit (obr. 3.18). Obsahujú 18–27 % Cr, okolo 5 % Ni a bývajú dolegované molybdénom. Dvojfázové ocele sú mierne magnetické a nedajú sa spevňovať tepelným spracovaním. Pri dostatočne jemnozrnej štruktúre (3-10 μm) sú pri teplote okolo 950 °C superplastické s ťažnosťou až 500 % ťažnosť [52, 57].

Proti vrubovým účinkom sú odolnejšie ako feritické ocele a aj tranzitná teplota je posunutá v niektorých prípadoch až k –100 °C. Feriticko-austenitické ocele majú vyššiu pevnosť ako čisto feritické a čisto austenitické ocele. Zvárateľnosťou sa blížia k austenitickým oceliam. Ich nevýhodou je, že sú náchylné na skrehnutie pri 475 °C vytváraním γ' fázy. Vzhľadom na ich výhodné vlastnosti (pevnostné, korózne, technologické) venuje sa im pomerne veľká pozornosť a dá sa očakávať ich renesancia.

*Dvojfázové (duplexné) martenziticko-austenitické ocele odolné korózii* majú zmiešanú mikroštruktúru, ktorá sa skladá zo 65-80 % vysokopopusteného martenzitu a zvyšok tvorí stabilizovaný austenit. Tieto ocele boli vyvinuté hlavne pre stavbu vodných turbín. Obsahujú približne 0,04-0,08 % C, 13-16 % Cr, 4-6 % Ni a 1-2 % Mo. Pri kalení (do oleja z teploty cca 1000 °C) sa vytvorí martenzitická štruktúra s určitým obsahom zvyškového austenitu, ktorý sa po popustení stabilizuje a ani pri teplote 20 °C netransformuje na martenzit (obr. 3.18) [57]. Chemické zloženie niektorých koróziivzdorných duplexných ocelí je uvedené v tab. 3.38.

Tab. 3.38

Vybrané antikorózne ocele dvojfázové (duplexné) [52, 53]

Značka	Chemické zloženie [%]						
	≤ C	≤ Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Ostatné
17 254	0,12	1,20	≤0,80	19,5-22,0	4,50-5,80	-	Ti (0,30-0,60)
00Cr18Ni5MoSi2	0,03	2,00	1,30-2,00	18,0-19,5	4,50-5,50	2,50-3,00	-
0Cr26Ni5Mo2	0,08	1,50	≤1,00	23,0-26,0	3,00-6,00	1,00-3,00	
1Cr18Ni11Si4AlTi	0,18	0,80	3,40-4,00	17,5-19,5	10,0-18,0	-	Al(0,1-0,3); Ti(0,4-0,7)
00Cr24Ni6Mo3N	0,03	1,50	≤1,00	22,0-26,0	4,50-7,50	2,50-4,00	N(0,08-0,3)

**Vytvrditeľné antikoročné ocele.** Disperzne spevnené nehrdzavejúce ocele sú charakteristické vysokou pevnosťou pri prijateľnej húževnatosti a korózne odolnosti. Medzi ich nevýhody patrí: vysoká cena, náchylnosť na tepelné krehnutie, problematické dodržanie vysokej pevnosti v zvaroch, častá anizotropia vlastností a náchylnosť ku koróznemu praskaniu pod napätím. Ide o vývojové typy používané v leteckom priemysle, raketovej technike a na súčasti jaderných reaktorov. Príklady chemického zloženia sú v tab. 3.39. Vytvrditeľné antikoročné ocele možno podľa štruktúry matrice rozdeliť do troch skupín:

- martenzitické vytvrditeľné ocele s prevažne martenzitickou maticou po ochladiení (príklad: 17-4-Cu);
- semiaustenitické vytvrditeľné ocele s maticou tvorenou po ochladiení prevažne zvyškovým austenitom (príklady: 17-7-Al, 17-4-Mo);
- austenitické vytvrditeľné ocele (príklady: A-286, CG-27) s maticou stabilného austenitu. Matrice sú vo všetkých prípadoch disperzne spevnené intermediárnymi fázami.

Tab. 3.39

Chemické zloženie vytvrditeľných antikoročných ocelí

Značka	Chemické zloženie (%)										
	C	Cr	Ni	Mo	Al	Ti	Cu	Nb	V	N	B
17-4-Cu	0,07	17	5				3,0	0,5			
17-7-Al	0,05	17	7		1,0						
17-4-Mo	0,08	16,5	4	3,0						0,1	
A-286	0,05	15	15	1,5	0,3	2,0			0,25		0,005
CG-27	0,05	13	13	5,7	1,6	2,5		0,7			0,010

*Martenzitické vytvrditeľné ocele.* Ich chemické zloženie je volené tak, aby v nich prebiehal pri ochladzovaní úplný rozpad austenitu na martenzit, t. j. aby bola teplota  $M_f > 20$  °C. Po transformácii tvorí maticu martenzit a malé množstvo zvyškového austenitu. Označujú sa tiež ako ocele s priamou martenzitickou premenou. Obsah uhlíka je nízky, aby ocele mali dostatočnú húževnatosť a boli dobre zvariteľné. Základnou prísadou je Cr (13-17 %), ďalej ocele obsahujú Ni (5-8 %) alebo Co (do 20 %) a ďalšie prísady, vytvárajúce disperzne spevňujúce fázy (Cu, Mo, Al, Nb alebo V). Obvyklé tepelné spracovanie pozostáva z kalenia z 950-1050 °C na vzduchu a

starnutia pri 450-650 °C (asi 4 h). Po tepelnom spracovaní sa pohybuje medza klzu medzi 600 až 1500 MPa, pevnosť v ťahu medzi 900 až 1700 MPa, pričom ťažnosť zostáva vyššia ako 12 %. Ocele si zachovávajú dobré plastické vlastnosti až do teploty -70 °C.

*Semiaustenitické vytvrditeľné ocele.* Ich chemické zloženie je volené tak, aby po rýchlom ochladení z teploty rozpúšťacieho žihania mala matrica štruktúru metastabilného austenitu, t. j. aby teplota  $M_s < 20$  °C. Sú to ocele Cr-Ni (15-17 % Cr, 4-8 % Ni), zvyčajne s prísadou Mo (do 3 %) a prísadami, spôsobujúcimi disperzné spevnenie (Al, Ti, Cu, Nb, N). Martenzitická transformácia prebieha v týchto oceliach po destabilizácii austenitu, t. j. po výdrži pri záporných teplotách alebo pri zvýšených teplotách a nasledujúcom zmrazovaní. Obvyklé tepelné spracovanie semiaustenitických ocelí pozostáva z rozpúšťacieho žihania, zmrazovania a starnutia pri 450-550 °C. Výsledná štruktúra je, rovnako v predchádzajúcej skupine, tvorená disperzne spevneným martenzitom. Preto sa niekedy označujú ako ocele s nepriamou martenzitickou premenou. Základným typom v tejto skupine je oceľ 17-7-Al, ktorá po ochladení z teploty 950 až 1075 °C má takmer austenitickú matricu. Martenzitická transformácia prebieha po podchladení austenitu pri teplote -75 °C alebo po výdrži na teplote 500 až 550 °C. Oceľ 17-4-Mo má po rozpúšťacom žihaní v matrici asi 20 % feritu delta. Vytvrdzuje sa pri teplote 450 až 550 °C. Po úplnom tepelnom spracovaní (t. j. po rozpúšťacom žihaní, zmrazovaní a vytvrdzovaní) má oceľ 17-4-Mo medzu klzu asi 1200 MPa. Zachováva si dobré plastické vlastnosti aj pri kryogénnych teplotách.

*Austenitické vytvrditeľné ocele.* Ich chemické zloženie je volené tak, aby štruktúru tvoril stabilný austenit. Obsahujú preto vysoký obsah niklu (min. 25 %), pri obsahu chrómu zabezpečujúcom požadovanú odolnosť proti korózii (12-18 %). V súčasnosti sa používajú z hľadiska chemického zloženia dve základné skupiny týchto ocelí: a) obsahujúce cca 25 % Ni s malou prísadou Mo (do 1,5 %) a Al (do 0,3 %); b) obsahujúce cca 40 % Ni s vysokou prísadou Mo (okolo 6 %) a Al (0,8-1,6 %). Obe skupiny (okrem Ni, Cr, Mo, Al) obsahujú 2-3 % Ti a malé prísady ďalších prvkov, ktoré zvyšujú tvárnosť za tepla (B, Nb). Nízky obsah uhlíka zabezpečuje vysokú húževnatosť a je žiadúci aj z hľadiska odolnosti proti interkryštalickej korózii. Austenitické vytvrditeľné ocele majú vyššiu odolnosť proti korózii, ako oba predchádzajúce typy, ich pevnosť je však nižšia, pri niektorých je aj pod 1500 MPa. Tepelné spracovanie pozostáva z rozpúšťacieho žihania pri teplote 950 až 1200 °C, ochladenia vo vode a precipitačného vytvrdzovania



pri teplote 500 až 800 °C. Chemické zloženie je zvolené tak, aby austenit zostal stabilný aj po vytvrdení. V matrici sa pri vytvrdzovaní vylučujú karbidy  $M_{23}C_6$  a nitrídy  $Cr_2N$  alebo intermetalické fázy.

**Ocele pre prácu pri vyšších teplotách.** Konštrukčné celky a zariadenia, ktoré pracujú pri zvýšených teplotách, musia odolávať nadmernej plastickej deformácii (tečeniu), nadmernej oxidácii a lomu. Technicky čisté kovy odolávajú teplotám do homologickej teploty  $T_h = 0,35$ . Odolnosť proti tečeniu sa zvyšuje vytváraním tuhých roztokov, tvorbou stabilných disperzných častíc intermediárnych fáz alebo oxidov, veľkosťou zrna a rýchlosťou difúzných procesov v oblasti hraníc zŕn [52]. Pre vysoké teploty je vhodné znížiť plochu hraníc zŕn (obmedziť difúzne procesy) zväčšením rozmeru zrna. Účinnosť týchto opatrení sa líši intenzitou a teplotou použitia žiarupevných materiálov a pohybuje sa od 0,35 do 0,75  $T_t$  ( $T_t$  - teplota topenia základného kovu). Prehľad hlavných skupín žiarupevných materiálov je v tab. 3.40.

Tab. 3.40

Hlavné skupiny žiarupevných materiálov

Skupina	teplota [°C]	Charakteristika
Uhlíkové ocele	400	Zvárateľné, tvármitel'né, lacné
Nízkolegované ocele (0,5-2,3 % Cr), (0,2-1,0 % Mo), (0,15-0,35 % V)	500-560	Zvárateľné, mierne koróziivzdorné, žiaruvzdorné do 560 °C
Modifikované chrómové ocele	600	Koróziivzdorné, horšia zvárateľnosť
Austenitické nevytvrdzovateľné ocele	650	Horšia zvárateľnosť, veľká rozt'ážnosť
Austenitické vytvrdzovateľné ocele	650-750	Ťažko zvárateľné, ťažko tvármitel'né
Zliatiny niklu	800-1100	Pre presné liatie, ťažko obrábateľné
Zliatiny kobaltu	1100	Pre presné liatie, ťažko obrábateľné
Kovokeramické materiály	1200	Nízka húževnatosť (pod 10 Jcm <sup>-2</sup> )
Konštrukčná keramika	1400	Nízka húževnatosť, vysoký modul E
Zliatiny kovov W, Mo, Nb	2000	Náročné technológie výroby, nízka žiaruvzdornosť (potrebné vákuum alebo ochranná atmosféra)

Žiarupevné a žiaruvzdorné ocele môžeme podľa požiadaviek a zaťaženia rozdeliť do štyroch skupín [52, 53, 54]:

1. žiarupevné ocele pre namáhanie pri teplote okolia a pri zvýšených teplotách,
2. žiarupevné ocele pre namáhanie pri zvýšených teplotách v oblasti medze klzu a medze tečenia,
3. žiarupevné ocele odolné proti deformačnému starnutiu,
4. žiaruvzdorné ocele.

Požiadavky na charakteristiky ocelí v jednotlivých skupinách sú uvedené v tab. 3.41.

Tab. 3.41

Požiadavky na charakteristiky žiarupevných ocelí

Skupina	Požadované vlastnosti
1.	Statické, pevnostné a plastické hodnoty pri teplote okolia, vrátane odolnosti proti krehkému porušeniu, hodnoty medze klzu pri zvýšených teplotách do 300 °C až 400 °C, vhodnosť pre tavné zváranie pre ocele na zvarované tlakové nádoby a na zvarované rotory, ako aj vyhovujúce technologické vlastnosti pre dielenské spracovanie.
2.	Okrem vlastností uvedených v skupine 1. hlavne hodnoty medze pevnosti pri tečení a medza tečenia.
3.	Okrem vlastností uvedených pre skupinu 1. hlavne zvýšená odolnosť proti deformačnému starnutiu, zaručovaná vrubová húževnatosť po deformácii za studena a zrýchlenom starnutí ohrevom na 250 °C.
4.	Úžitkovými vlastnosťami žiaruvzdorných ocelí je predovšetkým odolnosť proti oxidácii, vyjadrovaná váhovými úbytkami obyčajne na plochu 1 m <sup>2</sup> za hodinu v závislosti od teploty, ďalej únosnosť pri teplotách použitia, vyjadrovaná obyčajne zaťažením na medzi tečenia vyvolávajúcim deformáciu 1 % za 1 000 alebo 10 000 hodín, ďalej vhodnosť na zváranie a tvárnenie, ako aj odolnosť proti splodinám horenia obsahujúcim síru.

Žiarupevné ocele na zvarované diely sa vyznačujú limitovaným obsahom  $C_{\max}$  0,24 % a prísadou legujúcich prvkov Mn, Cr, Mo a V, ktoré zvyšujú pevnosť. Žiarupevné ocele majú obyčajne nízky obsah C, pričom feriticko-perlitické sú legované Mo, Cr, W a V a austenitické buď na báze CrNi,

prípadne Mo, alebo MnCr a V, Mo. Ocele odolné proti deformačnému starnutiu sú nízkouhlíkové upokojené pomocou Al.

Žiaruvzdorné ocele sú buď feritické, nízkouhlíkové s odstupňovaným obsahom Cr od 12 do 25 %, prípadne so zvýšeným obsahom Si, ktoré odolávajú lepšie splodinám obsahujúcim S, alebo austenitické na báze Cr-Ni s odstupňovanými obsahmi Cr od 18 do 27 % a Ni od 8 do 22 %. Tieto ocele sú lepšie technologicky spracovateľné a dobre zvarateľné a navyš sú odolné proti krehnutiu v prevádzkových podmienkach.

Ušľachtilé, nízko-, stredne- ale aj vysokolegované ocele sa vyrábajú v elektrických oblúkových peciach, uhlíkové a niektoré nízkolegované ocele v klasických SM peciach.

Žiarupevné ocele pre namáhanie pri teplote okolia a pri zvýšených teplotách sa používajú obvykle v oblasti výpočtových teplôt do 300 – 400 °C. Základné úžitkové vlastnosti týchto ocelí sú: statické pevnostné parametre, (najmä medza klzu pri normálnych i zvýšených teplotách), zaručená tavná zvarateľnosť (pre zvarané tlakové nádoby a rotory), odolnosť proti krehkému porušeniu, najmä pri tlakových nádobách najmä kotlových bubnoch sa vyskytuje dynamické namáhanie, ktoré vyvoláva nízkokycklovú únavu. Ocele na zvarané tlakové nádoby a na zvarované rotory podľa tab. 3. 42 sa vyznačujú obmedzeným obsahom uhlíka max. 0,24 %. Obsah

Tab. 3.42

Žiarupevné ocele pre namáhanie pri teplote okolia a pri zvýšených teplotách

Značka	Chemické zloženie [%]								R <sub>m</sub> [MPa]
	C	Mn	≤ Si	Cr	Ni	≤ Mo	≤ W	≤ V	
13 123.5,9	0,17-0,23	1,40	0,15-0,40	max. 0,30	-	-	-	0,25	490-640
15 223.9	0,17-0,23	1,60	0,15-0,40	max. 0,20	-	0,50			540-730
15 243.6,7	0,32-0,42	0,80	0,15-0,40	1,60-2,00	-	-	-	0,20	686-836
15 331.3,7	0,17-0,27	1,00	0,20-0,40	1,10-1,50	-	-	1,30	0,65	785-932
16 221.6	0,18-0,24	1,00	0,15-0,40	max. 0,20	1,00-1,50	-	-	0,25	640-790
16 322.6	0,18-0,24	1,10	0,15-0,40	max. 0,20	1,20-1,80	-	0,50	0,25	620-790
16 342.3,6	0,32-0,42	0,70	0,15-0,40	1,60-2,00	1,00-1,30	-	-	0,25	840-932
16 444.6,7	0,32-0,40	0,60	0,15-0,40	1,70-2,00	1,50-1,80	0,25	-	0,20	830-980
17 124.6,7	0,19-0,25	1,00	0,20-0,60	11,0-12,5	0,50-0,90	1,10	-	0,35	850-1000

d'alších legujúcich prvkov, hlavne Mn, Cr, Mo, výnimočne W je určovaný požiadavkou na zvýšenie pevnostných parametrov, prísady vanádu zaisťujú jemnozrnnosť ocele a zvýšenie medze klzu [52, 54].

Ocele pre zvarované aj monolitické výkovky, hlavne rotory sú legované niklom, ktorý pri zušľachtovaných výkovkoch spolu s Cr a Mo zvyšuje prekaliteľnosť.

Ušľachtilé, legované žiarupevné ocele sa vyrábajú v elektrických peciach, ojedinelo v klasických SM peciach. Pre veľké výkovky sa oceliarsky proces dopĺňa vákuovaním, čím sa zníži náchylnosť na vznik vložkovitých trhliniek.

*Žiarupevné ocele pre namáhanie pri zvýšených teplotách v oblasti medze klzu a medze tečenia* sa používajú pre teploty od 570 až 590 °C. Základnými úžitkovými vlastnosťami týchto ocelí sú jednak statické pevnostné vlastnosti, najmä medza klzu pri normálnych i zvýšených teplotách, jednak hodnoty medze pevnosti pri tečení a medze tečenia, zisťované dlhodobými skúškami. Okrem parametrov žiarupevnosti však musíme zohľadňovať aj deformačnú schopnosť pri lome, štruktúrnú stabilitu počas zaťaženia (odolnosť proti skrehnutiu), odolnosť proti oxidácii a odolnosť proti spalinám a nečistotám (splodinám horenia) v spalinách a v pare.

Deformačnú schopnosť do lomu vyjadruje plasticnosť pri tečení, t. j. hodnota ťažnosti alebo zúženia pri lome. Štruktúrna stabilita je najzávažnejšia pri žiarupevných austenitických oceliach, v ktorých pôsobením prevádzkových podmienok (teplota a napätie) nastáva na hraniciach zŕn vylučovanie precipitátov, najmä karbidov chrómu typu  $M_{23}C_6$ . Vylučovanie týchto karbidov zvyšuje náchylnosť na medzikryštálovú koróziu. Náchylnosť žiarupevných austenitických ocelí na medzikryštálovú koróziu rastie (v prípade kotlových rúrok) s dobou expozície v kotle, počas ktorej boli v studenom stave v styku s kondenzátom. Odolnosť proti tejto korózii možno zvýšiť znížením obsahu uhlíka. Odvodňovaním celého rúrkového systému pri dlhších studených odstavkách zvyšujeme prevenciu a predchádzame korózii [52, 53].

Žiarupevné ocele (tab. 3.43) sa vyznačujú nízkymi obsahmi uhlíka. Feriticko-perlitické typy obsahujú legujúce prvky (Cr, V, Mo, W), ktoré zaisťujú odolnosť proti tečeniu. Nikel je v žiarupevných feriticko-perlitických oceliach nežiaduci. Austenitické ocele majú bázu buď Cr-Ni s prísadou Mo, alebo Mn-Cr s prísadou V, prípadne aj Mo. Ušľachtilé žiarupevné ocele pre namáhanie v oblasti tečenia sa vyrábajú najčastejšie v elektrických peciach. Niekedy sa používa aj vákuovanie ocele. Feriticko-

perlitické ocele, ktoré sú legované molybdénom, sa obmedzuje používanie hliníka pre dezoxidáciu na maximálny obsah do 0,01 %, aby sa predišlo grafitizácii pri vyšších teplotách a tlakoch.

Tab. 3.43

Žiarupevné ocele pre namáhanie pri zvýšených teplotách v oblasti medze klzu a medze tečenia

Značka	Chemické zloženie [%]								R <sub>m</sub> [MPa]
	C	Mn	≤ Si	Cr	Ni	≤ Mo	≤ W	≤ V	
12 022.1*	0,15-0,20	050-080	0.37	max. 0,25	max. 0,25	-	-	-	441-568
15 020.1,5	0.12-0.20	0.50-0.80	0.35	-	-	0.35	-	-	450-600
15 236.6,7	0.17-0.27	0.30-0.60	0.40	1.20-1.50	-	0.50	-	0.65	686-834
15 335.5,6	0.20-0.24	0.25-0.50	0.50	1.00-1.50	-	0.65	0.70	0.85	735-885
17 341.4	0.04-0.10	max. 2.0	0.80	16.0-18.0	11.5-14.0	2.80	-	-	500-780
17 482.4	0.050.12	17.0-20.0	1.00	9.50-11.5	1.20-1.80	-	-	0.75	600-850

*Žiarupevné ocele odolné deformačnému starnutiu.* Základné úžitkové vlastnosti tejto skupiny ocelí sa prakticky zhodujú s vlastnosťami ocelí z predchádzajúcej skupiny a platnými pre uhlíkové ocele. Navyše musia spĺňať požiadavku zvýšenej odolnosti proti deformačnému starnutiu. Deformačné starnutie sa prejavuje pri tvárnení za studena, pri deformáciách nad 5 % a prejavuje sa poklesom vrubovej húževnatosti a znížením odolnosti proti krehkému porušeniu. Táto skupina ocelí má súčasne aj väčšiu odolnosť proti tepelnému starnutiu (quench aging), ktoré sa vyskytuje pri rýchlom ochladení z teplôt okolo Ac<sub>1</sub>, napr. v prechodovej oblasti zvarov [52]. Chemické zloženie týchto uhlíkových ocelí podľa tab. 3.44 sa vyznačuje obsahom hliníka min. 0,015 %. Ocele musia byť dokonale upokojené a sekundárne jemnozrné. Modifikácia ocelí hliníkom nie je čo do zvýšenia odolnosti proti deformačnému starnutiu rovnocenne dosiahnuteľná žiadnym z iných používaných modifikátorov, zjemňujúcich zrno.

Optimálna akosť ocelí odolných proti deformačnému starnutiu sa docieľuje pri výrobe vákuovaním ocele a dezoxidáciou vo vákuu.

Tab. 3.44

## Žiarupevné uhlíkové ocele odolné proti deformačnému starnutiu

Značka	Chemické zloženie [%]						
	C max.	Mn max.	Si max.	Al min.	Cr max.	Ni max.	Cu max.
11 368.1	0,15	0,40	0,35	0,015	0,30	0,30	0,30
11 418.1	0,22	0,50	0,35	0,015	0,30	0,30	0,30
11 478.1	0,22	0,70	0,35	0,015	0,30	0,30	0,30

*Žiaruvzdorné ocele.* Do skupiny žiaruvzdorných ocelí zahrňame ocele a zliatiny, ktoré sú vhodné pre použitie pri teplotách 600 – 1 200 °C (tab. 3.45). Pri týchto teplotách na povrchu kovu vzniká pôsobením kyslíka oxidická vrstva, ktorá sa bežne označuje ako okuje. Okuje majú odlišnú tepelnú rozťažnosť, sú krehké, nemôžu sa plasticky deformovať a ľahko sa trhajú a odlupujú. Pri uhlíkových oceliach okuje nechránia ocel' proti postupujúcej oxidácii. Vrstva má slabú príľnavosť na povrch, čím uľahčuje ďalší prístup k nechránenej oceli a tvorenie okují sa urýchľuje. Zvýšenie odolnosti proti okujeniu sa v oceliach dosahuje prísadou chrómu. Účinok chrómu spočíva v tom, že oxiduje pri vysokých teplotách rýchlejšie (má vyššiu afinitu ku kyslíku) ako železo. Takto vznikajúce okuje obsahujú podstatne viac chrómu ako zodpovedá zloženiu danej ocele, sú spojité, majú

Tab. 3.45

## Žiaruvzdorné ocele pre vysoké teploty

Značka	Chemické zloženie [%]							Odolnosť [°C]	R <sub>m</sub> [MPa]
	≤ C	≤ Mn	≤ Si	Cr	Ni	≤ Ti	≤ Al		
17 047	0.15	0.80	0.80	20.0-23.0	max. 0.60	0.70	-	1000	441-637
17 061	0.18	0.80	0.80	23.0-26.0	max. 0.60	0.70	-	1050	441-637
17 113	0.12	0.60	1.30	6.0-7.5	-	-	1.00	800	441
17 125	0.15	0.80	2.00	12.0-14.5	-	-	1.20	930	490-686
17 153	0.20	1.00	1.30	23.0-27.0	max. 2.0	-	-	1100	490-686
17 251	0.20	1.50	2.00	18.0-21.0	8.0-11.0	-	-	1000	637
17 253	0.20	1.00	1.50	19.0-22.0	36.0-40.0	-	-	1200	590
17 255	0.25	1.50	2.00	23.0-27.0	18.0-22.0	-	-	1100	588

pomerne dobrú priľnavosť k povrchu ocele, difúzia kyslíka cez tieto okuje je takmer zastavená a aj difúzia chrómu a železa na povrch je podstatne pomalšia. Uplatnením tohto mechanizmu vrstva okují narastá stále pomalšie a vytvára ochranný povlak, ktorý účinne brzdí ďalšiu oxidáciu. Vzhľadom na obsahu chrómu sú všetky koróziivzdorné ocele žiaruvzdorné do teploty 800 °C.

Účinok chrómu na žiaruvzdornosť ocele pôsobí až do obsahu 25 %, ďalšie zvyšovanie je už bez účinku. Opaluvzdornosť sa ďalej zvyšuje hlavne prísadou kremíka a hliníka, ktoré majú pri vysokých teplotách vyššiu afinitu ku kyslíku (ľahšie oxidujú) ako železo. Vznikajúci oxid kremíka ( $\text{SiO}_2$ ) tvorí v okujách kremičitany, ktoré podporujú ich ochranný účinok. Hliník sa oxiduje na oxid hlinitý, ktorý vytvára podobne ako oxid chromitý s oxidmi dvojmocných kovov zlúčeniny spinelového typu. Pretože obidva prvky výrazne zhoršujú spracovanie ocele, aplikujú sa iba do obsahu 2 % [52].

Žiaruvzdornosť ocele sa zvyšuje aj prísadou niklu. Jeho účinok sa však prejavuje až pri obsahoch nad 20 %. Ochranný vplyv niklu je odlišný od vplyvu Cr, Al a Si. Pri vysokých teplotách oxiduje podstatne pomalšie ako železo, a tým znižuje jeho koncentráciu v tuhom roztoku. Táto vlastnosť niklu sa uplatňuje výraznejšie pri zliatinách na báze niklu, ktoré vykazujú práve z týchto dôvodov podstatne väčšiu žiaruvzdornosť. Nikel podporuje tvorbu austenitu a ocele s obsahom nad 8 % Ni majú prakticky austenitickú štruktúru. Austenitické ocele sa všeobecne vyznačujú lepšimi technologickými vlastnosťami, najmä zlepšenou ťažnosťou, húževnatosťou a zvárateľnosťou a zníženou citlivosťou na krehnutie. Veľmi priaznivý účinok na ďalšie zvýšenie žiaruvzdornosti majú prísady niektorých prvkov ako céru, vápnika, tória a berýlia, spravidla v rozmedzí 0,05 až 0,20 %. Titán na opaluvzdornosť nemá prakticky nijaký vplyv, zlepšuje však žiarupevnosť a zvárateľnosť ocelí.

Odolnosť proti oxidácii pri vysokých teplotách okrem obsahu legúr ovplyvňuje hlavne zloženie okolitej atmosféry a spôsob tepelného namáhania. Dusík v plynnej atmosfére je nepriaznivý predovšetkým pre ocele, ktoré obsahujú prvky schopné tvoriť s dusíkom nitridy. Vodík pri atmosférickom tlaku žiaruvzdorným materiálom neškodí a uplatňuje sa škodlivo až pri tlaku niekoľko desiatok MPa a vyššej teplote, keď v atomárnej forme vniká do ocele, difunduje do hĺbky a redukuje karbidy. Medzi veľmi škodlivé látky patria zlúčeniny síry. Síra sa vyskytuje prakticky vo všetkých technicky významných palivách. Jej zlúčeniny pri spaľovaní jednak disociujú alebo sa oxidujú na oxidy  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ . Tieto oxidy reagujú

ihneď v styku s oxidmi kovov a povlakmi pri súčasnom vzniku príslušných síranov alebo priamo kondenzujú s vodnou parou vo forme kyseliny sírovej. Vzhľadom na vysokú afinitu k niklu vzniká siričnik nikelnatý (NiS) s veľmi nízkym bodom topenia 648 °C, ktorý ľahko preniká do materiálu pozdĺž hraníc zŕn a porušuje jeho súdržnosť.

Niektoré palivá obsahujú minerálne látky s chlórrom, ktoré rovnako disociujú pri vysokých teplotách. Voľný chlór reaguje okamžite s vodíkom a vzniká chlorovodík. Chlorovodík je podobne ako oxid sírový veľmi nebezpečný pre ekonomizéry a ohrievače vzduchu vzhľadom na kondenzáciu kyseliny chlorovodíkovej. Korózia žiaruvzdorných ocelí v solných roztokoch predstavuje závažný problém, pretože oceľ nie je chránená kompaktnou vrstvou oxidov, ktoré sa v taveninách (roztokoch) rozpúšťajú, prípadne odlupujú alebo s ňou reagujú. V tomto smere solné roztoky a taveniny pôsobia veľmi rozdielne. Z toho dôvodu sa odporúča pred použitím experimentálne odskúšať odolnosť ocele v konkrétnom prostredí. Podobne zlyháva i ochranné pôsobenie okují v roztavených kovoch [52].

Vplyv teploty pri mechanickom namáhaní sa prejavuje okrem poklesu pevnosti aj postupnou deformáciou (tečením) pri trvalo pôsobiacom napätí. Z toho dôvodu pre dlhodobé použitie nad teplotou 600 °C nemá pre výpočet význam hodnota medze klzu a pevnosti, ale hodnota napätia, ktoré pri trvalom pôsobení pri stálej teplote spôsobí určenú deformáciu ocele, alebo dôjde k celkovému porušeniu materiálu.

Ďalšou výhodou austenitických ocelí je vyššia stabilita štruktúry, ktorá je podmienená podstatne nižšou rýchlosťou difúzie v mriežke austenitu (K12).

Stabilita štruktúry feritických chrómových ocelí pri pracovných teplotách je pomerne nízka. Pri teplotách nad 900 °C dochádza najmä pri oceliach s vyšším obsahom chrómu k rastu zrna, v dôsledku ktorého sa oceľ stáva po ochladení na izbovú teplotu krehkou. Takto vzniknutú krehkosť nemožno odstrániť ani dodatočným tepelným spracovaním. Druhou oblasťou kritických teplôt krehnutia je oblasť precipitácie fázy  $\sigma$ , ležiacej v intervale teplôt 600 až 800 °C. Ohrevom nad teplotu 850 °C vylúčená fáza  $\sigma$  prechádza do tuhého roztoku a oceľ získava pôvodné plastické vlastnosti i húževnatosť. Pri pomalom ochladzovaní z pracovných teplôt sú feritické ocele citlivé na krehnutie pri teplote 475 °C. Krehnutie nastáva v rozmedzí teplôt 400 – 550 °C. Účinne sa mu dá zabrániť rýchlym ochladzovaním v tomto intervale teplôt alebo dodatočným ohrevom na teplotu 800 °C.

Austenitické žiaruvzdorné ocele krehnú podstatne menej, a to v intervale teplôt 600 – 800 °C. Krehnutie nastáva pri dlhobodej expozícii v dôsledku



precipitácie karbidov chrómu po hraniciach zŕn a vylučovaním fázy  $\sigma$ . Po rozpúšťacom žíhaní pri teplote 1100 °C získava oceľ pôvodnú austenitickú štruktúru.

**Ocele pre prácu pri nízkych teplotách.** Zníženými prevádzkovými teplotami sa podľa STN 42 0165 rozumejú teploty spravidla –20 °C a nižšie.

Takéto pracovné teploty nazývame záporné teploty a obyčajne ich rozdeľujeme na *nízke teploty* (od 0°C do –150°C) a *kryogénne teploty* (teploty pod –150°C). Podľa technických pravidiel pre tlakové nádoby s pracovnou teplotou pod 0 °C, obsiahnutých v STN 69 0010 sa pre určenie najnižšej pracovnej teploty neuvažujú atmosférické podmienky, ale najnižšia teplota látky (telota skvapalnenia plynu), ktorá obteká danú súčasť [52].

Prevádzkové podmienky pri nízkych teplotách pri menovitom dovolenom namáhaní vyžadujú zníženie prechodovej (tranzitnej) teploty a zachovanie elasticko – plastického stavu do najnižšej uvažovanej prevádzkovej teploty (tab. 3.47). V súvislosti so zmenou vlastností materiálov s klesajúcou teplotou rastie medza klzu aj medza pevnosti, ale klesá vrubová húževnatosť. Zvýšenie pevnostných hodnôt reprezentatívnych typov ocelí predstavuje plynulý nárast oproti hodnotám, ktoré sú zaručované pri 20 °C (tab.3.46).

Tab. 3.46

Vzrast pevnosti ocelí pri poklese teploty

Oceľ	Príklad	Teplota [°C]	Vzrast pevnosti [%]
uhlíková	STN 41 1419.1	–80	min. o 30
legovaná (3% Ni)	STN 41 6320	–120	min. o 30
legovaná (9% Ni)	STN 41 7501	–180	min. o 35
austenitická (CrNi)	STN 41 7242	–190	min. o 150

Zvýšenie pevnostných hodnôt pri znížených teplotách sa nesmie použiť pri výpočtoch, pretože tlakové sústavy sa počítajú pevnostne pre teplotu okolia. Toto zvýšenie pevnostných hodnôt však zvyšuje pevnostnú bezpečnosť pri prevádzke pri znížených teplotách. Ocele pre prácu pri znížených a nízkych teplotách musia mať vždy zaručenú tavnú zvárateľnosť a zaručenú odolnosť proti krehkému porušeniu.

Ocele pre prácu pri nízkych teplotách

Značka	Chemické zloženie [%]					T <sub>T</sub> [°C]	KCV, KCU [Jcm <sup>-2</sup> ]	R <sub>m</sub> [MPa]
	≤ C	Mn	Si	Cr	Ni			
11 557.1	0,20	max. 1,60	max. 0,50	-	-	-50	+ 60/35	540-680
11 587.1	0,20	max. 1,70	max. 0,50			-50	+ 60/35	570-720
16 228.5	0,19	1,10-1,65	0,15-0,40	max. 0,30	0,40-0,70	-40	* 90/30	570-735
16 320.3,6	0,17	0,30-0,60	0,15-0,35	-	2,80-3,30	-150	* 108/34	588
16 527.5,7	0,15	0,30-0,60	0,15-0,35	-	4,50-5,50	-170	* 115/35	590-735
17 501.9	0,10	0,30-0,80	0,15-0,35	-	8,50-10,0	-196	* 118/59	637-834
17 460.4	0,12	7,00-10,0	max. 0,90	17,0-20,0	4,00-6,00	-196	* 255/118	1200

Hodnoty KCV, KCU sú uvádzané pre 20°C(\*) pre 0°C (+) a pre tranzitnú teplotu T<sub>T</sub>,  
R<sub>m</sub> platí pre 20°C

Skupina ocelí triedy 11, so zaručenými hodnotami vrubovej húževnatosti do -50 °C, je pre odstupňovanie pevnostných vlastností až do min. medze klzu 460 MPa legovaná mangánom až do 1,70 %, kremíkom do 0,50 % a mikrolegujúcimi prvkami Al, Ti, V a Nb jednotlivo alebo v kombinácii.

Na zníženie prechodnej teploty a dosiahnutie elasticko-plastického stavu do teplôt -70 °C a nižších je nutná prísada niklu cca 1 % a pre teploty -196 °C do 9 %. Niklové ocele nedosahujú v žíhanom stave vyššie pevnostné hodnoty. Preto ocele s 5 % a 9 % Ni sa tepelne zušľachtujú, aby bola zaručená medza klzu 390, resp. 490 MPa.

Austenitické ocele na báze CrNi majú zaručenú medzu klzu R<sub>p0,2</sub> do 210 MPa, austenitické ocele na báze MnCr majú zaručenú medzu klzu nad 300 MPa. Všetky austenitické ocele pre prácu pri nízkych teplotách musia byť primárne i sekundárne jemnozrnné, a preto sú ukludňované hliníkom alebo mikrolegované Ti, Nb, V (jednotlivo alebo v ich kombinácii). Tepelne sa spracovávajú buď normalizačným žíhaním, prípadne s popúšťaním alebo zušľachtovaním.

**Ocele vodíkovzdorné.** Základnou požiadavkou na vodíkovzdorné ocele je dobrá odolnosť proti tlakovému vodíku, resp. zmesi vodíka a ďalších plynov pri zvýšených teplotách. Tieto ocele sa používajú na konštrukciu tlakových zariadení, nevyhnutných pre realizáciu mnohých chemických

pochodov, ako je syntéza čpavku, rôzne druhy hydrogenizácie, výroba metanolu a vyšších alkoholov, ale aj pri rafinácii pohonných hmôt [52].

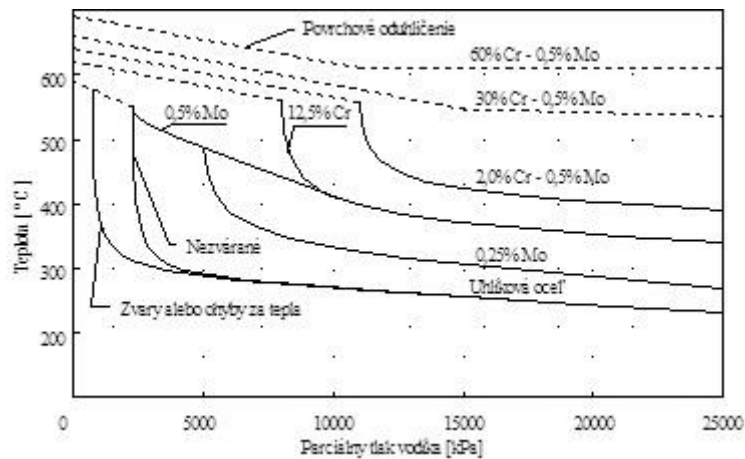
Vzhľadom na pomerne široký rozsah pracovných teplôt, nevyhnutných pre priebeh chemických reakcií vyššie uvedených procesov (200 až 600 °C) je nutné pri dimenzovaní súčastí z týchto ocelí uvažovať nielen s hodnotami medze klzu pri vyšších teplotách, ale aj s medzou pevnosti pri tečení.

Vzájomnou kombináciou namáhania ocele v oblasti vyšších teplôt pri prítomnosti tlakového vodíka dochádza k podstatnému skráteniu jej životnosti. Pri používaných tlakoch 100 MPa a vysokých teplotách 500 °C je aktivita vodíka na povrchu ocele značne vysoká a vplyvom dobrej difúzie vodíka je prekročená jeho medzná rozpustnosť v oceli. Ak je vodík vplyvom prebiehajúcich chemických reakcií ionizovaný, alebo je v atomárnej forme, dochádza k napadnutiu ocele už pri podstatne nižších tlakoch.

Po fyzikálnej stránke je možné škodlivý vplyv vodíka jednoducho vysvetliť difúziou jeho atómov resp. iónov do oblasti mikrodefektov v kryštálovej mriežke, ich nahromadením a rekombináciou na molekuly vodíka. Okrem vysokých napätových špičiek v kritických miestach matrice spôsobuje výrazné blokovanie pohyblivých dislokácií pri plastickej deformácii. Dôsledkom toho je zníženie plastických vlastností ocele a vznik mikrotrhlín [56, 60].

Po chemickej stránke, aktívny vodík difundujúci do ocele reaguje s uhlíkom pri súčasnom vzniku uhl'ovodíkov, najmä metánu. Vysoké napätia vyvolané produktmi tejto reakcie vyvolávajú spolu s aplikovaným napätím trhliny a dutiny v oceli. Pôsobenie tlakového vodíka sa prejavuje povrchovým i vnútorným oduhličením postupujúcim po hraniciach zŕn, čo vedie k prudkému zníženiu ťažnosti, pevnosti, kontrakcie a vrubovej húževnatosti. V povrchových vrstvách je pozorovaný výskyt dutín, z ktorých niektoré prenikajú až k povrchu ocele [57, 60].

Veľmi významná je kombinácia účinku tlakového vodíka a vysokoteplotnej expozície v oblasti tečenia. Vplyvom vodíkového skrehnutia ocele a narušenia nosného prierezu dochádza k výraznému skráteniu doby do lomu, poklesu ťažnosti a kontrakcie pri skúškach tečenia. Kombinovaný vplyv teploty a tlaku vodíka na odolnosť chrómových ocelí s odstupňovanými obsahmi chrómu, resp. molybdénu, je zrejmý z Nelsonovho diagramu obr. 3.20 [62]. Z diagramu je zrejmé, že s klesajúcou teplotou sa maximálny dovolený tlak vodíka v pracovnej atmosfére zvyšuje. Je nutné poznamenať, že okrem teploty a tlaku vodíka bude poškodenie ocele takisto funkciou času vysokoteplotnej expozície.



Obr. 3.20. Odolnosť rôznych typov ocelí proti pôsobeniu vodíka v závislosti od tlaku pri zvýšených teplotách

Napadnutie ocele tlakovým vodíkom ovplyvňujú aj ďalšie plyny, ktoré sú v reakčnej atmosfére. Zvlášť významný je v tomto smere dusík (napr. prostredie syntézy čpavku), ktorý intenzívnou nitridáciou narušuje povrchové vrstvy ocele a urýchľuje priebeh vodíkovej korózie [60, 63]. Nízkolegované ocele (3 % Cr - Mo - V) 15 323 a 15 423 sú použiteľné v prostredí syntézneho plynu iba do teplôt 350 až 400 °C, čo je o 150 až 200 °C menej ako vo vodíkovej atmosfére bez dusíka. Napadnutie vodíkom urýchľuje takisto aj prítomnosť sírovodíka v reakčnej atmosfére.

Z bežných legujúcich prvkov účinne zvyšuje odolnosť proti vodíkovej korózii chróm, do istej miery molybdén a vanád. Prehľad niektorých vodíkuvzdorných ocelí je uvedený v tab.3.48 s obsahom jednotlivých základných a legujúcich prvkov. Do skupiny vodíkuvzdorných ocelí bola zaradená aj 12 % Cr ocel' 17 134, ktorá nie je podľa normy STN 47 0074 výslovne uvedená ako vodíkuvzdorná, ale vzhľadom na svoju vysokú žiarupevnosť a odolnosť proti agresívnemu prostrediu, vrátane tlakového vodíka, sa používa pri konštrukcii niektorých vyššie uvedených chemických zariadení.

Ocele odolné vodíku rozdeľujeme do dvoch skupín: ocele nízkolegované CrMo a CrMoV ocele na báze 2 až 3 % Cr, legované do 1 % Mo a max. 0,8 % V a ocele s vyšším obsahom chrómu do max. 12 %, legované molybdénom, prípadne vanádom. Nízkolegované ocele majú odolnosť proti

pôsobeniu vodíkovej atmosféry danú vhodným typom mikroštruktúry po tepelnom spracovaní, ktorá obsahuje tuhý roztok legovaný chrómom a disperzne vylúčené stabilné karbidy legujúcich prvkov, ktoré zaručujú vysokú žiarupevnosť a štruktúrnú stabilitu, a súčasne odolávajú oduhlíčovaciemu účinku tlakového vodíka. Pri oceliach s vyšším obsahom chrómu je dobrá vodíkuvzdornosť zaručená najmä obsahom chrómu v tuhom roztoku a tiež priaznivým vplyvom karbidických častíc, ktoré zvyšujú odolnosť mikroštruktúry ocele proti oduhlíčovaciemu efektu vodíka pri vysokoteplotnej expozícii.

Tab. 3.48

Prehľad vybraných vodíkuvzdorných ocelí

Označenie	Chemické zloženie [%]							Tmax [°C]
	C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	V	
15 313	0.08-0.15	0.40-0.80	0.15-0.40	2.00-2.50	0.90-1.10	-	-	500
15 323	0.15-0.20	0.30-0.50	0.20-0.35	2.70-3.20	0.20-0.30	-	-	500
15 412	max. 0.12	0.25-0.50	0.15-0.40	2.50-3.00	0.25-0.50	-	-	450
15 421	0.18-0.28	0.50-0.90	0.15-0.40	2.70-3.50	0.25-0.60	-	≤0.80	400
17 102	max. 0.15	max. 0.60	max. 0.50	4.00-6.00	0.45-0.65	-	-	600
17 116	max. 0.15	0.30-0.60	0.25-1.00	8.00-10.0	0.90-1.00	-	-	625
17 111	0.08-0.15	0.30-0.60	0.50-1.00	8.00-10.0	0.90-1.20	-	-	625
17 134	0.17-0.23	0.50-1.00	0.25-0.60	10.0-12.5	0.80-1.20	≤0.80	≤0.25	625

Obsah P a S < 0.04; Tmax je maximálna pracovná teplota pri vysokotlakom vodíku

### 3.8 Spekané ocele

**Spekané železné súčiastky.** Základnou surovinou pre ich výrobu je *železný prášok*. Používajú sa najmä hubovité druhy práškoveho železa (redukcia technických oxidov Fe, huba HÖGANÄS), menej rozstrekované prášky (RZ) a v malom rozsahu iné druhy (napr. mleté prášky HAMETAG). Mechanické vlastnosti takýchto spekaných materiálov závisia od chemických, fyzikálnych a technologických vlastností použitého práškoveho železa a od podmienok lisovania a spekania. Jednotlivé druhy práškoveho železa sa považujú pri ich použití na výrobu spekaných železných výliskov za prakticky rovnocenné, ale musia sa modifikovať podmienky lisovania a

spekania zodpovedajúce špecifickým vlastnostiam práškov (napr. hubovité druhy sú výborne lisovateľné a pod.). *Hustota výliskov* je ďalším faktorom, ktorý do značnej miery (hoci nie je v každom prípade rozhodujúcim činiteľom) ovplyvňuje vlastnosti spekaných súčiastok. V rozsahu najčastejšie používaných lisovacích tlakov (400 až 600 MPa) možno jednoduchým lisovaním a spekaním pri 1120 °C po dobu 60 minút vyrobiť materiály s hustotou 6,3 až 7,2 Mgm<sup>-3</sup>. S rastúcou hustotou (t. j. klesajúcou pórovitosťou) narastá pevnosť aj ťažnosť súčiastok a približuje sa vlastnostiam kompaktného Fe.

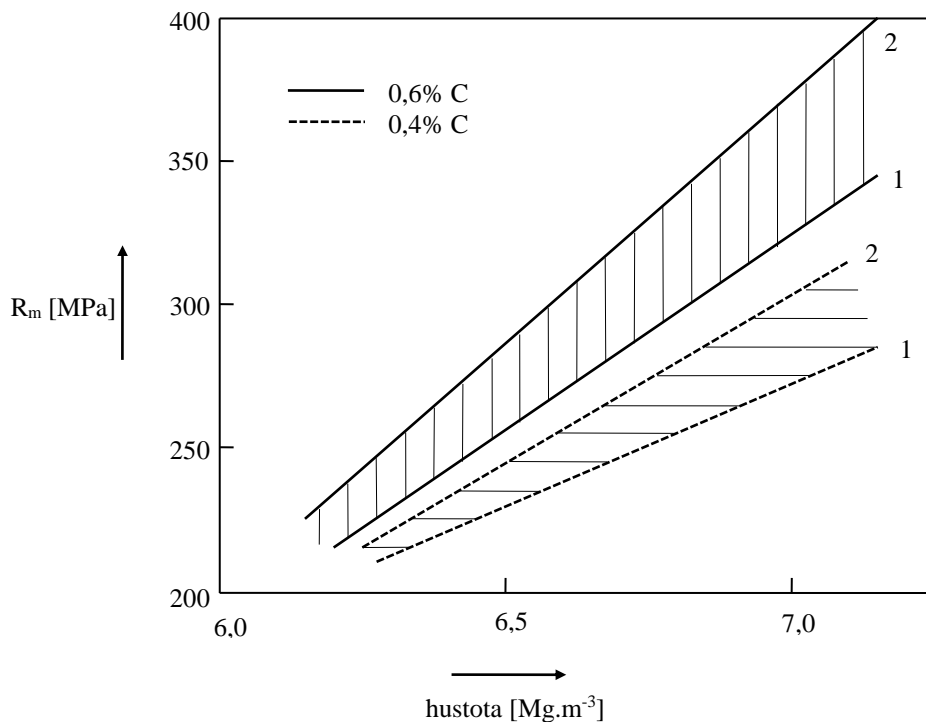
**Spekané ocele** sú progresívnym druhom ocelí, pretože ich spôsob výroby (kap.2.4) umožňuje vysoké úspory kovovej substancie. Použitie spekaných výrobkov na báze železa sa zatiaľ najviac rozšírilo v automobilovom priemysle, na súčiastky poľnohospodárskych a záhradkarských strojov, kompresory chladničiek, súčiastky hydraulických zariadení, textilných a šijacích strojov a strojčekov pre domácnosť.

Pri výrobe spekaných ocelí sa používa niekoľko spôsobov z hľadiska východiskového prášku, z ktorých hlavné sú:

- spekanie práškov ocele o požadovanom konečnom chemickom zložení (tzv. predlegované prášky);
- spekanie zmesi vytvorenej zmiešaním potrebného množstva práškov jednotlivých zložiek (miešané prášky);
- spekanie zmesi z práškového železa a liatinového prášku, alebo práškových ferozliatin;
- spekanie železného prášku a dodatočné nauhličenie spekanej železnej súčiastky.

*Spekané uhľikové ocele* sa najčastejšie vyrábajú zo zmesi železného prášku a grafitu. Pevnosť súčiastok výrazne ovplyvňuje ich hustota (obr. 3.21). Ťažnosť týchto materiálov je pri hustote 7 mg.m<sup>-3</sup> v intervale 4 až 7 % a tvrdosť 70 až 90 HB. Mechanická pevnosť práškových ocelí sa ďalej zvyšuje tepelným spracovaním alebo kovaním výliskov (pri 0,4 % C sú hodnoty  $R_m$  až 765 MPa pri ťažnosti 10 %).

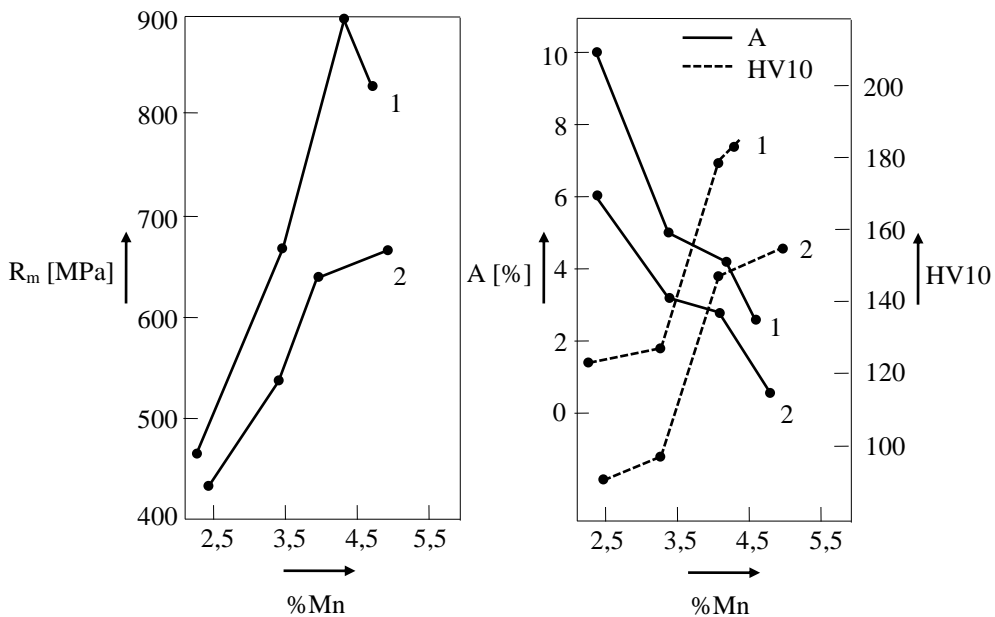
*Spekané legované ocele* sa vyrábajú zo zmesi práškového železa a práškov legúr (miešané prášky) alebo z čiastočne či celkom predlegovaných práškov. Legujúce prvky nemajú v práškovej metalurgii rovnakú dôležitosť ako v klasickej metalurgii, pretože treba brať zreteľ aj na ich aktivitu ku kyslíku, a nielen na to, ako ovplyvňujú vlastnosti ocelí. Problém oxidácie legúr vystupuje do popredia v celej práškovej metalurgii, začínúc výrobou práškov.



Obr. 3.21. Závislosť  $R_m$  spekanej uhlíkovej ocele od hustoty (1 - spekanie pri teplote 1100 °C/30 min., 2 - spekanie pri teplote 1 200 °C/ 60 min.)

Preto sa predovšetkým vyvinuli ocele legované prvkami s nízkou afinitou ku kyslíku, ku ktorým zaraďujeme Cu, Ni a Mo. Najčastejšou (aj najstaršou) legúrou je Cu, ktorá sa bežne pridáva do obsahu 10 %. Vyššie prídavky vedú k zväčšovaniu objemu. Ďalšie zvyšovanie obsahu Cu umožňuje použitie predlegovaných práškov. Pri oceli s 20 % Cu je možné len technikou jednoduchého lisovania dosiahnuť bezpórovitý stav súčiastok a pevnosť 320 až 340 MPa. V práškovej metalurgii je ďalej veľmi známa ocel s 5 % Cu a 5 % Ni, ktorá má pri hustote 7,2 mg.m<sup>-3</sup> hodnoty  $R_m = 670$  MPa,  $A = 3,5$  %, ale je pomerne drahá. Medzi novšie typy ocelí patria ocele Ni-Cu-Mo s nižším obsahom Cu a Ni-Mo ocele (s malými prídavkami Mn, Cr) z predlegovaných práškov ASTALOY. Medzi hlavné prísady s vysokou afinitou ku kyslíku radíme Cr, Mn a Si. Závislosť mechanických vlastností manganovej ocele z práškového železa HAMETAG rozstrekaného práškového železa RZ s prídavkom uhlíkového feromangánu (lisovací tlak 590 MPa, spekanie pri 1120 °C po dobu 3 h v štiepenom amoniaku) je na

obr. 3.22). Ďalšími možnosťami ovplyvňovania vlastností tejto sústavy je zvyšovanie obsahu uhlíka a dolegovávanie ďalšími prvkami (Mo). Chrómovým oceliam je v súčasnosti venovaná vysoká pozornosť s ohľadom na výhodné vlastnosti Cr ako legujúceho prvku. Dostatočná difúzia Cr vyžaduje vyššie teploty spekania (až 1300 °C). U spekaných Cr-ocelí sa zatiaľ dosiahli pevnosti do 900 MPa, po zušľachtení až 1300 MPa.



Obr. 3.22. Mechanické vlastnosti spekaných mangánových ocelí (1 - HAMETAG, 2 - RZ)

*Kované práškové ocele* predstavujú samostatný smer práškovej metalurgie a zahŕňujú tieto operácie:

- príprava práškovej zmesi,
- dávkovanie prášku a jeho lisovanie za studena,
- spekanie,
- ohrev na kovaciu teplotu v ochrannej atmosfére,
- zhutnenie kovaním (v zápustke alebo iným spôsobom) a ochladzovanie PM výkovku.

Pre produkt tohto procesu skrátene sa používa označenie PM výkovok. Kovanie práškových kovov má všetky výhody presného kovania.



V uzavretej zápustke sa vykuje PM výkovok požadovaného tvaru bez výronkov na 1 zdvih; tolerancie sa pritom blížia bežným spekaným súčiastkam bez nedostatkov spôsobovaných pórovitosťou. Pre PM výkovky je charakteristické, že sú izotropné. V porovnaní s valcovanými polovýrobnkami (z kompaktných ocelí) majú napr. medzu únavy nižšiu ako anizotropné valcované ocele v smere valcovania, ale vyššiu ako valcované ocele naprieč smeru valcovania.