

**GVOŽĐE**, višekomponentna legura željeza koja, za razliku od čelika (v. Čelik, TE3, str. 43), sadrži više od 2% slobodnog ili hemijski vezanog ugljika. Pored ugljika, koji ga najbolje karakterizira, gvožđe redovito sadrži i mangan, silicij, sumpor i fosfor, a u manjoj mjeri, često samo u tragovima, bakar, arsen, antimон, dušik, vodik, krom, nikal, vanadij, kobalt i druge elemente. Prisutnost tih elemenata u gvožđu uzrokovana je sastavom sirovina od kojih se ono proizvodi, ali može biti uzrokovana i namjernim legiranjem, najčešće kromom, niklom, bakrom.

U mehaničkom pogledu gvožđe se znatno razlikuje od čelika. Gvožđe je toliko krhko i tvrdo da se lako može razbiti čekićem, pa se ne može oblikovati u čvrstom stanju, već se formira samo livenjem. Te osobine gvožđe ima zbog visokog sadržaja ugljika.

Historijski razvoj proizvodnje gvožđa prepiće se s razvojem proizvodnje čelika. Najprije se iz željeznih ruda izravno dobivao kovani metal (nad), više sličan čeliku. U stvari, proizvodnja je gvožđa počela dobivanjem metala koji nije bio kovak i koji se, da bi se iz njega dobio materijal s osobinama čelika, morao posebno rafinirati. Međutim, dugo vremena koegzistirale su i proizvodnja čelika direktno iz rude i proizvodnja gvožđa uz njegovu naknadnu preradu u čelik. U početku se gvožđe, koje se moralo ponovo preradivati da bi se dobio čelik, nazivalo pogrdnim imenima. Karakterističan je naziv pig

iron (svinjsko željezo), stvoren u to doba u Engleskoj, koji izražava nespremnost tadašnje tehnologije za prihvatanje i preradu gvožđa u čelik.

Povećanjem dimenzija primitivnih peći za direktnu preradu rude u čelik, posebno povećanjem njihove visine, snižavala se temperatura na njihovom vrhu. Zbog tako izmjenjenih toplovnih i metalurških uslova u peći smanjile su se oksidacione sposobnosti troške u gnijezdu peći i smanjila se oksidacija ugljika otopljenog u željezu. Uslijed toga povećani sadržaj ugljika u metalu smanjio je njegovu kovost, pa se umjesto čelika dobivalo gvožđe kao proizvod s vrlo ograničenom mogućnošću direktnе upotrebe.

Nije bio brzo prlač s prvotnog periodičnog postupka direktnog dobivanja čelika na kontinuiranu proizvodnju metala i troške u tekućem stanju, jer je uz izmjene konstrukcije peći zahtijevao i izbor prikladnih ruda željeza i dodataka za stvaranje lakotljivih troški. Trebalо је nekoliko stoljeća za usavršavanje prerade gvožđa u ognjišnjim pećima i da se ustanovi da je korisnije proizvesti metal s većim postotkom ugljika u šahtnoj (jamnoj) peći i rafinirati ga u ognjišnjim pećima nego direktno proizvoditi čelik u nižim, niskoproduktivnim pećima. Zbog toga je teško reći kad je zapravo počela namjenska proizvodnja gvožđa. Većina historičara smatra da se to počelo dešavati u trinaestom i četrnaestom stoljeću.

Do sredine šesnaestog stoljeća proizvodnja gvožđa nije bila velika. Njen pravi razmah počeo je tek nakon otkrića prerade gvožđa pudovanjem (koncem osamnaestog stoljeća) i Bessemerovog postupka (H. Bessemer, 1855).

Preolomnom etapom razvitka proizvodnje gvožđa u jammim pećima, koje su kasnije zbg njihovih velikih dimenzija nazvane visokim pećima, može se smatrati zamjenjivanje drynog uglja koksom. Ta je zamjena bila neminovna, jer je vrlo veliki porast proizvodnje gvožđa uzrokovao naglu sjeću šuma, posebno u Engleskoj, koja je u to vrijeme imala najrazvijeniju industriju čelika u Evropi.

Tablica 1  
SVJETSKA PROIZVODNJA GVOŽĐA

Zemlja ili kontinent	Godišnja proizvodnja $10^3$ t								Udeo u svjetskoj proizvodnji %			
	1938	1957	1960	1970	1972	1973	1974	1975	1938	1960	1970	1975
SR Njemačka	17586	21483	25739	33627	32003	36828	40221	30074	21,55	10,16	7,87	6,41
Belgia	2426	5547	6520	10955	11895	12767	13152	9187	2,97	2,57	2,56	1,96
Francuska	6012	11915	14005	19128	18988	20302	22517	17924	7,37	5,53	4,48	3,82
Italija	901	2138	2715	8354	9446	10098	11761	11410	1,10	1,07	1,96	2,43
Luksemburg	1551	3329	3713	4810	4671	5089	5468	3887	1,90	1,47	1,13	0,83
Holandija	267	701	1347	3289	4289	4707	4804	3968	0,33	0,53	0,84	0,85
Danska	—	59	69	215	203	76	—	—	0,03	0,05	—	—
Ujed. Kraljev.	6870	14511	16014	17672	15316	16838	13903	12042	8,42	6,32	4,14	2,57
Finska	28	129	104	1223	1184	1412	1381	1315	0,03	0,04	0,29	0,28
Norveška	174	557	718	678	647	700	661	630	0,23	0,28	0,16	0,13
Austrija	551	1960	2232	2964	2847	3006	3443	3080	0,67	0,88	0,69	0,68
Portugal	—	—	39	315	377	348	365	275	—	0,02	0,07	0,06
Švedska	668	1446	1518	2609	2355	2569	2979	3150	0,82	0,06	0,61	0,67
Švajcarska	—	45	50	28	28	26	35	35	—	0,02	0,01	0,01
Španija	436	999	1888	4164	5927	6269	6900	6850	0,59	0,75	0,97	1,46
Jugoslavija	75	714	972	1275	1820	1955	2126	2100	0,09	0,38	0,30	0,45
Turska	—	221	247	1560	1249	1044	1317	1100	—	0,10	0,27	0,23
Njemačka DR	231	1663	1996	1994	2155	2202	2280	2420	0,35	0,79	0,47	0,52
Bugarska	—	51	192	1201	1518	1566	1483	1500	—	0,08	0,28	0,32
Poljska	879	3682	4253	6984	7423	7731	7787	7760	1,07	1,68	1,63	1,65
Rumunija	133	686	1014	4211	4890	5713	6081	6400	0,16	0,40	0,99	1,36
Čehoslovačka	1323	3563	4695	7548	8360	8534	8905	9330	1,82	1,85	1,77	1,99
Mađarska	335	855	1275	1828	2064	2105	2290	2300	0,43	0,57	0,43	0,49
Europa	40446	76254	91315	136533	139655	151885	159859	136728	49,90	36,12	31,96	29,14
SSSR	14600	37039	46757	85933	92327	95933	99868	102350	17,93	18,46	20,12	21,18
Tajvan	—	—	—	61	85	85	90	95	—	—	0,01	0,02
Kina	41	5940	25300	16500	21000	21000	22000	22000	0,05	9,98	3,86	4,69
Indija	1596	1941	4154	6901	7077	7344	7223	8190	1,98	1,64	1,62	1,75
Japan	2563	6815	11896	68048	74055	90007	90437	86620	3,25	4,73	15,92	18,46
S. Koreja	295	278	872	2400	2600	2700	2800	2900	0,40	0,37	0,56	0,62
J. Koreja	—	—	—	41	6	455	986	1170	—	—	0,01	0,25
Tajland	—	—	—	3	3	3	3	3	—	—	0,00	0,00
Azija	4495*	14974*	42222*	93954	104826	121594	123539	120978	5,68	16,72	21,99	25,78
Argentina	—	—	—	815	849	804	1068	1030	—	—	0,19	0,22
Brazil	122	1252	1883	4205	5300	5540	5989	6990	0,18	0,74	0,98	1,49
Čile	—	384	266	481	486	458	516	430	—	0,11	0,11	0,09
Kanada	773	3582	3882	8243	8495	9495	9422	9180	0,95	1,53	1,93	1,96
Kolumbija	—	—	—	229	288	271	269	300	—	—	0,05	0,06
Meksiko	98	414	682	2261	2674	2775	2208	3215	0,19	0,27	0,53	0,69
Peru	—	—	—	86	163	253	303	300	—	—	0,02	0,06
Venezuela	—	—	—	510	536	546	545	570	—	—	0,12	0,12
SAD***	19219	73298	61072	83294	81102	91814	87007	73780	23,65	24,10	19,50	15,72
Amerika	20212*	78930*	67785*	100124	99893	111996	108327	95795	24,97	26,81	23,44	20,42
Egipat	—	—	—	300	299	250	275	300	—	—	0,07	0,06
J. Afrika	294	1359	1844	3947	4432	4355	4627	5100	0,36	0,73	0,92	1,09
Rodezija	—	—	—	250	290	300	310	310	—	—	0,06	0,07
Afrika	294*	1359*	1844*	4497	5021	4895	5202	5710	0,36	0,73	1,05	1,22
Australija	945	2132	2928	6148	6493	7659	7250	7635	1,16	1,16	1,44	1,63
Svijet:	81600*	210000*	253400*	427200	448200	494000	504000	469200	100	100	100	100

\* Pretpostavljeno ili djelomično utvrđeno

\*\* Bez Sovjetskog Saveza

\*\*\* Proizvodnja 1937:  $37,7 \cdot 10^6$  t; 1939:  $32,4 \cdot 10^6$  t

Tako je u Engleskoj početkom sedamnaestog stoljeća istaljeno 180kt gvožđa, a zbog nedostatka drvnog uglja njegova je proizvodnja u 1740. godini pala na svega 17,3kt. Pokušavalo se drvni ugalj zamijeniti kamenim, ali je pravo rješenje nađeno tek primjenom koksa. Upotreba koksa otežala je prolaz plinova kroz peć, pa je trebalo povećati snagu uređaja za uduvavanje zraka. To je uspjelo tek primjenom Wattove parne duvaljke (1775).

Za razvoj procesa taljenja gvožđa koksom trebalo je ~ 200 godina; trebalo se uvjeriti u nepodobnosti upotrebe kamenog uglja, provizesti dovoljno čvrsti koks, odrediti koji se ugljevi mogu koksovati, naći način uklanjanja sumpora iz metala i, konačno, zamijeniti vodenički snažnjim parnim pogonom.

U krajevima siromašnjim ili s već iscrpljenim izvorima drva, koks je relativno brzo istisnuo drvni ugalj. Međutim, npr. na Uralu je još 1913. bilo proizvedeno 913kt gvožđa samo pomoći drvnog uglja.

Prehistoricrska nalazišta čeličnih predmeta na teritoriji Jugoslavije registrirana su npr. kod Glasinaca (sjeveroistočno od Sarajeva) i kod Bosanske Građiške, Bihaća, Ljubije, Sanskog Mosta, na Kopaoniku, Vlasini, a proizvodnja čeličnih predmeta poznata je najviše iz doba Rimljana. Tragovi metalurške radnosti pronađeni su u Bosni (Starci Majdan kod Ljubije, okolina Kreševa, Fojnice i Vareša), oko Majdanpeka i u Gorenjskoj (kod Jesenica, Krope, Železnicu i Bohinja). U šesnaestom i sedamnaestom stoljeću veoma je razvijena proizvodnja metala na teritoriji Bosne (npr. Novi Pazar, Vlasina). Tada se gvožđe proizvodilo i u Janjevu na Kosovu.

Modernija postrojenja za proizvodnju gvožđa izgrađena su u Petrovoj Gori, Bešlincu i Trgovi (1856/1857). Peći sa starijim postupkom proizvodnje gvožđa, tzv. duvanaice, gradile su se na više mjesta. U okolini Vareša bilo je 1886. još 13 duvanaica. Posljednja od njih prestala je radom 1896. godine. Neke duvanaice bile su i dalje u pogonu, npr. u Crnoj Rijeci do 1902., u Dusini kod Kreševa do 1903. godine. Posljednja duvanaica u Jugoslaviji ugašena je 1914. u Ovanjskoj.

Prva visoka peć u Varešu podignuta je 1891. godine. Bila je visoka 12,4m i imala je zapremenu od  $36\text{m}^3$ . Proizvodila je svega 9t gvožđa dnevno. Već 1896. u Varešu je podignuta i druga visoka peć s kapacitetom od 55t dnevno, a umjesto prve počela se graditi nova s kapacitetom od 70t gvožđa dnevno.

Današnja željezara u Jesenicama počela je savremenije raditi 1869. osnovanjem Kranjske industrijske družbe, koja je sagradila 3 visoke peći u Škednju kod Trsta. U Jesenicama je prva visoka peć podignuta 1937, a druga 1940. godine. Željezara u Smederevu (osnovana 1913) sagradila je prvu visoku peć u Majdanpeku 1938. godine. To je također bila mala peć, s proizvodnjom od svega 12t gvožđa dnevno.

Ukupna je proizvodnja gvožđa u Jugoslaviji pred drugi svjetski rat iznosila ~160kt. Najveći jugoslavenski proizvođači gvožđa bile su tada željezare u Jesenicama i Varešu. Poslije rata obnova proizvodnje bila je moguća jedino u tim dvjema željezarama.

Proizvodnja gvožđa u željezari u Zenici počela je gradnjom nove željezare poslije 1948. godine. Prva visoka peć puštena je u pogon 1954, druga 1955,

a treća 1958. godine. Sve su te tri peći približno jednake zapremine (~1000m<sup>3</sup>). Projektovane su za kapacitet od 600kt gvožđa godišnje, ali se različitim inovacijama postigla (1975) godišnja proizvodnja od ~862kt. Najsavremenija visoka peć u Jugoslaviji izgrađena je u Smederevu 1971. godine. Zapremina joj je 1032m<sup>3</sup>.

U željezarama u Iljašu, Skopju i Štorama proizvodi se gvožđe elektro-reduksionim pećima (tabl. 7). U Jugoslaviji je 1975. ostvarena proizvodnja gvožđa od 2,1Mt, što je 0,45% od svjetske proizvodnje u toj godini (tabl. 1).

**Vrste i struktura gvožđa.** Željezo redukovano u visokoj peći otapa prisutni ugljik do zasićenja na temperaturi procesa i redovno određene količine silicija, mangana, fosfora i sumpora, često i druge elemente ako su prisutni u zasipnoj mješavini, pa se tim procesom ne može dobiti čisto željezo. Već prema sastavu sirovina i uslovima hlađenja gvožđa, dobivaju se različiti proizvodi.

Pri tom su najvažnija svojstva osnovnih sastojaka gvožđa: željeza, ugljika i silicija. Uslijed polimorfizma željeza u gvožđu pojavljuju se dvije vrsti čvrstih otopljenih primjesa: otopine u  $\alpha$ -modifikaciji željeza (postojanoj na temperaturi nižoj od 910°C), tzv. feritu, i u  $\gamma$ -modifikaciji željeza (postojanoj do 1400°C), tzv. austenitu. Pored toga se u gvožđu pojavljuju i ugljik, u obliku grafita, kao stabilna, i karbid željeza, kao metastabilna faza.

Topljivost silicija i ugljika u tekućem je željezi neograničena, ali to ne vrijedi za čvrsto stanje (v. Čelik, TE 3, str. 49, dijagram stanja Fe-C). U skladu s dijagramom stanja sistema Fe-C, gvožđe je prema svom sastavu doeutektičko (sa sadržajem ugljika 2...4,3%), eutektičko (sa 4,3% ugljika) i nadoeutektičko (s više od 4,3% ugljika). Kristalizacija doeutektičkog gvožđa počinje stvaranjem kristala austenita i završava se eutektičkim preobražajem. Austenit obično kristalizira u obliku dendrita. Već prema sastavu rastopine (naročito sadržaja silicija) i uslova očvršćavanja, ugljik se u gvožđu izlučuje kao grafit ili hemijski vezan u cementitu, ili kao smjesa grafita i cementita.

Ako se čitav ugljik preobražava u grafit, gvožđe očvršćava u austenitnografitnoj strukturi. Prema njegovom sivom prelomu takvo se gvožđe naziva sivim gvožđem (sl. 1a). Gvožđe koje je dvofazna smjesa austenita i cementita ima bijeli prelom, pa se



Sivo gvožđe (povećano 800×)



Bijelo gvožđe (povećano 500×)

naziva bijelim gvožđem (sl. 1b). Moguće je i očvršćavanje gvožđa koje odgovara eutektičkom sastavu, u kojemu su prisutne sve tri faze (austenit, grafit i cementit). Takvo se gvožđe naziva meliranim gvožđem.

Osim poliformizmom željeza, strukturne promjene gvožđa pri hlađenju nakon očvršćavanja uzrokovane su različitimtoplji-vošću ugljika u pojedinim modifikacijama željeza, eutektoidnim raspadom austenita i raspadom cementita uz izlučivanje grafta. U čvrstom stanju u gvožđu može se pojaviti rekristalizacija austenita i ferita, sferoidizacija uključenog grafta i srašćivanja sitnih uključaka iste faze (koalescencija). Hlađenjem gvožđa čvrste se otopine ugljika zasićuju, pa se izdvaja faza s višim sadržajem ugljika (cementit) ili slobodni ugljik (grafit). Pri jačem potihlađivanju smjesa ferita i cementita dobiva trakastu strukturu (perlitna struktura), to finiju što je temperatura eutektoidnog raspada niža.

Najčešće se gvožđe razlikuje prema sastavu, a osim toga prema namjeni u daljoj preradi i prema vrsti sirovina iz kojih je dobiveno. Obično se gvožđe proizvedeno u visokoj peći svrstava u tri osnovne grupe: livničko (sivo) gvožđe, gvožđe za proizvodnju čelika (bijelo gvožđe) i specijalno gvožđe.

Prisutnost grafta u livničkom gvožđu uzrokovana je višim sadržajem silicija (do 4,25%), jer se pod njegovim uticajem ugljik izlučuje iz čvrste otopine. Osim toga, karakteristike sastava livničkog gvožđa jesu: sadržaj mangana (maks. 1,3%), fosfora (obično 0,1–0,3%, ali i više) i sumpora (kvalitetna livnička gvožđa sadržavaju najviše do 0,05%). Siva gvožđa sa sadržajem fosfora do 0,1% nazivaju se hematitnim, a sa sadržajem fosfora iznad toga fosfornim gvožđem.

Livničko gvožđe klasificira se prema sadržaju silicija i mangan. Svaka klasa livničkog gvožđa ima i dozvoljeni maksimalni sadržaj sumpora. Osim toga, livničko se gvožđe razlikuje i prema gorivu upotrebljenom za njegovu proizvodnju. Gvožđe proizvedeno drvnim ugljem bolje je kvaliteta, čak i kad je jednakog sastava kao i gvožđe proizvedeno koksom.

Livničko se gvožđe upotrebljava za izradu odlivaka od sivog liva namijenjenih direktnoj upotrebi, ili uz prethodnu mehaničku obradu. Hematitna gvožđa upotrebljavaju se za izradu kvalitetnih odlivaka. Budući da fosfor povećava žitkost gvožđa, fosforna se gvožđa upotrebljavaju za izradu odliva kad je potrebno da gvožđe bolje ispunjava kalupee.

Bijelo se gvožđe ne može direktno upotrebiti, već služi kao poluproizvod za dalju preradu u čelik; odatle i naziv gvožđe za proizvodnju čelika. To se gvožđe klasificira prema načinu dalje prerade (v. Čelik, TE3, str. 57). Tako se bijelo gvožđe, kad mu je sadržaj fosfora toliko visok (1,5–2,2%) da se može preraditi samo Thomasovim postupkom, naziva Thomasovim gvožđem.

Većina zemalja vlastitim standardima određuje sastav, fizički izgled i druge karakteristike gvožđa prema grupama i klasama. Jugoslavenski proizvođači također su se dogovorili o podjeli gvožđa u grupe (tabl. 2).

Tablica 2  
VRSTE GVOŽĐA U JUGOSLAVIJI

Vrsta gvožđa	Grupa	Sadržaj %				
		C	Si	Mn	P	S
Bijelo gvožđe		> 3,0	< 1,25	< 3,5	< 0,3	< 0,07
Sivo hematitno gvožđe	I	> 3,5	> 1,0	maks. 1,20	maks. 0,1	maks. 0,4
	II	> 3,5	> 1,0	maks. 1,20	maks. 0,1	maks. 0,4
Sivo fosforno gvožđe	I	> 3,5	> 1,0	maks. 1,0	0,1–0,35	Podgrupa I
	II	> 3,5	> 1,0	maks. 1,0	0,36–0,70	maks. 0,04 > 0,04
	III	> 3,2	> 1,0	maks. 1,0	> 0,71	maks. 0,04 > 0,04
Sivo specijalno gvožđe	I	> 3,5	> 0,5	maks. 0,08	maks. 0,08	maks. 0,03
	II	> 3,5	> 0,5	0,081–0,60	maks. 0,08	maks. 0,03
	III	> 3,5	> 0,5	0,61–1,20	maks. 0,08	maks. 0,03

Tablica 3  
FEROLEGURE KOJE SE PROIZVODE U VISOKOJ PEĆI

Naziv ferolegure	Oznaka	Sadržaj %			
		Si	Mn	P (maks.)	S (maks.)
Ferosilicij	FS1	13,1 i više	najviše 3,0	0,18	0,04
	FS2	9,0–13,0	najviše 3,0	0,18	0,04
Zrcalasto gvožđe	Z1	najviše 2,0	20,1–25,0	0,22	0,03
	Z2	najviše 2,0	15,1–20,0	0,20	0,03
	Z3	najviše 2,0	10,0–15,0	0,18	0,03
Silikozrcalasto gvožđe	SS1	9,0–13,0	18,0–24,0	0,20	0,03
Fermangan	FM1	najviše 2,0	75,1 i više	0,35–0,45	
	FM2	najviše 2,0	70,0–75,0	0,35–0,45	0,03

U specijalna gvožđa ubrajaju se ferolegure koje se upotrebljavaju za proizvodnju čelika. Najpoznatije su ferosilicij, fermangan, zrcalasto gvožđe i silikozrcalasto gvožđe. U visokim pećima ponekad se proizvode i druge ferolegure, npr. ferokrom, ferovanadij sa znatnim sadržajem ugljika (tabl. 3).

Tablica 4  
PROIZVODI OD TROSKE VISOKE PEĆI

Proizvod	Način dobivanja	Izgled	Upotreba
drobljena troska	plitkim livenjem	kristalan	u cestogradnji kao grubo, srednje i sitno zrno u mješavini s katranom; podloga za željezničke kolosijekе; dodatak betonu
		kristalan	
koma-dasta troska	sporo hlađenje	izlivanjem na jalovište	Kao gore, te u hidrogradnji kao materijal za nasipavanje
		oblikovanjem livenjem	kristalan
uboličeni kamen		oblikovanjem livenjem	Za popločavanje puteva
pjesak	brzo hlađenje	granularanjem u vodi	Za proizvodnju cementa, posebno željezničkog portland-cementa, opeke te kao dodatak malteru
pjenasta masa	stvaranje pjene u vodi	porozan	Za izradu pjenastog betona, šupljie opeke, lakog betona, izolaciju od topote i zvuka
troskina vuna	raspršivanjem	vlaknast	Kao izolacioni materijal, ispredena u uže, trake, formirana u ploče, opeke itd.

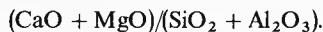
**Sporedni proizvodi visoke peći.** Redovni sporedni proizvodi proizvodnje gvožđa u visokoj peći jesu troska, plin visoke peći (grotleni plin) i prašina visoke peći. Ako se preraduju željezne rude koje sadržavaju mineralne olove, kao sporedni produkt iz visoke peći može se dobiti i sirovo olovo.

**Troska visoke peći** nema veliku vrijednost, ali je njena prerada u korisne proizvode (tabl. 4) znatna, jer inače troškovi njenog transporta i odlaganja na jalovište terete proizvodnu cijenu gvožđa.

Troska visoke peći pretežno se granuliše. Za to se upotrebljava (tzv. mokri) postupak granulacije s velikom količinom vode. Da se izbjegne transport tekuće troske vagonima, postrojenje za granulaciju troske smještava se neposredno uz visoku peć.

Granulirana troska prikladna je sirovina za proizvodnju različitih metalurških cemenata (v. Cement, TE2, str. 585), i (pomoći kreća ili cementa) troskinih ili troskinobetonских opeka i blokova. Svaka troska visoke peći nije jednako dobra sirovina za proizvodnju građevnih materijala, jer to ovisi o njenom

sastavu i fizičkim osobinama. Npr., za izradu portland-cementa može poslužiti samo troska s indeksom baziciteta od 0,9...1,1. Taj je indeks određen omjerom



Troskina vuna izrađuje se od kisele troske visoke peći, duvanjem komprimiranog zraka u mlaz tekuće troske. Dobar je izolacioni materijal.

Pjesnasta troska izrađuje se na jednak način. Time se dobiva laki izolacioni građevni materijal. Za izradu lakog betona pjenasta troska dobiva se i hlađenjem tek tolikom količinom vode da se stvori pjena (da troska nabubri).

*Plin visoke peći.* Količina plina koji nastaje procesom u visokoj peći vrlo je velika: njena masa može biti i više nego dvostruka od ukupne mase proizvedenog gvožđa i troske (obično se dobiva 3500...4000 m<sup>3</sup> plina po t koksa, a gustoća je plina 1,28 kg m<sup>-3</sup>). Zbog toga je korisna upotreba tog plina vrlo važna za ekonomičnost proizvodnje gvožđa.

Plin visoke peći obično sadrži 10...16% CO<sub>2</sub>, 25...30% CO, 0,5...4% H<sub>2</sub>, 0,5...3% CH<sub>4</sub>, 52...60% N<sub>2</sub> i ~100g vodene pare po m<sup>3</sup> (vlažnost mu ovisi o vlažnosti rude), pa se može upotrebiti za loženje.

Temperatura je sagorijevanja plina visoke peći s hladnim zrakom 1200...1400°C, a ogrjevna moć od 3350...4600 kJ m<sup>-3</sup> (800...1100 kcal m<sup>-3</sup>). Ona se smanjuje sa smanjivanjem specifične potrošnje koksa. Pri relativno malom utrošku koksa, karakterističnom za rad savremenih visokih peći, ogrjevna moć plina toliko je mala da je upotreba tog plina u čistom stanju vrlo ograničena. Ipak, iskorištenje plina visoke peći utiče na energetski bilans željezare: 25...35% plina troši se za pogon visoke peći (za predgrijavanje zraka), a ostatak u drugim pogonima, najčešće zajedno s koksnim plinom.

*Prašina visoke peći.* Da bi se plin visoke peći mogao iskoristiti, mora se očistiti od prašine koja je u njemu suspendirana. Obično je suspendirano 40...60g prašine u 1 m<sup>3</sup> plina, ponekad i više (do 100 g m<sup>-3</sup>). Njeni sastojci dijelom su s plinom mehanički povućene tvari, a dijelom kondenzati supstancija koje se nalaze u komponentama zasipne mješavine, a isparavaju u peći. Najviše u njoj ima oksida željeza (do 50% vezanog Fe). Prašina visoke peći aglomerira se sintrovanjem i vraća u visoku peć.

Najvažnije oksidne rude željeza jesu: magnetit, hematit i limonit, a siderit je najvažnija karbonatna ruda; silikatne i sulfidne rude željeza danas se ne eksploraju u većim razmjerima za proizvodnju gvožđa, a tek u maloj mjeri silikat šamozit.

*Magnetit* najcjenjenija je ruda željeza. Prema formuli Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, u čistom stanju sadrži 72,4% željeza i 27,6% kisika. Boja mu je siva do crne, gustoća 5,0 kg dm<sup>-3</sup>. Magnetičan je, pa se relativno jednostavno koncentriра iz smjesa s drugim mineralima i jalovinom. Procjenjuje se da se svega ~5% potreba svjetske proizvodnje željeza pokriva magnetitom kao osnovnom sirovinom.

*Hematit* je za proizvodnju gvožđa najvažnija osnovna sirovina. Prema formuli Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, u čistom stanju sadrži ~70% željeza. Vrlo je često pomiješan s drugim mineralima, ponekad s toliko krečnjaka da je samotaljiv (taljiv u visokoj peći bez dodavanja taljiva).

*Limonit* je hidratni oksid željeza s različitim količinama vezane vode, tako da mu se ne može pripisati neka određena hemijska formula, već se sastav prikazuje formulom Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · nH<sub>2</sub>O. Nalazišta su mu raširena po čitavom svijetu.

*Siderit*, prema formuli FeCO<sub>3</sub>, sadrži 48,3% željeza. Također ponekad sadrži toliko krečnjaka da je samotaljiv.

Tablica 5  
PROCJENA SVJETSKIH REZERVI  
RUDA ŽELJEZA (1974)

Kontinent	Rezerva Tt
Evropa	128,50
Obje Amerike	95,66
Azija	11,00
Afrika	13,61
Australija	7,51
UKUPNO	258,28

Koncem 1974. svjetske rezerve ruda željeza bile su procijenjene na ~258 Tt (tabl. 5). U isto vrijeme jugoslavenske rezerve ruda željeza (tabl. 6) procijenjene su na skoro 2 Tt. Pri-

Tablica 6  
PROCJENA REZERVI RUDA ŽELJEZA U JUGOSLAVIJI (1974)

Ruda	Rezerve		Sadržaj %			Primjedba
	kt	%	Fe	Mn	SiO <sub>2</sub>	
Limonit	295 551	32,20	46,3	2,1	11,3	Ležišta u eksploraciji
Hematin	56 304	6,13	33,0	3,8	18,5	Ležišta u eksploraciji
Magnetit	34 267	3,76	41,7	0,5	17,8	Ležišta u eksploraciji
Siderit	249 083	27,14	34,1	3,4	7,0	Ležišta u eksploraciji
Ankerit + siderit	158 603	17,28	31,4	1,5	6,9	Ležišta u pripremi za eksploraciju
Siderit + šamozit	123 815	13,49	36,9	0,4	17,9	Ležišta u eksploraciji
Bilansne rezerve	917 623	46,21*	100,00	38,1	2,2	10,9
Šamozitni škriljac	117 000	10,90	20,4	0,4	45,0	Ležišta nisu u eksploraciji
Ni magnetit	451 155	89,10	23,9	0,4	22,0	Ležišta nisu u eksploraciji
Vanbilansne rezerve	1068 155	53,79*	100,00	23,5	0,4	24,5
UKUPNO	1985 778	100,00	30,2	1,2	18,2	

\* % od ukupnih rezervi

**Osnovne sirovine za proizvodnju gvožđa.** Osim željeznih ruda za proizvodnju gvožđa, potreban je i niz pomoćnih sirovina, koje se mogu svrstati u tri osnovne grupe: goriva, taljiva i korektori sastava gvožđa.

Rude željeza su minerali ili smjese minerala iz kojih je ekonomično proizvoditi gvožđe. Postoji mnogo minerala i smjesa minerala koje sadrže (vezano) željezo, ali samo nekoliko minerala ima komercijalnu vrijednost, jer je sadržaj željeza u većini tih minerala suviše nizak, ili je udio minerala bogatog željezom u tim smjesama suviše malen. Prema hemijskom sastavu najvažnije grupe minerala – ruda željeza jesu: oksidi, karbonati, silikati i sulfidi željeza.

tome su uzete u obzir rude koje se mogu eksploratisati i rude kojih je prerada ekonomski opravdana.

Vrijednost neke rude željeza određuju: lokacija nalazišta, cijena sličnih ruda, troškovi njenog transporta, njen hemijski sastav i fizički oblik, a prije svega bogatost željezom. Prve tri karakteristike imaju samo ekonomsko značenje. Međutim, hemijski sastav rude određuje način njene prerade (posebno način taljenja, vrstu i količinu taljiva, potrebnu količinu goriva i sastav gvožđa).

U visokoj se peći redukuje samo dio u rudi prisutnih spojeva već navedenih elemenata, a ostali ostaju nereduovani i ne utiču na osobine proizvoda. Redukovani elementi otapaju se

u gvožđu i mogu mu toliko promijeniti svojstva da se ne može dalje prerađivati. Zbog toga se mora posebno paziti na spojeve tih elemenata u rudi.

Tehnološko-ekonomsku vrijednost rude najviše određuju bogatost željezom i mogućnosti da se prethodnom obradom ono što više koncentriše u osnovnoj sirovini i da se istovremeno što više smanji sadržaj pratećih sastojaka. To čak može uticati i na investicione troškove prerade rude u gvožđe i čelik. (Često se bogatije rude dadu preraditi jednostavnijim postrojenjima.)

Goriva imaju vrlo složenu funkciju u visokoj peći. Sagorijevanjem u gnejezdu peći daju toplotu za zagrijavanje zasipa, gvožđa i troske, potrebnu za topljenje i za endotermne reakcije procesa (reakcije disocijacije i redukcije). Osim toga, goriva su nosioci ugljika potrebnog za redukciju i za ugljičenje gvožđa. Za pogon visoke peći upotrebljavaju se koks, formkoks, mazut, visokokalorični plinovi (koksnii ili zemni plin), rijede ugljena prashina. Koksom, odnosno formkoksom, peć se hrani zajedno s rudnim zasipom. Mazut ili zemni plin, a ponekad ugljena prashina, injektiraju se u peć zajedno sa zrakom, kroz duvnice direktno u gnejezdo peći.

Koks (v. *Ugljen*) glavni je nosilac topline i najvažnija je pomocna sirovina za proizvodnju gvožđa u visokoj peći. Metalurški koks za upotrebu u visokoj peći mora imati zrnovitost 20...100mm, sadržaj ugljika više od 85%, sumpora manje od 2%, a negorivih sastojaka manje od 12%. Osim toga, metalurški koks mora biti dovoljno čvrst.

Cvrstoća koksa izražava se u sistemu mikum pokazateљa, koji se određuju granulometrijskom analizom uzorka koksa od 50kg nakon 100 okretnja u metalnom bumbu prečnika i duljine od 1000mm. Metalurški koks mora imati mikum 10 (udio čestica manjih od 10mm manje od 8%) i mikum 40 (udio čestica većih od 40mm više od 70%).

Zbog deficitarnosti koksnih ugljeva danas se teži smanjivanju potrošnje koksa u visokim pećima. To se postiže različitim poboljšanjem procesa i djelomičnom zamjenom koksa drugim gorivima koja se u peć injektiraju sa zrakom.

Taljiva služe za osiguranje ispravnog sastava troske. Ona treba da budu takva da se postigne prikladna temperatura taljenja i moć odsumporavanja troske. Jalovina je većine ruda kisela, s visokim sadržajem  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pa se kao taljiva upotrebljavaju pomoćne sirovine koje sadrže bazične komponente,  $\text{CaO}$  i  $\text{MgO}$ , najčešće krečnjak i dolomit. Za povećanje sadržaja  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u troski, što je često potrebno u proizvodnji sivog gvožđa, upotrebljava se boksi. Glavni je kvalitetni uslov za sva taljiva da sadrže što manje  $\text{SiO}_2$ , i drugih štetnih primjesa, u prvom redu što manje sumpora i fosfora. Taljivima se visoka peć hrani takođe zajedno s rudnim zasipom.

Tablica 7

#### NAJAVAŽNJA SVJETSKA POSTROJENJA ELEKTROREDUKCIJONIH PEĆI

Lokacija		Broj peći	Instalirana snaga (MVA) po peći	Kapacitet postrojenja kt/god.
Zemlja	Mjesto			
Peru	Chimbote	2	13,2	65
Švedska	Lulea	3	12,0	80
Brazil	Belo Horizonte	2	17,0	
Norveška	Breinanger	1	33,0	80
	Moi Rana	4	33,0	720
		2	60,0	
Venezuela	Matanzas	9	33,0	720
Kanada	Sorel	8	19,5	300
Jugoslavija	Skopje	3	33,5	383
		2	42,0	
	Ilijaš	3	13,2	110
	Štore	1	18,0	50

Korektori sastava gvožđa obično su manganske rude sa 30...57% mangana, ako treba povećati sadržaj mangana u gvožđu, ili fosforiti, ako treba povećati njegov sadržaj fosfora. I njima se peć hrani zajedno s rudnim zasipom.

**Proizvodnja gvožđa.** Danas se u svijetu gvožđe najviše proizvodi (više od 95%) u visokim pećima. Ostatak se proizvodi drugim postupcima. Oni su rezultati nastojanja da se visoko-kvalitetni metalurški koks, nužan za proces u visokoj peći, zamjeni drugim gorivima. Posebno je to važno za zemlje koje nemaju vlastitih nalazišta uglja prikladnog za proizvodnju metalurškog koksa, ali imaju drugih vrsta uglja. Među takve zemlje spada i Jugoslavija. Određene se količine gvožđa (~ 3,5Mt, što čini ~ 0,75% od svjetske proizvodnje) u tim zemljama dobivaju procesom u tzv. niskim elektroreduktionim pećima (tabl. 7). Osim toga, male se količine gvožđa proizvode i postupcima s niskim i rotacionim pećima, te kombinacijom proizvodnje željeznog koksa i procesa u visokoj peći.

D. Rejc

#### TEORIJSKE OSNOVE PROIZVODNJE GVOŽĐA

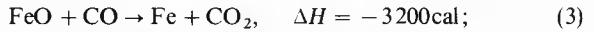
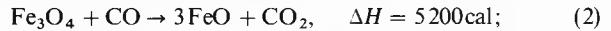
U suštini je proizvodnja gvožđa redukcija oksida u rudama željeza. Spojevi željeza u rudama koje nisu oksidne prethodno se, naime, konvertiraju u okside nekim od postupaka pripreme zasipa. Redukcijom se dobiva čvrsti proizvod, tzv. predredukovano, odnosno metalizovano željezo. Ako se pored redukcije željezo još i rastali, iz rude se izdvaja jalovina i dobiju se tekući proizvodi (gvožđe i troska). Zbog toga teorijski osnovi proizvodnje gvožđa obuhvataju fazne ravnoteže redukcionih procesa, osnove kinetike redukcije, proučavanje procesa dobivanja gvožđa i troske, proučavanje strukture i osobina troske, te analizu procesa redukcije.

**Fazne ravnoteže redukcije ruda željeza.** Reducenti oksida u rudama željeza u procesima proizvodnje gvožđa jesu čvrsti ugljik (iz oksida ili ugljena), njegovi tekući i plinoviti spojevi (iz naftinskih derivata, odnosno prirodnog plina) i vodik.

Najnovijim ispitivanjima utvrđilo se da se u industrijskim procesima redukcije ruda željeza praktički ne odvijaju reakcije između čvrstih oksida željeza i čvrstog ugljika, već samo reakcije između oksida željeza i plinova: ugljik-monoksida i vodika, koji u tim procesima nastaju različitim reakcijama. Reakcije između oksida željeza i ugljika moguće su samo kad su oksidi u tekućem stanju.

Već klasičnim ispitivanjima tokom prošlog stoljeća utvrđene su reakcije koje se odvijaju u tim procesima. Među njima najvažnije su reakcije koje se odvijaju u sistemu oksida željeza i ugljik-monoksida. Važne su i reakcije koje se odvijaju u sistemu oksida željeza i vodika. Pored toga, za procese redukcije ruda željeza vrlo su važne neke reakcije u plinovima i reakcije plinova s ugljikom.

Reakcije u prvom od spomenutih sistema (s entalpijama preračunatim na stanje na 25°C) jesu:



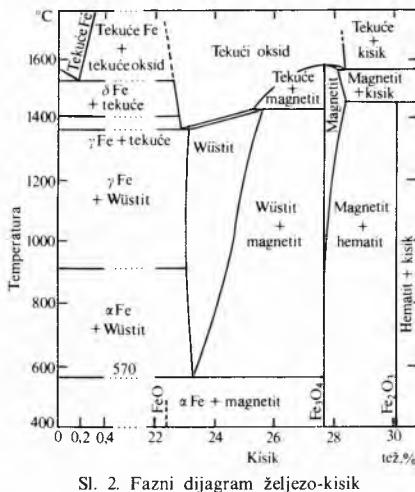
Pri tom se, dakle, radi o dva niza reakcija: jednom s redom  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$  i drugom s redom  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}$ . Prema faznom dijagramu sistema željezo-kisik (sl. 2) za procese redukcije ruda željeza najvažnija je reakcija (3), jer je faza  $\text{FeO}$  stabilna na temperaturama na kojima se ti procesi odvijaju.

Strogo uvezši,  $\text{FeO}$ , željezo(II)-oksid, uopće ne postoji kao spoj s tom stohiometrijskom formulom, već je, iznad 570°C, stabilna samo suptrakcijska faza (faza s praznim kationskim mjestima), najčešće s područjem homogeniteta  $\text{Fe}_{0,90}\text{O} \cdots \text{Fe}_{0,95}\text{O}$ , zvana wüstit, koja se označava formulom  $\text{Fe}_x\text{O}$ . Na nižoj temperaturi wüstit se raspada prema reakciji



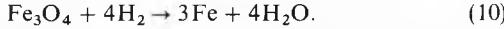
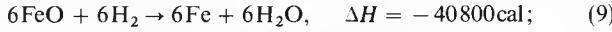
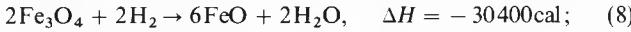
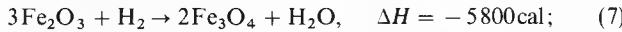
pa se tada proces redukcije ruda željeza odvija drugim od navedena dva niza reakcija. Međutim, za savremene procese redukcije ruda željeza, koji se najvećim

dijelom odvijaju na mnogo višim temperaturama, taj drugi niz reakcija od manjeg je značenja nego prvi. Uglavnom se ti procesi svode na redukciju wüstita.

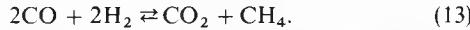
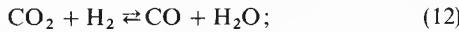
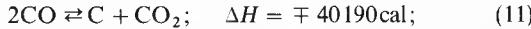


Sl. 2. Fazni dijagram željezo-kisik

U sistemu oksida željeza i vodika moguće su reakcije (također s entalpijama preračunatim na stanje na 25°C):



Ostale, za procese redukcije ruda željeza, vrlo važne reakcije jesu:



To su reverzibilne reakcije procesa rasplinjavanja (gazifikacije) ugljena (v. *Ugljen*) s konstantama ravnoteže vrlo zavisnim od temperature (sl. 3). Posebno je važna reakcija (11), u smjeru slijeva nadesno, poznata kao Bellova (prema I. L. Bellu), a u smjeru zdesna nalijevo kao Boudouardova (prema O. Boudouardu). Zbog toga što je Bellova reakcija vrlo egzotermna, a Boudouardova vrlo endotermna, ravnoteža njihova reakcijskog sistema (sl. 4) pomici će se nalijevo s porastom temperature.

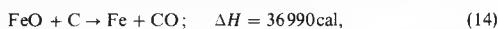
Kako se pri redukciji ruda željeza sve te reakcije odvijaju istovremeno utičući jedna na drugu, taj je proces vrlo složen. Za analizu tog procesa u visokoj peći važni su pojmovi indirektnе redukcije i gubitka otapanjem.

Pod indirektnom redukcijom razumijeva se proces koji se u hemijskom pogledu odvija reakcijom (3) na dovoljno niskim temperaturama (ispod 870°C) da ugljik-dioksidi koji nastaje na pušta peć ne učestvujući dalje u hemijskim reakcijama.

Pod gubitkom otapanja razumijeva se proces koji se odvija Boudouardovom reakcijom na za to dovoljno visokim temperaturama. Tada, naime, izgleda kao da se ugljik otapa u plinu i vjerojatno neće sagorjeti sa zrakom ispred duvnica. Za opisivanje uticaja gubitka otapanjem na proces redukcije ruda željeza u visokoj peći mnogo se upotrebljava tzv. Chaudronov dijagram (prema G. Chaudronu, sl. 5), koji prikazuje ravnotežna stanja sistema željezo-kisik-ugljik pod ~0,1 MPa (1at).

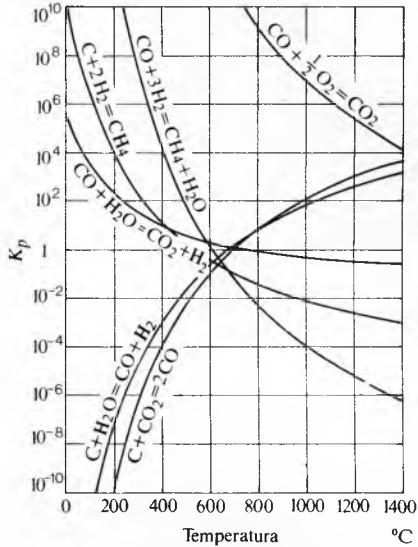
U cijelom području tog dijagrama lijevo od Boudouardove krivulje nestabilan je ugljik-monoksid (prevladava Bellova reakcija), a desno od nje ugljik-dioksidi ako je prisutan ugljik (prevladava Boudouardova reakcija). Međutim, kako je Bellova reakcija vrlo spora, ipak je u području u kojem ona prevladava moguća redukcija oksida željeza uspostavljanjem metastabilnih stanja, i to ne samo reakcijama (2) i (3) nego i reakcijom (4) (crtkani dijelovi krivulja). U području u kojem prevladava Boudouardova reakcija uspostavljaju se stabilna stanja reakcijom (1), (2), (3) i (5).

Direktna redukcija, koja se definira kao vrlo endotermna hemijska reakcija

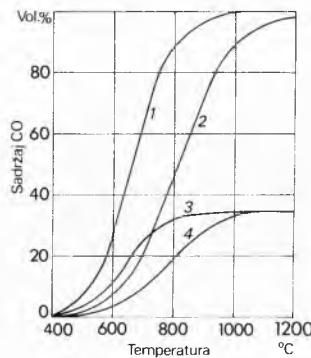


(među čvrstim reaktantima), prema tome je samo prividna. U stvari, to je sumarni proces reakcije (3) i Boudouardove reakcije.

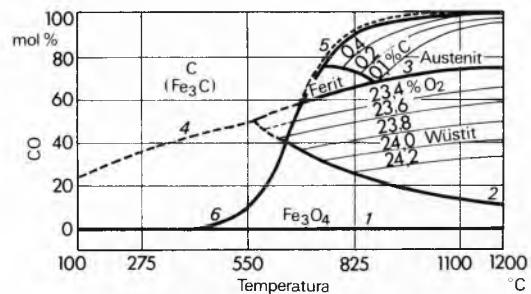
**Osnovi kinetike redukcije ruda željeza.** Termodinamički uslov za početak redukcije oksida jest temperatura iznad koje pritisak kisika, koji nastaje disocijacijom oksida, postaje viši od parcialnog pritiska kisika u atmosferi oko oksida. Zbog toga je ta temperatura zavisna i od koncentracije reducenta. Prema tome, pri reakcijama (1)–(5) temperatura početka redukcije oksida željeza zavisi i od sadržaja ugljik-monoksida i ugljik-dioksida, a pri reakcijama (7)–(10) od sadržaja vodika i vodene pare u plinu. To se može prikazati dijagromom kao zavisnost temperature početka redukcije  $t$  od omjera  $\text{CO}:\text{CO}_2$ , odnosno  $\text{H}_2:\text{H}_2\text{O}$  (sl. 6). Tačnost određivanja temperature početka primjetne redukcije ruda željeza zavisa je od metode registrovanja početka



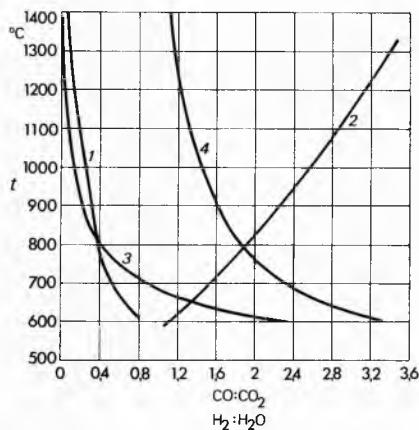
Sl. 3. Zavisnost od temperature konstanti ravnoteže reakcija važnih za rasplinjavanje uglja



Sl. 4. Boudouardova ravnoteža pri različitim uslovima. 1 i 2 pri rasplinjavanju kisikom, odnosno zrakom pod ~0,1 MPa (1at); 3 i 4 pri rasplinjavanju kisikom, odnosno zrakom pod ~2 MPa (20at)



Sl. 5. Chaudronov dijagram. 1, 2, 3, 4, 5 krivulje ravnoteže reakcija (1), (3), (4) i (5), 6 krivulja ravnoteže reakcije (11) (Boudouardova krivulja)



Sl. 6. Zavisnost temperature početka redukcije oksida željeza od sastava smjese CO i CO<sub>2</sub> i smjese H<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O. t temperatura početka redukcije, 1, 2, 3 i 4 krivulje reakcija (2), (3), (8) i (9)

procesa, pa njene utvrđene vrijednosti mogu biti jednake teorijskim, ali i veće od njih. Osim toga, temperatura početka primjetne redukcije ruda željeza zavisi i od prirode njihovih oksida (tabl. 8).

Tablica 8

TEMPERATURE POČETKA PRIMJETNE REDUKCIJE NEKIH RUDA ŽELJEZA U ATMOSFERI UGLJIK-MONOKSIDA

Ruda	Sirovi limonit	Prženi limonit i magnetit	Kristalni, hemijski čisti magnetit
°C	220	330	450

Redukcija ruda željeza plinom složen je heterogeni proces. Njegov mehanizam niz je nekoliko elementarnih procesa vrlo važnih za brzinu industrijske prerade: vanjske difuzione razmjene, kristalochemijskih preobražaja i difuzije u materijalu koji se redukuje.

Pod vanjskom difuzionom razmjenom razumijeva se transport reducenta iz glavne mase plina do vanjske površine čestica rude i transport plinovitih produkata redukcije u suprotnom smjeru.

Kristalochemijski preobražaji kompaktognog zrna oksida željeza koji se odvijaju tokom redukcije obuhvataju adsorpciju (uključujući i hemisorpciju, v. *Adsorpcija*, TE1, str. 1) molekula reducenta na reakcionoj površini čvrste materije, prestrukturiranje kristalne rešetke i desorpciju plinovitih produkata redukcije. Dakako, pri tom redukcija zrna oksida željeza počinje na njegovoj površini formiranjem vanjskog sloja metalnog željeza. Dalje taj sloj raste sve dok se zrno potpuno ne redukuje. Tokom tog procesa između hematitne jezgre i vanjskog metalnog sloja zrna mogu postojati i slojevi magnetita i wüstite. (Eksperimentom je utvrđeno da su ti slojevi magnetita i wüstite veoma tanki.) Taj tzv. slojevit model odvijanja kristalochemijskih preobražaja rude u željezo univerzalno se upotrebljava za matematički tretman kinetičke teorije redukcije ruda željeza.

Difuzija u materijalu koji se redukuje obuhvata transport reducenta kroz pore tog materijala i kroz sloj čvrstih proizvoda redukcije koji se stvara na stijenkama pora, te transport plinovitih produkata redukcije u suprotnom smjeru.

Zbog toga je redukcija mase rude željeza, odnosno sintera, koja se sastoji od poroznih čestica oksida željeza, komplikovanija nego idealizovani proces redukcije kompaktognog zrna, jer pri tom djeluju još dvije grupe vanjskih faktora: struktura mase rude i režim uslova procesa, koji vladaju u plinu.

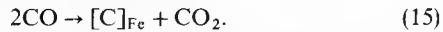
Faktori strukture mase rude koji utiču na mehanizam redukcije ruda željeza jesu unutrašnja poroznost čestica (mikroporoznost), slobodni prostor među česticama (makroporoznost), te mjera uniformnosti raspodjele tih poroznosti.

Uslovi režima u plinu, koji komplikuju mehanizam redukcije ruda željeza, jesu njegov sastav, temperatura i pritisak, jer su oni

varijabilni, kako u odnosu prema pojedinim zrnima rude tako i prema visini slojeva mase rude u peći.

U visokoj peći, gdje se redukcija odvija pod konstantnim razlikama pritisaka, veoma je važna propustljivost sloja. Ona je određena veličinom i oblikom čestica rude i koksa te slobodnim prostorom među njima. To traži veliku opreznost pri prenošenju rezultata laboratorijskih studija u praktične uslove, posebno pri korišćenju tzv. indeksom reduktivnosti rude u upravljanju procesom. (To svojstvo rude željeza zavisi od njenih hemijskih i fizikalnih osobina: njenog sadržaja vezanog željeza, stupnja oksidacije njenih oksida, sadržaja i svojstava njene jalovine koja mogu olakšati ili otežati redukciju. Indeksi, kojima se ona izražava, određuju se prema propisanim uvjetima.)

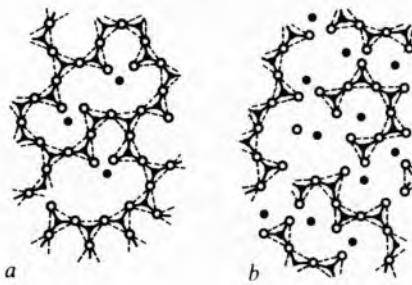
**Formiranje gvožđa i troske u visokoj peći.** Redukovano se željezo u visokoj peći djelomično nauglijčava već u čvrstom stanju. Taj je proces u prvom redu posljedica Bellove reakcije, a prikazuje se hemijskom jednačinom



Intenzivan je na temperaturi od 450...600°C. Pri tom sadržaj ugljika u željezu dostiže 0,6...1,0%. Dalje se gvožđe nauglijčava na višim temperaturama u kontaktu s usijanim čvrstim koksom. Čisto željezo je teško taljivo (t. t. 1539°C). Međutim, nauglijčavanjem se talište gvožđa snizuje, pa se na ~1250°C stvaraju kapi gvožđa. Pri prosječnom sadržaju ugljika u gvožđu koje se dobiva u visokoj peći (4,3%) talište gvožđa iznosi 1130°C. Zajedno s ugljikom u gvožđu se otapaju drugi elementi nastali redukcijom njihovih spojeva. Sadržaj tih elemenata u gotovom gvožđu zavisi od temperature i drugih uslova procesa.

Osim odvajanja jalovine iz rude, troska u visokoj peći služi i za vezanje pepela koji nastaje sagorijevanjem koksa. Zbog toga se njena taljivost mora regulirati (taljivima) tako da se njen tekući sloj počne stvarati zajedno s tekućim gvožđem u zoni iznad duvnica. Pri tom se najprije formira tzv. primarna troska, koja uz neredukovane okside silicija, kalcija, magnezija i aluminija sadrži i određene količine željezo-oksida i mangan-oksida. Daljom redukcijom na putu do gnijezda peći iz troske se ukloni skoro sav željezo-oksid i znatan dio mangan-oksida. Pepeo od sagorijevanja koksa topi se u troski na horizontu duvnica. Redukovani se sumpor otapa u troski postepeno reagującji s kalcij-oksidom i djelomično s magnezij-oksidom. Konačni sadržaj sumpora u troski uspostavlja se u gnijezdu kontaktom s gvožđem.

**Struktura i osobine troske visoke peći.** Uz njenu moć odsumporavanja gvožđa, od osobina troske zavisi i ravnopravnost proraženja zasipa kroz peć, pa su one vrlo važne za cijeli proces. Konačna troska sadrži prosječno 85...95% SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i CaO, 2...10% MgO; 0,2...0,6% FeO; 0,3...3% MnO i 1,5...2,5% S (uglavnom vezanog u CaS). Sastav troske pri preradi manje čistih ruda može se znatno razlikovati od navedenog. Tako npr. troska pri preradi vareških i ljubijskih ruda može, zbog njihova sadržaja barita, imati i do 5% BaO.



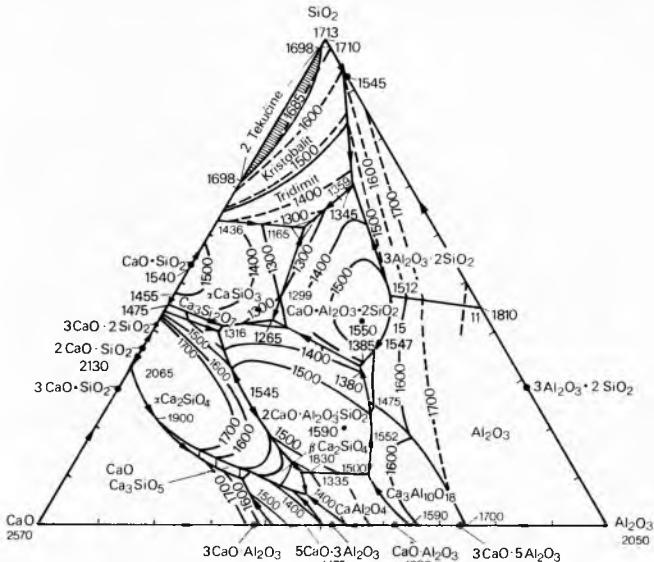
Sl. 7. Dvodimenzionalni prikaz otapanja oksida dvovalentnih metala u otopini silicij-dioksida: a) otopina s malom koncentracijom, b) s većom koncentracijom iona metala

Prikazivanje sastava troske kao mješavine oksida samo je stehiometrijsko pojednostavljivanje. Prema savremenim ispitivanjima troska je ionska otopina sa sređenom kristalastom strukturu u kojoj, naročito kad je troska kisela, prevladava

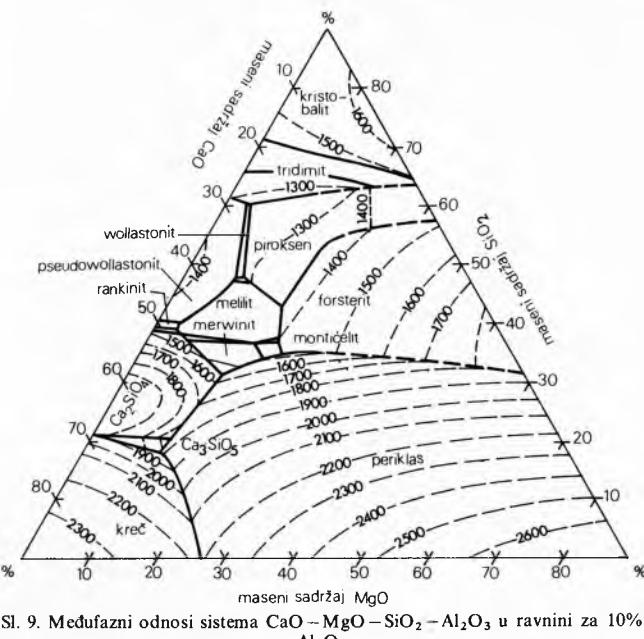
silikatni tetraedar sa stehiometrijskom formulom  $\text{SiO}_2$ . (Sastoje se od centralnog iona  $\text{Si}^{4+}$  i s njime koordinirana četiri iona  $\text{O}^{2-}$  u vrhovima tetraedra.) I ostali elementi nalaze se u troski u obliku iona ( $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ), koji su takođe koordinirani s ionima  $\text{O}^{2-}$ . Dospijevanjem tih iona baznih metala u trosku cijepaju se silikatni tetraedri (sl. 7). Kationi metala (ispunjeni kružići) ugrađuju se u time nastale praznine. Jednako djeluje i povećavanje temperature, pa se struktura tekuće troske može smatrati nesređenim oblikom strukture čvrste troske.

Za brzu karakterizaciju troske u praksi služe koeficijenti koji prikazuju odnose između glavnih komponenata troske, npr. već navedeni indeks baziciteta. Više se upotrebljava indeks baziciteta troske izražen omjerom  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ . Vrijednost je tog indeksa 1,0–1,3 za standardne troske visokih peći. Magnezij-oksid snizuje viskozitet i poboljšava desulfurizacionu moć troske, pa se njegov sadržaj u troski održava na vrijednostima do 10%. Kad se i magnezij-oksid računa u indeks baziciteta, vrijednosti indeksa dosaju i do 1,45.

Za procjenu i primjeravanje osobina troske visoke peći zahtjevima procesa nužni su fazni dijagrami sistema njenih osnovnih komponenata. Za tu svrhu može donekle poslužiti fazni dijagram sistema  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$  (sl. 8). Iz njega se



Sl. 8. Fazni dijagram sistema  $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$



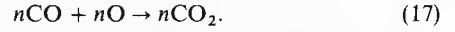
Sl. 9. Međufazni odnosi sistema  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$  u ravnini za 10%  $\text{Al}_2\text{O}_3$

mogu izvući neki zaključci važni za vođenje procesa. Međutim, podaci iz toga dijagraama nisu dovoljni za kompletanu procjenu termofizičkih osobina troske već zbog toga što neke troske postaju dovoljno tekuće tek znatno iznad tališta. (Npr. otopina sa sastavom lakotaljivog eutektika  $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$  s t. t.  $1165^\circ\text{C}$  postaje dovoljno tekući tek na  $\sim 1600^\circ\text{C}$ .) Zbog toga se podaci potrebni za vođenje procesa dopunjaju određivanjem zavisnosti viskoziteta troske od temperature.

Pokazalo se da je za proces u visokoj peći dovoljno tekuća troska koja na  $1400\cdots 1500^\circ\text{C}$  ima viskozitet od 5P, pa se tom uslovu primjerava njen sastav. Za tu svrhu služe dijagrami zavisnosti viskoziteta troski različitih sastava od temperature. Pri tom je obično nužno promatrati trosku kao sistem od njene četiri osnovne komponente (uz  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  još i  $\text{MgO}$ ). Da bi se izbjegla upotreba vrlo komplikovanog faznog dijagraama tog četverokomponentnog sistema, njegove se ravnoteže obično prikazuju s pomoću tzv. kvaziterarnih dijagrama. Vrlo prikladan dijagram takve vrsti jest fazni dijagram sistema  $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$  s konstantnim sadržajem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , npr. 10% (sl. 9), što je tipično za troske visoke peći.

**Analiza procesa redukcije.** Budući da ima više procesa redukcije ruda željeza, njihova analiza nužno počinje njihovom klasifikacijom. Pri tom je osnovna podjela tih procesa na redukciju ugljikom (iz koksa) u visokoj peći i redukciju plinovima.

Reduciju u visokoj peći karakterizuje oksidacija reducenata (ugljika) u ugljik-monoksid i zatim parcijalna oksidacija ugljik-monoksida u ugljik-dioksid, što se samo približno može prikazati hemijskim jednačinama



jer se, u stvari, redukcija odvija nizom složenih procesa. Sa stanovišta tih procesa visoka se peć može promatrati kao reaktor vertikalnog tipa, u kojem se najprije (u donjem dijelu trupa) odvija reakcija (16) egzotermalnim sagorijevanjem ugljika i endotermalnom redukcijom tekućeg željezo-oksida, a zatim (u gornjem dijelu trupa) reakcija (17) veoma egzotermalnim sagorijevanjem ugljik-monoksida i endotermalnom redukcijom čvrstih oksida željeza. Zbog redukcije u čvrstom i tekućem stanju i različitih nivoa temperature u reaktoru taj je proces vrlo komplikovan.

Reducija plinovima razlikuje se od redukcije u visokoj peći u tome što se tada redukcion plin proizvodi odvojeno (tzv. karburacijom) u zasebnom karburatoru, a u reaktoru su samo reakcije redukcije rude. Sa stanovišta tih procesa visoka se peć može promatrati kao reaktor s integriranim karburatorom.

Za analizu obju tih grupa procesa redukcije ruda željeza zajednički je faktor postojanje triju različitih oksida željeza s različitim termohemijskim i termodinamičkim osobinama. Posebno su među tim osobinama važni kisikovi potencijali oksida željeza. Jednako su za redukciju ruda željeza važni i kisikovi potencijali reducenata.

Pojam kisikovih potencijala oksida izvodi se iz izraza za entalpiju reakcija disocijacije tih spojeva, npr. kisikovih potencijala oksida ugljika iz izraza za entalpiju reakcija (16) i (17) u smjeru zdesna na levo, kisikovih potencijala oksida željeza iz izraza za entalpiju reakcija koje se mogu obuhvatiti hemijskom jednačinom



Naime, općenito je izraz za normalnu entalpiju neke hemijske reakcije s konstantom ravnoteže  $K_p$

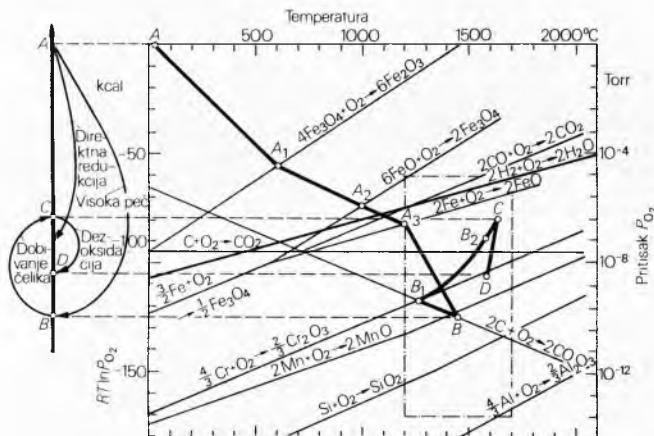
$$\Delta H^\circ = -R T \ln K_p, \quad (19)$$

(gdje je  $R$  opća plinska konstanta,  $T$  termodinamička temperatura), a pod staničnim uslovima  $K_p$  zavisi samo od parcijalnog pritiska kisika za sve važne reakcije procesa redukcije ruda željeza, pa se izraz  $-R T \ln K_p$  naziva kisikovim potencijalom. (Vrijednost  $K_p$  za reakciju disocijacije oksida rude nije ograničena uslovima;  $K_p$  za reakciju disocijacije reducenata zavisina je samo od parcijalnog pritiska kisika pri stalnim omjerima  $\text{CO}/\text{CO}_2$  i  $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$  u redupcionom plinu.)

**Zavisnost procesa redukcije ruda željeza od kisikovih potencijala.** Vrijednosti kisikovih potencijala različitih oksida, izražene nekim jedinicama energije po molu, nalaze se u dijagra-

mima prema F. D. Richardsonu. Za analizu procesa redukcije ruda željeza i proizvodnje čelika potrebni podaci iz Richardsonovih dijagrama obično se prikazuju zajedno sa shemom procesa dobivanja gvožđa i čelika prema S. Eketorpu (sl. 10). Iz tih podataka može se zaključiti da se pod pritiskom okoline razlaganje oksida željeza može izvesti na visokim temperaturama ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  može se dobiti iz  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na temperaturi od  $\sim 1450^\circ\text{C}$ ,  $\text{FeO}$  iz  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  na  $\sim 2000^\circ\text{C}$ ,  $\text{Fe}$  iz  $\text{FeO}$  na  $\sim 4000^\circ\text{C}$ ). Očigledno taj put nije realan pri današnjem stanju tehnologije. Također se može zaključiti da se željezo može dobiti iz njegovih oksida uz male kisikove potencijale na visokim temperaturama i u inertnoj atmosferi. Tako se dekompozicija  $\text{FeO}$  može izvesti pod pritiskom od  $\sim 5 \cdot 10^{-7}$  MPa, na temperaturi  $\sim 1600^\circ\text{C}$ . Međutim, ni ti uslovi nisu danas još ekonomični. Jedina danas ekonomično iskoristiva mogućnost redukcije ruda željeza jest ostvarivanje dovoljno niskog kisikova potencijala u procesu proizvodnje pomoću nekog dovoljno jeftinog reducenta s kisikovim potencijalom nižim od kisikovih potencijala oksida željeza, kako se to i radi u praksi. Osim ugljika (koksa), za tu svrhu dolazi u obzir još i vodik, i to naročito na visokim temperaturama. Upotreba aluminija za redukciju oksida ograničena je također iz ekonomskih razloga.

Put odvijanja procesa u visokoj peći prikazan je u dijagramu na sl. 10 linijom  $A_1A_2A_3B$ . Pri tom je linija  $AA_1$  put redukcije hematita u magnetit, počevši od stanja okoline u tački  $A$  uz promjene temperature i kisikova potencijala do tačke  $A_1$  na temperaturi  $\sim 600^\circ\text{C}$ , linija  $A_1A_2$  put redukcije magnetita u wüstit između  $\sim 600 \dots 1000^\circ\text{C}$ , linija  $A_2A_3$  put redukcije wüstita u željezo između  $\sim 1000 \dots 1200^\circ\text{C}$ , a linija  $A_3B$  put naugličavanja željeza između  $\sim 1200 \dots 1450^\circ\text{C}$  do uspostavljanja ravnoteže između gvožđa i koksa (zasićenja gvožđa ugljikom) u donjem dijelu peći. Tačka ravnotežnog stanja leži na liniji reakcije (16).



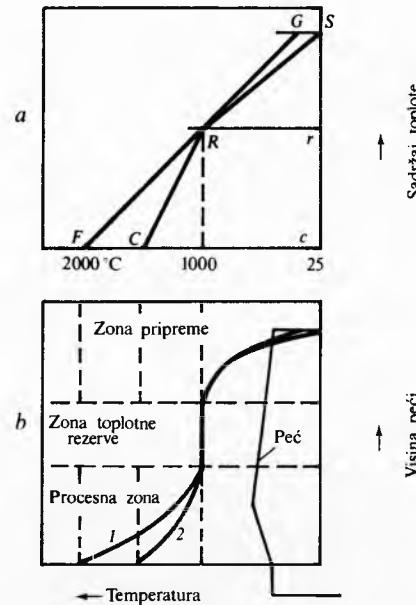
Sl. 10. Tok procesa visoke peći i proizvodnje čelika u Richardsonovu dijagramu

Linija  $BB_1$ , put promjene stanja gvožđa (hladjenje na temperaturu  $\sim 1250^\circ\text{C}$ , uz porast kisikova potencijala) pri transportu u konvertor za proizvodnju čelika, također leži na liniji reakcije (16) jer pri tom željezo i dalje ostaje zasićeno ugljikom. U konvertoru se oksidacijom na putu  $B_1C$  ponovno povisuje temperatura gvožđa sve dok koncentracija ugljika u njemu ne padne na vrijednost predviđenu za čelik (tačka  $C$ , temperatura  $\sim 1650^\circ\text{C}$ ) i zatim dezoksidira uz pad temperature čelika na  $\sim 1600^\circ\text{C}$  (tačka  $D$ ).

Na shemi lijevo od dijagrama na sl. 10 krivulja  $AB$  predstavlja pad kisikova potencijala u visokoj peći, krivulja  $BC$  njegov porast pri transportu u konvertor i oksidaciju gvožđa u čelik, krivulja  $CD$  njegov pad pri dezoksidaciji čelika. Krivulja od tačke  $A$  do blizu tačke  $D$  predstavlja procese direktne proizvodnje čelika (bez taljenja), pri čemu se ne otapaju drugi metali (npr. mangan, krom) u željezu, i njegove oksidacije do mjere koja zahtijeva kasniju dezoksidaciju čelika.

Analiza na bazi toplotnog i materijalnog bilansa pruža velike mogućnosti za proučavanje procesa redukcije ruda željeza, posebno procesa u visokoj peći.

Već je Mathesius (1924) uočio da se iz toplotnog bilansa zone u kojoj se odvijaju reakcije na niskim i srednjim tempe-



Sl. 11. Idealizirana razmjena topline u visokoj peći. a) Reichardtov dijagram,  $F R G$  temperatura plina,  $S R C$  temperatura zasipa; b) temperaturni profil plina  $I$  i zasipa  $2$  prema Ristu i Meyssonu

raturama (trup peći) i toplotnog bilansa zone u kojoj se odvijaju reakcije na visokim temperaturama (donji dio peći) dobivaju bolje informacije o procesu u visokoj peći nego iz njegova ukupnog toplotnog bilansa. Prihvativši tu ideju, Reichardt je izradio (1927) dijagramske predodžbe (sl. 11a) toplotnog bilansa visoke peći iz kojeg se vidi da na određenoj temperaturi, tzv. termičkoj kritičnoj tački  $T_R$ , nastupaju znatne promjene uslova prenosa topline s plina na zasip.

Industrijski eksperimenti Kitaeva (1944—1962) u SSSR-u i teorijska razmatranja Micharda potvrđili su postojanje termičke kritične tačke na temperaturi  $900 \dots 1000^\circ\text{C}$ , u tzv. zoni topotlne i hemijske rezerve (sl. 11b). Slijedeći zaključak tih istraživanja bilo je definisanje zona iznad i ispod zone topotlne rezerve kao zona termičke, odnosno hemijske razmjene (zona pripreme, odnosno procesna zona).

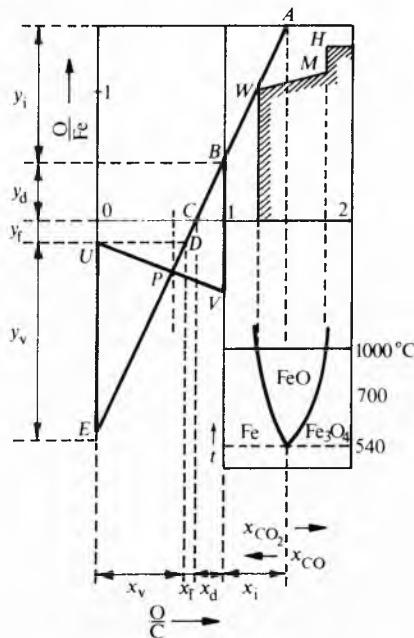
U zoni pripreme ( $T < T_R$ ) zasip se predgrjava i redukuje do nastajanja wüstita, iako koks skoro ne reaguje. U procesnoj zoni ( $T > T_R$ ) odvijaju se reakcije povezane s razmjrenom velikih količina topline s okolinom: veoma egzotermne reakcije sagorijevanja koksa i veoma endotermne reakcije gubitka otapanjem i redukcije oksida željeza u tekućoj fazi.

Odnosi između te dvije zone najbolje se prikazuju dijagramima prema A. Ristu. To su grafičke predodžbe materijalnog bilansa reducenta pri redukciji oksida željeza u koordinatnom sistemu sa stepenom oksidacije reducenta (omjerom kisika i reducenta u produktima oksidacije reducenta računatim u hemijskim jedinicama) kao apscisom i stepenom oksidacije željeza (omjerom kisika i željeza u oksidima željeza koji se redukuju, također u hemijskim jedinicama) kao ordinatom. Naročito su pogodne za ilustraciju uslova prelaza kisika u plin u procesu visoke peći. U tim dijagramima proces redukcije oksida željeza prikazan je tzv. Ristovom operativnom linijom. Obično je taj prikaz pojednostavljen ograničenjem na redukciju oksida željeza ugljikom, a polazi se od idealiziranog slučaja (sl. 12), tj. pri idealiziranoj termičkoj razmjeni i idealiziranoj razmjeni kisika.

U tom su dijagramu područja postojanja hematita, magnetita, wüstita i željeza određena tačkama  $H$ ,  $M$ ,  $W$ , kojima ordinate (1,5; 1,33; 1,05) izravno slijede iz formula tih spojeva, a apscise iz također ucrtanog faznog dijagrama sistema oksida željeza i smjese ugljik-monoksida i ugljik-dioksida, gdje su  $x_{\text{CO}_2}$  molni udjeli tih spojeva u plinu.

U tom je dijagramu bilans reducenta opisan na dva načina: kao bilans ugljik-monoksida u plinu i kao bilans ugljik-mo-

noksida s obzirom na željezo dobiveno razmjenom kisika između reducenta i oksida željeza. Pojedinim stawkama bilansa ugljik-monoksida u plinu odgovaraju određene dužine na apscisi dijagrama, a stawkama bilansa ugljik-monoksida s obzirom na dobiveno željezo određene dužine na ordinati.



Sl. 12. Pojednostavljeni Ristov dijagram za proces u visokoj peći u idealiziranim uslovima

Te dužine na apscisi jesu:  $x_v$  količina ugljik-monoksida nastalog od kisika iz uduvanog zraka,  $x_f$  količina ugljik-monoksida nastalog od kisika iz drugih oksidnih sastojaka rude (npr. spojeva silicija, mangana, fosfora),  $x_d$  količina ugljik-monoksida nastalog direktnom redukcijom oksida željeza sumarnom reakcijom (14), tj. gubitkom otopanja,  $x_i$  količina ugljik-monoksida utrošenog indirektnom redukcijom oksida željeza na nižim temperaturama na kojima se više ne odvija Boudouardova reakcija, pa nastali ugljik-dioksid više ne reagira.

Dužine  $y_v$  i  $y_l$ , koje odgovaraju dužinama  $x_v$  i  $x_l$ , nalaze se na negativnoj ordinati, jer predstavljaju količine ugljik-monoksida s obzirom na dobiveno željezo nastale od kisika iz tzv. drugih izvora. Pod tim se izvorima razumijevaju, npr., zrak uduvan za sagorijevanje koksa radi proizvodnje toplote potrebne za proces, i kisik iz spomenutih drugih oksidnih spojeva. Dužine  $y_d$  i  $y_i$  odgovaraju dužinama  $x_d$  i  $x_i$ .

Dužine na apscisi i ordinati u stvari su nizovi proporcionalnih vrijednosti, a one su u dijagramu projekcije segmenata pravca, Ristove operativne linije, s nagibom koji prolazi tačkama  $E, D, C, B, A$ . Navedene tačke predstavljaju granična stanja sistema između opisanih četiri najvažnijih faza procesa u peći. Na segmentu  $ED$  leži tačka idealizirane termičke razmjene  $P$ , a na segmentu  $BA$  tačka idealizirane rezmjene kisika  $W$ . Položaj tačke  $P$  određen je količinom uduvanog zraka i sastavom gvožđa. Nagibom  $\mu$  određena je količina reducenta potrebna za proizvodnju jedinice količine željeza (specifična potrošnja koksa).

Pomoću Ristova dijagrama mogu se analizirati različiti postupci redukcije ruda željeza. Npr., pri povećavanju temperature zraka koji se uduvava u peć Ristova operativna linija rotira oko  $W$  tako da se smanjuje nagib  $\mu$ , što znači da se smanjuje i specifična potrošnja koksa. Međutim, ako se koks djelomično zamijeni prirodnim plinom, a zrak ne grije, Ristova operativna linija rotira oko tačke  $W$  tako da se povećava nagib  $\mu$ , što znači da se povećava ukupna potrošnja goriva (zbog toga što se tada toplina troši i za zagrijavanje plina i na razlaganje njegovih ugljikovodika). Zbog toga se u praksi uporedo grije zrak koji se uduvava.

Primjenom postupaka kojima se mijenjaju osnovni hemijski procesi u trupu peći, uslovi indirektne redukcije, također se mijenja nagib  $\mu$ , ali rotacijom operativne linije oko tačke  $P$ . Npr., pri radu s obogaćenim i predredukovanim zasipom Ristova operativna linija okrenuta je oko  $P$  tako da je smanjen  $\mu$  (smanjena je potrošnja koksa).

A. Čavić

## **PROCESI PRIPREME ZASIPA**

Ekonomičnost proizvodnje gvožđa, posebno dvaju najvažnijim njenih faktora, proizvodnost gvožđa i potrošnja koksa (koksi je skup) mnogo zavise od pripremljenosti zasipa. Tako se npr. proizvodnost može povećati, a potrošnja koksa smanjiti za 1,5...2% povećanjem sadržaja željeza u zasipu za 1%, za 3...5% smanjenjem sadržaja jalovine u zasipu koje odgovara smanjenju proizvodnje troske od 100kg po t gvožđa. Poboljšanjem reduktivnosti rude za 1% može se smanjiti potrošnja koksa za 1...1,5%.

Zbog toga su u posljednjih 25-30 godina razvijeni različiti procesi pripreme zasipa visoke peći koji su omogućili povećanje njene proizvodnosti od 25-30 na 55-60 t gvožđa na dan po  $m^2$  presjeka gnezda peći. Ti se procesi mogu svrstati u četiri grupe: procesi za postizavanje prikladne zrnovitosti zasipa, za povećavanje sadržaja željeza i smanjivanje sadržaja jalovine u zasipu (procesi koncentracije, obogaćivanja, oplemenjivanja rude), za ujednačavanje sastava zasipa i za poboljšavanje reduktivnosti i drugih metalurških osobina rude i zasipa.

Procesi za postizavanje prikladne zrnovitosti zasipa imaju za svrhu ograničavanje granulometrijskog sastava rude na određene veličine čestica i sprečavanje odstupanja od optimalne zrnovitosti. Oni obuhvataju operacije sitnjenja (v. *Drobljenje*, TE 3, str. 395), klasiranja (prosijavanje) (v. *Klasiranje*) i aglomeriranja; aglomeriranje sastoje se od sinterovanja (v. *Sinteriranje*), briketiranja (v. *Briketiranje* TE 2, str. 153) i peletizacije. Time se osigurava dobra propusnost zasipa za redukcionu plin u peći, nužna za visoku proizvodnost.

Što je veličina zrnja zasipa jednolične zrnovitosti manja, to je otpor strujanja plina u peći veći i obrnuto. Zasip nejednoličnog granulometrijskog sastava pruža to veći otpor strujanju plina što je udio sitnozrnih granulometrijskih frakcija veći. Općenito je potrebno da se oksidi željeza u zasipu redukuju za vrijeme od 4-5 sati, jer se zasip toliko zadržava na temperaturama nižim od  $1000^{\circ}\text{C}$ . Međutim, brzina redukcije (koja zavisi i od vrste rude) naglo se smanjuje s povećanjem veličine zrnja zasipa.

Budući da su dobrijanje, prosijavanje i, još više, aglomeriranje skupa operacije, dovođenju zasipa u što uže granice oko optimalne zrnovitosti suprotstavljaju se ekonomski razlozi. Zbog toga se optimum fizikalne pripremljenosti zasipa mora odrediti na osnovu proizvodnosti peći, reduktivnih karakteristika zasipa i troškova pripreme zasipa. Obično se, već prema vrsti i osobinama rude, zasip granulira u granice veličina zrnja od 10...60mm, s tim da se odvajanjem neposredno prije zaspivanja spriječi da frakcije manje od 5...8mm dospiju u peć, jer one vrlo nepovoljno utječu na proces.

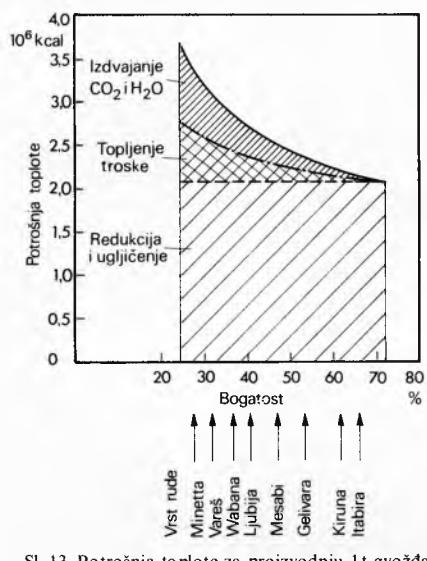
Cilj je procesa koncentracije da se redukcija oksida željeza i taljenje gvožđa u visokoj peći izvedu u prisutnosti samo najnužnijih količina tekuće troske (200–250kg po t gvožđa), tj. potrebnih za odvajanje neizbjegne jalovine i sumpora iz rude i koksa, i bez isparljivih komponenata (uglavnom bez ugljik-dioksida od raspada karbonata, posebno pri proizvodnji gvožđa iz siderita, vode od dehidratacije hidrata, posebno pri proizvodnji gvožđa iz limonita). Prema tome, postoje dvije vrste takvih procesa: procesi odvajanja tzv. mineralne jalovine i procesi odvajanja tzv. isparljive jalovine.

Procesi odvajanja mineralne jalovine iz ruda željeza obuhvataju različite operacije sortiranja, npr. gravitacijsku koncentraciju, magnetsku koncentraciju, flotaciju (v. *Flotacija*, TE 5, str. 460), pranje.

Proseći odvajanja isparljive jalovine u glavnom obuhvataju toplotne operacije kojima se na temperaturama iznad  $500^{\circ}\text{C}$

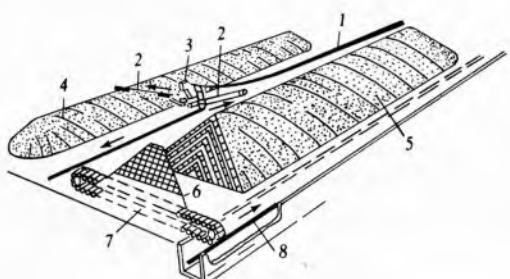
razaraju karbonati i dehidratiziraju hidrati ili nastaje jedna od tih pojava. To su pirometalurške operacije obogaćivanja ruda. U suštini se pri tom radi o kalciniranju (prženju). Za te svrhe obično je potrebno da se ruda prethodno usitni, često (npr. kad je predviđeno peletiziranje) i do zrnovitosti ispod 0,1mm, a nakon prženja aglomerira.

Pri proizvodnji gvožđa u prisutnosti minimalno potrebne količine troske potrošnja je koksa 480...500kg po t gvožđa. Računato na istoj bazi, potrošnja se koksa povećava za 25...35kg za svako povećanje količine troske za 100kg, a za 50...55kg za svakih 100kg isparljivih komponenata zasipa koje se dovode u peć (sl. 13). Zbog toga i zbog znatno veće ekonomičnosti odvajanja jalovine, posebno isparljive, procesima koncentracije izvan peći, nužna je primjena takvih procesa svugdje gdje se gvožđe proizvodi iz željezom siromašnih sirovina ili sirovina koje sadrže mnogo isparljivih komponenata.



Sl. 13. Potrošnja topote za proizvodnju 1t gvožđa iz različitih ruda

**Procesi ujednačavanja sastava zasipa.** Nejednoličnost hemijskog mineralnog i granulacijskog sastava zasipa uzrokuje kako kratkotrajna tako i dugotrajna odstupanja režima procesa visoke peći od njegovog normalnog (srednjeg) stanja. Varijacije potrošnje topote za redukciju i taljenje najštetnije su posljedice varijacija sastava zasipa. U tom su pogledu posebno vrlo nepovoljna kratkotrajna odstupanja, jer ih je praktički nemoguće korigovati. Ona zbog toga neizbjegljivo uzrokuju viškove ili manjkove topote u peći, što uzrokuje varijacije temperaturnog režima peći i time sadržaja silicija, manganova i sumpora u gvožđu. Pored toga, varijacije potrošnje topote u peći nužno zahtijevaju stalno vođenje procesa s viškom topote, što ili povećava potrošnju koksa ili se slabije iskorištavaju kapaciteti kaupera ili i jedno i drugo.



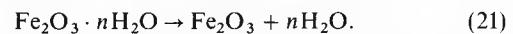
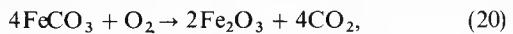
Sl. 14. Shema tipičnog nasipanja ruda na skladištu željezare. 1 transporter za dopremu, 2 transporter za nasipavanje, 3 uređaj za doziranje i razvodnjenje, 4 gomila koja se nasipava, 5 gomila od koje se oduzima, 6 drljača za oduzimanje, 7 transporter s lopatama, 8 transporter s trakom (u kanalu) za otpremu u postrojenje za aglomeriranje

Sastav rude željeza ujednačava se već na skladištu razmjerno jednostavnim postupcima. Za tu se svrhu ruda iz jedne prisjepe pošiljke obično uzdužno nasipava u posebne gomile (sl. 14) dužine 50...70m, trouglastog presjeka s osnovicom od 30...40m i visinom od ~15m, koje sadrže 25...35kt rude, a oduzima se za preradu u poprečnom smjeru. Obično je na skladištu više takvih gomila. Pri oduzimanju se dijelovi na krajevima gomila, u kojima sastav najviše odstupa od prosječnog, često odvajaju i odvoze na gomilu koja se upravo nasipa. Tim se postupkom odstupanja sadržaja željeza rude obično ograničavaju na  $\pm 0,2 \dots \pm 0,3\%$  od srednje vrijednosti.

Procesi poboljšavanja reduktivnosti rude također se odvijaju pri prženju i aglomeriranju ruda željeza. Tako se npr. izdvajanjem ugljik-dioksida i vode pri prženju narušava kristalna struktura rude, čime se povećava porozitet. Time je olakšan dostup redukcionog plina unutrašnjim slojevima zrnja. U povoljnim metalurškim uslovima, iznad temperature početka omekšavanja i taljenja rude pri aglomeriranju sinterovanjem i peletiziranjem počinje stvaranje primarne troske, pogotovo kad se taljivo (krečnjak) dodaje već u mješavini za aglomeriranje. Time poboljšana reduktivnost i propustljivost za redukcionu plin povoljno utječu na odvijanje procesa u visokoj peći.

Ruda željeza prži se zagrijavanjem na 800...1000°C. Pri tom se, među ostalim, disociraju karbonati i hidrati, izdvajaju se hlapljive komponente, mijenjaju se stepen oksidacije i, pri stanovitim uslovima, magnetske osobine željezo-oksida. Već prema atmosferi u kojoj se izvodi, razlikuje se oksidaciono i redukciono (magnetizirajuće) prženje.

*Oksidacionim prženjem* (prženjem u oksidacionoj atmosferi) preraduju se sideritne i limonitne rude. Glavne reakcije koje se pri tom odvijaju jesu



Za odvijanje reakcije (20) troši se 61 kcal po kg izdvojenog ugljik-dioksida. Pri odvijanju reakcije (21) oslobođa se 590 kcal po kg izdvojene vode. Dakako, istovremeno se odvija i niz drugih procesa, npr. disocijacija kalcij-karbonata i magnezij-karbonata (pri čemu se također izdvajaju znatne količine ugljik-dioksida), disocijacija drugih hidrata (posebno  $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , pri čemu se također izdvajaju znatne količine vode), oksidacija sulfida željeza, cinka i olova, disocijacija željezo-sulfata (pri čemu se izdvajaju znatne količine oksida sumpora). Za disocijaciju nekih drugih spojeva, npr. barij-sulfata, kalcij-sulfata, temperatura prženja nije dovoljno visoka, pa u njima vezani sumpor dospijeva u visoku peć.

*Redukcionim prženjem* (prženjem u redukcionoj atmosferi) takoder se preraduju sideritne i limonitne, ali i hematitne rude. Glavna je svrha pri tom konverzija spojeva željeza u magnetit, da bi se iz prženca mogao dobiti vrlo bogati koncentrat magnetskom koncentracijom.

Ta se konverzija može ostvariti samo u redukcionoj atmosferi u kojoj omjer  $(\text{CO} + \text{H}_2)/\text{CO}_2$  iznosi 1...2, na temperaturi 700...900°C. Pod tim se uslovima oksidi željeza iz hematita i limonita redukuju reakcijom (1), a oksidi koji nastaju disocijacijom siderita reakcijom (2) u suprotnom smjeru.

Pored toga, da se magnetit ne bi oksidirao, prženac se mora ohladiti u atmosferi ugljik-dioksida. Sličan se rezultat postiže brzim hlađenjem prženca u vodi. Magnetit se pri tom doduše oksidira reakcijom (7) u suprotnom smjeru, ali je produkt, tzv. maghemit, za razliku od hematita također magnetičan.

**Aglomeriranje sinterovanjem** ruda željeza bez prethodnog peletiziranja izvodi se na temperaturi 1300...1400°C, pa obuhvata i procese obogaćivanja ruda s velikim sadržajem isparljivih komponenti koji se inače izvode prženjem. Zbog toga je aglomeriranje uvijek, pogotovo ako se u mješavini za aglomeriranje dodaju i taljiva, ujedno i proces metalurške pripreme zasipa.

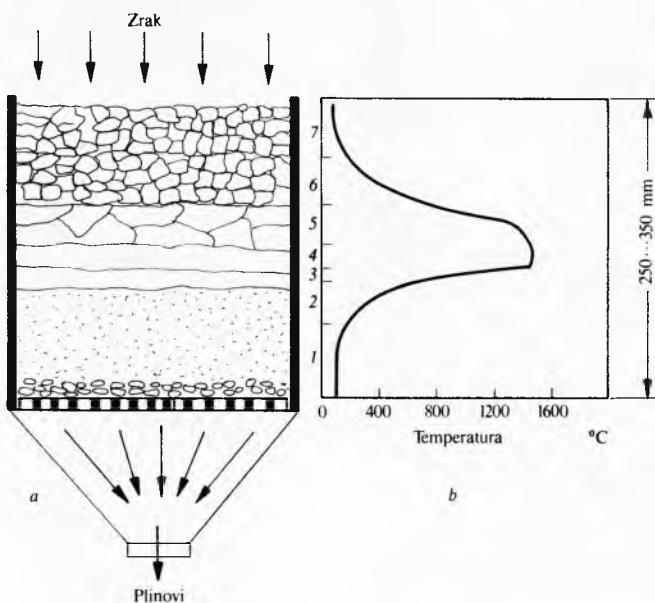
Obično se mješavina za aglomeriranje priprema od sitnozrnih frakcija ili od usitnjene rude, taljiva (krečnjaka, dolomit), drugih sitnozrnih sirovina s visokim sadržajem željeza koje se dobivaju kao sporedni proizvodi u proizvodnji sintera,

gvožđa i čelika (povratni sinter, prašina, kovarina) i sitnozrnih frakcija čvrstih goriva. Ta se mješavina sinteruje obično u postrojenjima s lančanim roštiljem. Pri tom se na roštilj, radi njegove zaštite, najprije nasipava sloj gotovog, ohlađenog sintera (posteljica). Na to se nasipava sloj mješavine debeo obično 250...350mm. Na početku puta na roštilju se potpaljuje površina sloja plinom. Toplota potrebna za zagrijavanje mješavine dobiva se sagorijevanjem goriva u mješavini a potreben zrak struji kroz sloj pod uticajem usisavanja dimnih plinova ispod rešetke. (Pri tom usisni uređaji treba da svladaju otpor sloja ekvivalentan padu pritiska od 0,07...0,1 MPa.) Sadržaj goriva u mješavini mora biti primjeren vrsti materijala koji se sinteruje, tako da u zoni sagorijevanja vlada potrebna temperatura (sl. 15). Položaj te zone postepeno se spušta i blizu kraja puta mješavine na roštilju dosije dno sloja.

U zoni sagorijevanja stvara se tanki sloj tekuće faze na površini zrna rude. Nakon spuštanja zone taj se sloj, hlađen zrakom, skrunjava zajedno s tekućim slojem susjednih zrna, pa tako aglomerira. Osim toga glavnog procesa, prema kojemu se operacija i naziva aglomeriranje sinterovanjem, u sloju se na njegovu putu na roštilju u različitim zonama odvija i niz drugih procesa. Te se procesne zone također spuštaju sve više što se primiče kraj puta sloja na roštilju, kao i zona sagorijevanja.

Za osiguranje potrebne propusnosti za plinove, mješavina za aglomeriranje mora imati prikladnu raspodjelu zrnovitosti (s gornjom granicom od 8mm). Zrnovitost taljiva i goriva mora biti manja od 3mm. Propusnost i potrebna nasipna težina mješavine podešavaju se još i dodatkom od 7...12% vode.

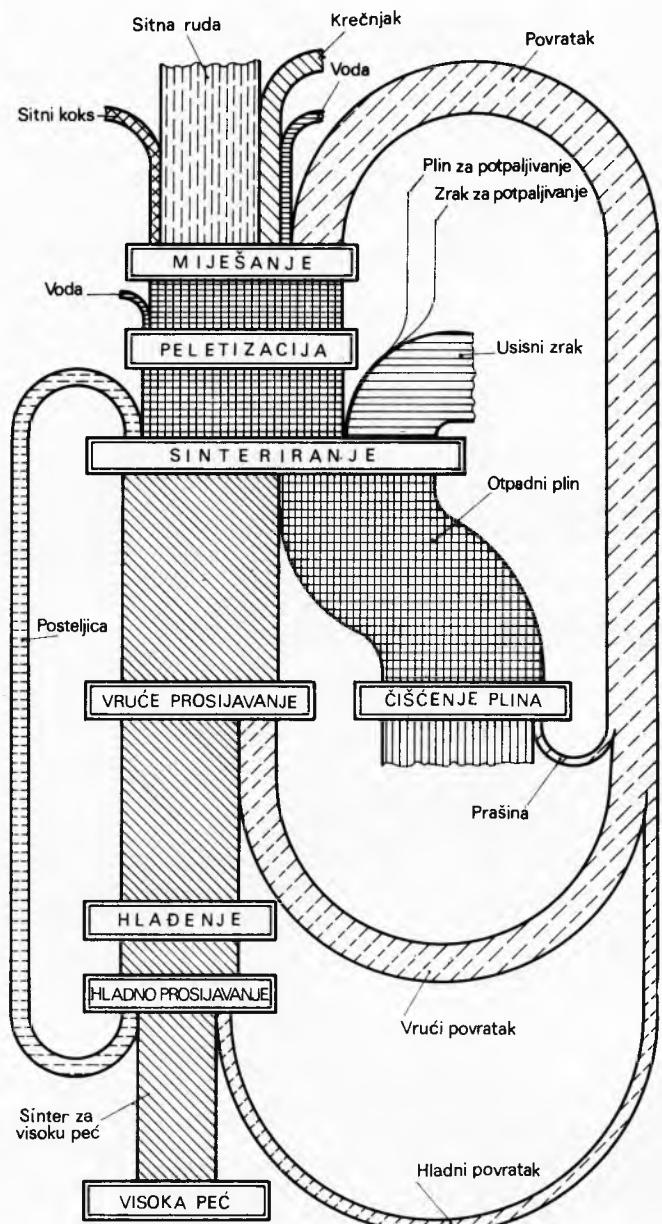
Sinterski se kolač lomi, hlađi, stabilizuje i prosijava. Sitni se sinter vraća u mješavinu.



Sl. 15. Shema procesa sinterovanja rude željeza. a) položaj procesnih zona u jednom od karakterističnih presjeka sloja, b) raspodjela temperature u tom presjeku; 1 sušenje, 2 predgrijavanje, 3 prženje, 4 sagorijevanje i sinterovanje, 5 oksidacija, 6 hlađenje, 7 gotovi sinter

**Peletizacija** je u posljednjih dvadesetak godina postala jedan od najvažnijih postupaka aglomeracije ruda željeza. Glavni je razlog u tome što se u sve većoj mjeri moraju pregraditi koncentrati rude koji se ne mogu aglomerirati jednostavnim sinterovanjem zbog visokog sadržaja vrlo sitnih, finih zrna. Peletizacijom se dobiva sirovina vrlo ujednačenih veličina čestica s prikladnom čvrstoćom (120...150kg po peletu), s visokom nasipnom težinom (visokim sadržajem željeza po jedinici zapremine), koja vrlo dobro podnosi transport.

Pri tom se najprije izrađuju tzv. zeleni (sirovi) peleti. Mješavina za tu svrhu priređuje se od rude, koja uz sitnozrne



Sl. 16. Shema materijalnog bilansa peletiziranja ruda željeza

sadrži i stanovite frakcije s krupnjim zrnima, potrebne za početak peletizacije. Već prema vrsti rude, tome se dodaje potrebno gorivo, 6...9% vode, a ponekad i 0,3...1,5% bentonitne gline. Od te se mješavine zeleni peleti (kuglaste granule veličine 8...15mm, koje još nemaju potrebnu čvrstoću) dobivaju rotiranjem na tzv. peletizacijskim tanjurima ili bubnjevima. Pri tom se krupnija zrna kotrlaju po sitnim, te srašćuju pod uticajem napona površine vode. Veličina peleta zavisi od vremena rotiranja.

Zeleni se peleti dalje prerađuju procesom, sasvim sličnim aglomeracijom, jednostavnim sinterovanjem u postrojenjima s putujućim roštiljima (sl. 15) ili u jamnim, odnosno rotacionim pećima. Za očvršćavanje peleta potrebne su temperature od 1250...1350°C.

### PROCESI U VISOKOJ PEĆI

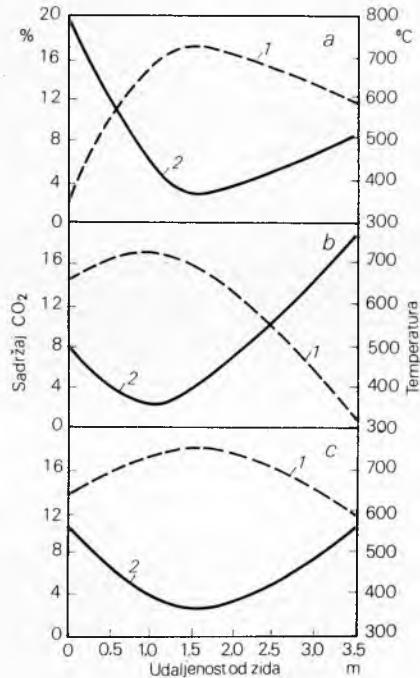
Zbog nasuprotnog kretanja zasipa i redupcionog plina u visokoj peći proces se u njoj odvija u skladu sa zakonima prenosa mase i toplote pri protustrujanju materijala koji međusobno izmjenjuju masu i toplotu. To omogućava razmjerno visoku proizvodnost peći na svim temperaturnim i reakcionim nivoima uz istovremeno dobro iskorištenje goriva i redukcione

moći plina, i u termičkom i u hemijskom pogledu. Dakako, za optimalan učinak pri tom je nužna potpuna ravnomjernost protoka plina kroz zasip, njegove temperature i sadržaja reducenata (ugljik-monoksida i vodika), te temperature i stepena redukcije zasipa u svakom presjeku peći. Međutim, takva su stacionarna stanja idealizirana, a moguće je samo im se približiti.

Iskorišćenje kapaciteta i proizvodnost visoke peći prikazuju se stepenom iskorišćenja hemijskog i termičkog potencijala plina. Indeksi su toga iskorišćenja temperatura i stepen iskorišćenja ugljik-monoksida  $\eta_{CO} = CO_2/(CO_2 + CO)$  i vodika  $\eta_{H_2} = H_2O/(H_2O + H_2)$  iz plina na pojedinim nivoima stuba zasipa. Pored pripremljenosti zasipa odlučujući uticaj na te faktore ima stepen ravnomjernosti rasporeda protoka plina po presjeku peći. Zbog toga se taj stepen ravnomjernosti kontrolira mjerjenjem temperature i sastava plina na bazi njegova sadržaja ugljik-dioksida (kao produkta oksidacije ugljik-monoksida i time stupnja redukcije oksida u zasipu).

Za tu svrhu u zid je gornjeg dijela jame dobro opremljene visoke peći ugrađeno 6...12 termoelemenata jednako udaljenih jednih od drugih i smještene su 2...4 također međusobno jednako distancirane pomicne horizontalne sonde za mjerjenje i temperature i sadržaja ugljik-dioksida na mjestima koja su više udaljena od zida. (Ta mjerjenja mogu poslužiti i za proizvodnju impulsa za regulacione krugove procesa.)

Postoje tri glavna moguća toka plina kroz presjek peći (sl. 17). Periferni se hod pojavljuje kad je protok plina uz periferiju



Sl. 17. Raspored sadržaja ugljik-dioksida i temperature plina u ždrijelu visoke peći. a periferni hod, b centralni hod, c ravnomjerni hod; 1 raspored sadržaja ugljik-dioksida, 2 raspored temperature

presjeka jači, pa je tu temperatura visoka, a sadržaj ugljik-dioksida nizak. Centralni je hod kad takav odnos vlada među tim veličinama stanja u centru presjeka. Približno ravnomjerni hod nastaje kad su protok plina, temperatura i sadržaj ugljik-dioksida na periferiji i u centru presjeka približno jednaki (tada je protok plina najjači, temperatura najviša, a sadržaj ugljik-dioksida najniži na udaljenosti od ~1,5m od zida ždrijela peći). Dakako, pri perifernom i centralnom hodu peći proizvodnja je gvožđa znatno nepovoljnija od proizvodnje pri ravnomjernom hodu.

**Utjecaj zasipa na hod peći.** Za osiguranje zadovoljavajuće ravnomjernosti sastava zasipa u peći nije dovoljna samo njegova dobra pripremljenost prije zasipavanja, jer pri padanju u ždrijelo peći neminovno se poremeti ravnomjernost

granulacionog sastava. Sitnija zrna rudnog zasipa ostaju u sredini gomile, a krupnija se sakupljaju na periferiji. Tom poremećaju ponajviše doprinosi koks, jer uvijek ima krupnija zrna i manji nasipni kut od sitnjeg rudnog zasipa. Zbog toga se krupnija zrna rude sakupljaju uz zidove a koks uz zidove i u centru peći, pa je u tim zonama manji otpor strujanju plina.

Da se uspostava perifernog, odnosno centralnog hoda peći što više ograniči, primjenjuju se različite mjere, npr. raspodjela zasipa rotirajućim razdjelnicima, ujednačavanje pokretnim udarnim oklopima ždrijela, prilagođavanje nivoa i nasipne težine zasipa u peći i redoslijeda upuštanja rudnog zasipa i koksa u ždrijelo. Ponekad se te mjere primjenjuju pojedinačno, ali u savremenim postrojenjima obično istovremeno u različitim kombinacijama.

**Procesi u plinskoj fazi visoke peći.** Sagorijevanje koksa u gnijezdu visoke peći predgrijanim zrakom iz duvnica ne odvija se u stvari prema reakcijama (16) i (17), već najvećim dijelom manje-više potpunim sagorijevanjem ugljika potpunim utroškom kisika iz privedenog zraka, što se, uvezvi u obzir u zraku prisutni dušik, može prikazati kao proces



Međutim, uslijed stalne prisutnosti koksa nakon te reakcije odmah slijedi Boudouardova reakcija, pa se glavni proces sagorijevanja koksa ispred duvnica smije promatrati kao sumarni proces



tj. kao nepotpuno sagorijevanje.

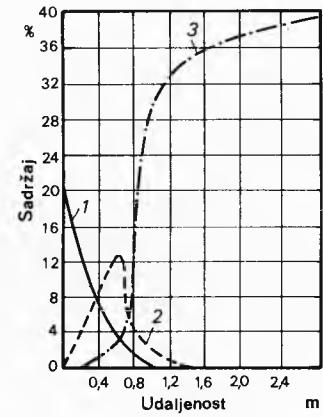
Za sastav plina koji nastaje pri tom sagorijevanju važna je i oksidacija koksa vodenom parom iz zraka, prema reakciji



pa nastaju, već prema vlažnosti zraka, veće ili manje količine vodika.

Sagorijevanjem koksa ispred duvnica obično nastaje plin s približno 40% CO, 2% H<sub>2</sub>O i 58% N<sub>2</sub>. Zbog visoke temperature u gnijezdu peći sagorijevanje je, naime, vrlo intenzivno, pa se kisik i nastali ugljik-dioksid vrlo brzo potroše.

Zbog velike brzine proces se sagorijevanja koksa, odnosno formiranja redupcionog plina ne odvija ravnomjerno na čitavom presjeku gnijezda, nego je ograničen na prsten širine 1,2...1,6m uz zid peći (sl. 18). Pri sagorijevanju je površina unutar tog prstena neaktivna. Ta pojava također uzrokuje sklonost sistema perifernom hodu.

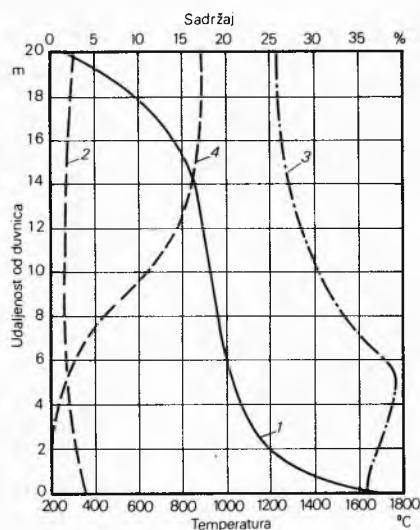


Sl. 18. Raspored sadržaja kisika (1), ugljik-dioksida (2) i ugljik-monoksida (3) u plinu u gnijezdu visoke peći prema udaljenosti od duvnica

Širina aktivnog prstena sagorijevanja koksa u gnijezdu peći i time prosječni sastav plina koji se tu formira mogu se mijenjati promjenama pritiska i brzine strujanja, povećavanjem sadržaja kisika u ulaznom zraku, promjenom osobina koksa, te promjenom količine i vrste plinovitih, tekućih ili čvrstih goriva koja se injektiraju kroz duvnice. Međutim, to su faktori općeg režima procesa koji su manje-više diktirani drugim zahtjevima, pa je mogućnost njihove promjene, da bi se uticalo

na formiranje reduksijskog plina, u stvari vrlo ograničena. Zbog toga je ujednačavanje sastava zasipa po presjeku peći praktički jedina mogućnost za približavanje idealiziranom ravnomernom hodu peći.

Plin formiran u grijezdu peći zagrijava se topotom sagorijevanja koksa na temperaturu  $1700\text{--}1800^{\circ}\text{C}$ . Strujanjem plina od grijezda do ždrijela peći njegova temperatura opada uslijed prenosa topote na zasip i istovremeno se mijenja njegov sastav (sl. 19) prenosom mase hemijskim procesima između plina i zasipa. Najvažniji od tih procesa jesu: izdvajanje isparljivih komponenata iz koksa (ugljik-dioksida, ugljik-monoksida, vodika, metana i dušika) na temperaturi  $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ , redukcija oksida (najviše oksida željeza) popraćena razvijanjem ugljik-dioksida i ugljik-monoksida te disocijacijom karbonata i hidrata uz nastajanje ugljik-dioksida i vodene pare u toku postepenog zagrijavanja zasipa na temperaturu  $1450\text{--}1550^{\circ}\text{C}$ .



Sl. 19. Promjene temperature i sadržaja vodika, ugljik-monoksida i ugljik-dioksida plinske faze visoke peći na putu od duvnica do ždrijela. 1) promjene temperature; promjene sadržaja vodika (2) ugljik-monoksida (3) ugljik-dioksida (4)

Stvaranje redukcijske atmosfere jedna je od najvažnijih uloga plina. To zahtijeva stalni višak reducenata (ugljik-monoksida i vodika zajedno) u plinu, što znači da taj sadržaj mora biti veći od ekvivalentnog sadržaja prisutnog ugljik-dioksida. Proses se odvija to uspješnije, a potrošnja je koksa to manja ne samo što je niža temperatura plina u ždrijelu peći (obično je  $200\text{--}350^{\circ}\text{C}$ ) nego i što je veći sadržaj ugljik-dioksida u plinu visoke peći (veći  $\eta_{\text{CO}}$ ). Postizavanje najpovoljnijeg odnosa tih dva suprotnih zahtjeva jedan je od najvažnijih ciljeva vođenja procesa.

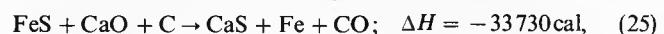
**Procesi u čvrstim i tekućim fazama u visokoj peći.** Indirektna je redukcija povoljnija s obzirom na potrošnju topote i zbog toga je takva redukcija poželjna. Ona je međutim moguća samo do temperature od  $1000^{\circ}\text{C}$  zbog nepostojanosti ugljik-dioksida, kao plinovitog produkta redukcije, u prisutnosti ugljika iznad te temperature. U visokoj peći redukuje se ~99,5% oksida željeza u zasipu (računato na bazi sadržaja Fe), tako da ono skoro potpuno prelazi u gvožđe.

Indirektno se, i to potpuno, redukuju još i oksidi nikla, bakra, cinka i olova. Time nastali nikal i bakar prelaze u gvožđe jer su topljivi u željezu. Zbog toga sadržaj tih metala u gvožđu zavisi samo od sadržaja njihovih spojeva u zasipu. Međutim, olovo i cink netopljivi su u željezu pa se dijelom pojavljuju u prašini plina, a dijelom se talože u fugama i porama zidova peći, gdje djeluju štetno (smanjuju izdržljivost zidova i opasnost su za zdravlje radnika oko peći).

Direktno se, na visokim temperaturama u grijezdu peći, redukuju još i oksidi mangana, vanadija, kroma i titana, te oksidi silicija i fosfora, najvažnijih nemetala za sastav gvožđa.

Samo je redukcija oksida fosfora potpuna, pa i njegov sadržaj u gvožđu zavisi jedino od sadržaja njegovih spojeva u zasipu. Od oksida mangana redukuje se 50...60%, nadacija 80%, kroma 90% i od oksida titana 10...20%. Metali nastali direktnom redukcijom također su topljivi u željezu, pa prelaze u gvožđe. U grijezdu peći uglavnom je nepoželjna redukcija oksida nemetala i neželjenznih metala na visokim temperaturama, ali se ne može spriječiti, jer ona nastaje djelovanjem kisikovih potencijala (sl. 10).

Sadržaj ugljika i silicija u gvožđu zavisi od temperaturnog režima u grijezdu peći. Na to se može uticati količinom koksa i temperaturom ulaznog zraka. Nepoželjni sumpor dospijeva u peć vezan u organskim spojevima koksa (60...90% od ukupno unesene količine) ili u mineralima, najviše u piritu, baritu (10...30% od ukupno unesene količine). Rasporjeđuje se između gvožđa i troske, već prema temperaturi, bazicitetu i količini troske. Glavne reakcije prelaza sumpora u trosku jesu:



(gdje je  $\text{S}_{\text{org}}$  organski vezani sumpor).

**Kapacitet visoke peći.** Potrebnii kapacitet  $G$  visoke peći glavni je osnov za projektiranje procesa proizvodnje gvožđa. On zavisi od kapaciteta sagorijevanja  $K$  (tona) i specifične potrošnje  $S$  (t koksa po t gvožđa) koksa. Vrijednost  $K$  je zavisna od veličine peći, količine ulaznog zraka i fizikalne pripremljenosti zasipa, a  $S$  od sadržaja željeza u zasipu, odnosno od specifične količine zasipa (t po t gvožđa), temperature zraka i od opće pripremljenosti zasipa. Za procjenu kapaciteta, odnosno dimenzija peći, obično se upotrebljava empirijski izraz

$$G = \frac{K}{S} = \frac{305(D - 3,15)}{0,2 + 0,2U}, \quad (28)$$

gdje je  $D$  prečnik grijezda peći, a  $U$  neto masa uloška t po t gvožđa. Pri tome je proizvodnost peći obično  $45\text{--}55 \text{ t/m}^2\text{d}$ , odnosno u tzv. KIPO-sistemu (recipročna vrijednost produktivnosti, t gvožđa po  $\text{m}^3$  zapremine peći na dan)  $0,5\text{--}0,6$ .

Povećavanje kapaciteta visokih peći moguće je, dakle, povećanjem kapaciteta sagorijevanja koksa ili smanjivanjem specifične potrošnje koksa, odnosno na oba ta načina.

Povećanje kapaciteta sagorijevanja koksa postiže se ujednačavanjem propustljivosti zasipa po presjeku peći, povećanjem pritiska zraka na duvnicama i povećanjem sadržaja kisika u zraku. Propustljivost zasipa ujednačava se opisanim postupcima za pripremu zasipa i poboljšanje zasipavanja. Povećanjem pritiska zraka u duvnicama smanjuje se volumen potrebnog redukcionog plina i poboljšavaju se uslovi odvijanja redukcije. Obično je pritisak zraka u duvnicama  $0,25\text{--}0,35 \text{ MPa}$ , a pritisak plina u ždrijelu  $0,15\text{--}0,25 \text{ MPa}$ . Povećanjem sadržaja kisika u zraku ubrzava se sagorijevanje koksa i smanjuje potrebna količina redukcionog plina (uslijed toga što se smanjuje udio količine dušika u zraku).

Smanjenje specifične potrošnje koksa ostvaruje se poboljšanjem opće pripremljenosti zasipa, povećanjem temperature zraka u duvnicama i injektiranjem pare, tekućih ili plinovitih goriva. Opća pripremljenost zasipa poboljšava se opisanim postupcima obogaćivanja rude (posebno je važno smanjenje količine troske), ujednačavanjem propustljivosti zasipa i poboljšavanjem zasipavanja, čime se poboljšava stepen indirektne redukcije, te poboljšavanjem iskorištenja toplote sagorijevanja koksa i reduktivnih osobina zasipa procesima izvan peći. Povećanjem temperature zraka na duvnicama intenzificuje se sagorijevanje koksa i ubrzavaju redukcioni procesi. Injektiranjem pare, koja u peći reagira s koksom prema (24), te tekućih i plinovitih goriva, sa znatnim sadržajem vezanog vodika, smanjuje se potrebna količina koksa i povećava redukciona moć plina. U praksi se kroz duvnice obično injektira  $30\text{--}100 \text{ kg mazuta ili } 1\text{ m}^3 \text{ zemnog plina po t gvožđa}$ . Pri tome  $1 \text{ kg mazuta ili } 1 \text{ m}^3 \text{ plina zamjenjuju } 1,2\text{--}1,5 \text{ kg koksa}$ .

**Materijali i topotni bilans visoke peći** također su vrlo važni za projektiranje, ali i za upravljanje procesom proizvodnje gvožđa. Izradom tih bilansa utvrđuju se količine svih sirovina, goriva i proizvoda koji učestvuju u procesu i topota koja se u njemu pojavljuje. U praksi se upotrebljavaju različiti oblici materijalnih i topotnih bilansa. Za utvrđivanje

konačnih tehnološko-ekonomskih učinaka procesa najprikladniji je prikaz tih bilansa po toni proizvedenog gvožđa (npr. u tabl. 9 i tabl. 10). Vrlo su zorni i vrlo dobro upotrebljivi

Tablica 9

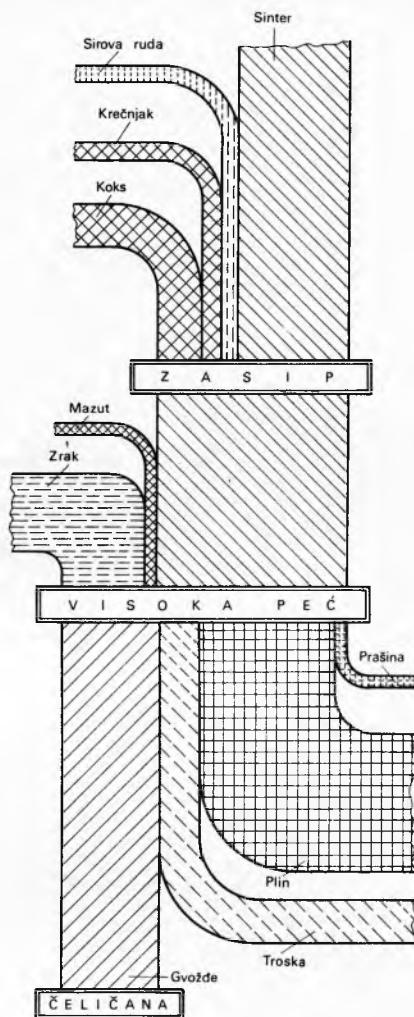
PRIMJER MATERIJALNOG BILANSA ZA PROIZVODNJU 1 t GVOŽĐA U VISOKOJ PEĆI

Ulaz			Izlaz		
Sirovina	kg	udio %	Proizvod	kg	udio %
sinter	1709	48,5	gvožđe	1000	28,2
sirova ruda	62	1,7			
krečnjak	38	1,1			
koks	486	13,8	troska	471	13,4
mazut	45	1,2	plin	2039	57,7
zrak	1195	33,7	prašina iz plina	25	0,7
<b>Ukupno</b>	<b>3535</b>	<b>100,0</b>	<b>Ukupno</b>	<b>3535</b>	<b>100,0</b>

Tablica 10

PRIMJER TOPOLOTNOG BILANSA ZA PROIZVODNJU 1 t GVOŽĐA U VISOKOJ PEĆI

Ulaz			Izlaz		
Izvor	$10^3$ kcal	udio %	<i>potrošnja</i> gubici	$10^3$ kcal	udio %
sagorijevanje koksa	825	30,2	disocijacija oksida	1654	60,6
sagorijevanje mazuta	65	2,4	disocijacija pare i mazuta	145	5,3
oksidacija reducenata pri direktnoj i indir. redukciji	1372	50,3	isparavanje vode iz zasipa	35	1,3
sadržaj u zraku	430	15,8	sadržaj u gvožđu	312	11,4
sadržaj u zasipu	35	1,3	sadržaj u troski	221	8,1
			sadržaj u plinu	210	7,8
			hladenje vodom, isijavanje	150	5,5
<b>Ukupno</b>	<b>2727</b>	<b>100,0</b>	<b>Ukupno</b>	<b>2727</b>	<b>100,0</b>



Sl. 20. Primjer sheme materijalnog bilansa proizvodnje gvožđa

Tablica 11

STATISTIČKI PROSJEK REZULTATA PROIZVODNJE BIJELOG GVOŽĐA U VISOKIM PEĆIMA NEKIH PREDUZEĆA

	Preduzeće										
	Jedinica mjere	ATH Ruhrtort (SR Njem.)	USINOR Dunkerque (Franc.)	Sidmar- Gent (Belgija)	ARBED Differdingen (Luksemburz)	Italsider Taranto (Italija)	Kavasaki Micušina (Japan)	Nipon Kokan Fukujama (Japan)	Čerepovac (SSSR)	Željezara Sisak	Željezara Zenica
Prečnik grijezda	m	11,0	10,2	9,0	6,0	9,14	12,4	13,8	9,75	4,27	7,1
Korisni volumen	$m^3$	2604	2164	1757	861	1959	3363	4197	2000	202	1015
Dnevna proizvodnja	t/d	4321	3515	2590	727	2816	6715	10017	4240	280	891
Proizvodnost	$t/m^2d$	45,5	43,0	41,0	26,0	43,0	55,7	67,1	56,8	19,5	23,1
Proizvodnost – KIPO	$m^3/td$	0,60	0,62	0,68	1,18	0,69	0,50	0,42	0,47	0,72	1,14
Specifična količina rudnog zasipa	kg/t	1686	1670	1715	2311	1620	1626	1614	1648	2057	1908
Bogatost zasipa	%	59,3	60,0	58,3	43,2	61,7	61,5	61,9	60,7	48,6	52,4
Specifična potrošnja suhog koksa	kg/t	453	383	493	780	502	407	437	434	599	625
Specifična potrošnja zemnog plina	$m^3/t$	–	–	57	–	40	–	–	110	8	–
Specifična potrošnja mazuta	kg/t	76	88	–	80	–	98	51	–	–	6
Ukupna potrošnja goriva	kg/t	529	471	550	860	542	505	488	544	607	631
Temperatura zraka	°C	1174	1170	965	1007	1024	1289	1200	1135	739	914
Potrošnja zraka	$m^3/t$	1265	1137	1482	1816	1471	1036	1110	1209	1396	1451
Temperatura plina na ždrijelu	°C	208	200	207	175	202	142	163	291	219	254
Količina troske	kg/t	317	313	294	1014	288	317	290	361	460	581

shematski prikazi bilansi (sl. 20), u kojima su tokovi materijala i toplotne ucrtani u prikladnom mjerilu.

Dakako, rezultat proizvodnje gvožđa razlikuje se od slučaja do slučaja (tabl. 11) u zavisnosti od mnoštva uslova o kojima ovisi proces.

Indeksi za prikazivanje stepena efikasnosti procesa visoke peći obično iznose  $\eta_{CO} = 30\cdots50\%$  i  $\eta_{H_2} = 35\cdots55\%$ . Osim tih indeksa, upotrebljavaju se i drugi pokazatelji, izračunati također iz toplotnog bilansa: ukupno dovedena toplota  $Q$  ( $2,5\cdots3,2 \cdot 10^6$  kcal/t gvožđa), stepen iskorištenja toplote  $\eta_Q$  ( $80\cdots92\%$ ), stepen iskorištenja koksa  $\eta_C$  ( $50\cdots60\%$ ).

B. Koželj

### POSTROJENJA VISOKE PEĆI

Za savremenu proizvodnju gvožđa u visokim pećima potrebno je više pratećih postrojenja. Obično je ta proizvodnja povezana s proizvodnjom čelika (sl. 21). Uz postrojenja za pripremu rudnog zasipa ujednačavanjem sastava na skladištu, sitnjjenjem, prosijavanjem i aglomeriranjem, važna su i skladišta goriva i postrojenja za njihovu pripremu (npr. rezervoari za prihvata i uređaji za injektiranje tekućih i plinovitih goriva, prosijavanje koksa). Ostala su važna pomoćna postrojenja: bunkeri, zasipni uređaji, strojevi za probijanje i zatvaranje ispusta, postrojenja za obradu plina, za snabdijevanje zrakom i vodom, za lijevanje gvožđa, za obradu troske, transportna sredstva za gvožđe i trosku, kotlovnica, elektroenergetska postrojenja i, često, postrojenja za proizvodnju koksa (v. *Ugljen*). Za savremenu proizvodnju gvožđa vrlo su važni uređaji za mjerenje, kontrolu i regulaciju procesa peći.

**Postrojenje za istovar i skladište sirovina.** Sirovine se postrojenjima za proizvodnju gvožđa dopremaju željeznicom ili, kad su ta postrojenja smještena na morskoj obali, brodovima.

Budući da se radi o velikim masama rude željeza i ugljena (odnosno koksa, ako postrojenje nema vlastitu koksaru), za njihov istovar upotrebljavaju se visokoproduktivni automatizirani mehanički uređaji, a konvejeri za transport na skladište i sa skladišta. Skladište rude uvijek je na otvorenom s velikim kranom na tračnicama za njegovo posluživanje.

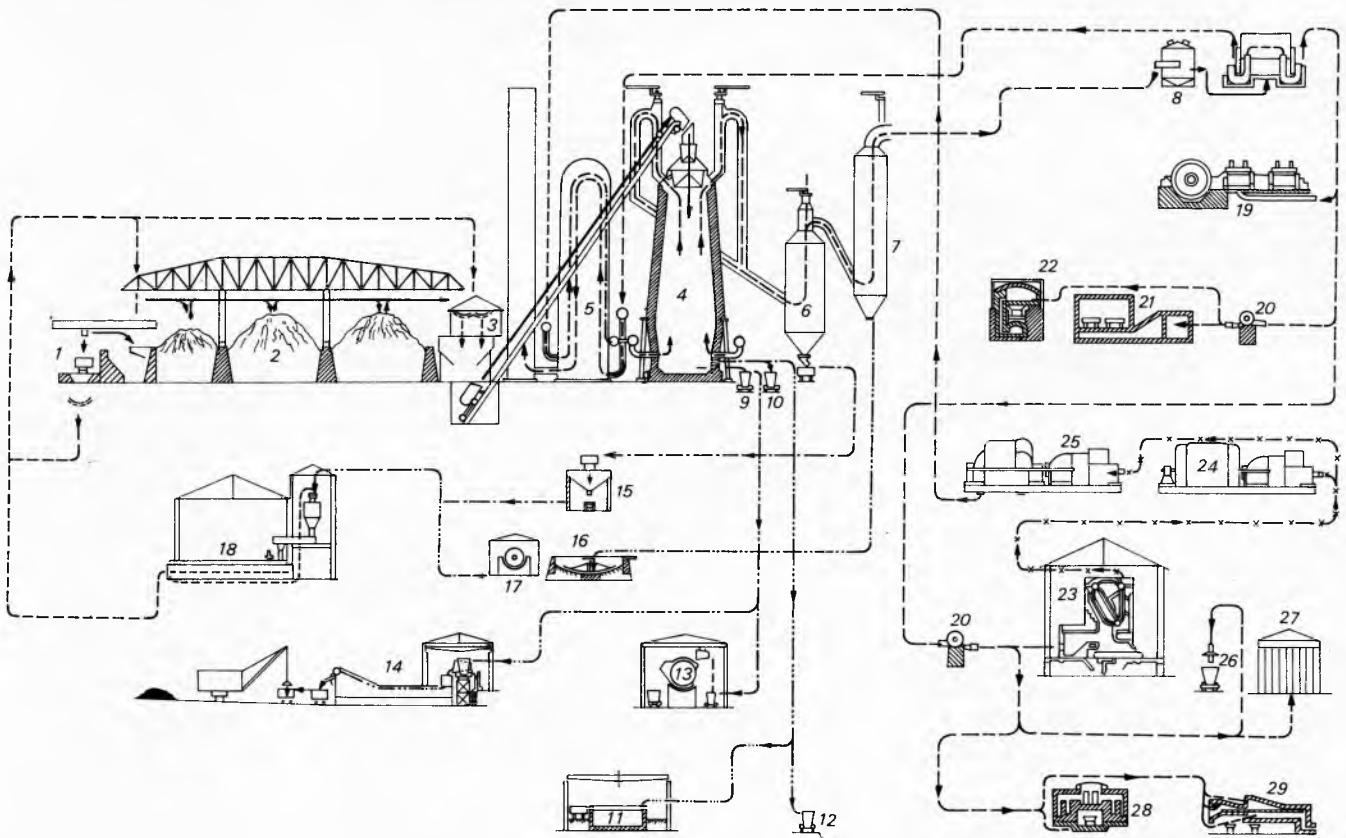
**Postrojenja za sitnjjenje i prosijavanje** (v. *Drobljenje*, TE 3, str. 395, v. *Miješanje*, v. *Sitnjjenje*) ruda željeza koja služe za dobivanje čestica jednoličnije veličine vrlo su jednostavna. Za pripremu ruda željeza kojima se snabdijevaju evropski proizvođači gvožđa obično su potrebna postrojenja za sitnjjenje i prosijavanje prema shemi na sl. 22. U tim postrojenjima proizvode se dvije frakcije granula (s česticama veličine  $20\cdots50\text{mm}$  i  $6\cdots20\text{mm}$ ) za izravnу preradu u peći i jedna (s česticama  $<6\text{mm}$ ) koju treba prethodno aglomerirati.

**Postrojenja za aglomeriranje ruda željeza** mogu biti kontinualnog ili periodičkog tipa. Postrojenja za kontinualno aglomeriranje obično su već spomenuta postrojenja s lančanim roštiljima, tzv. aglotrakama, ili peći, a za periodičko aglomeriranje jesu tave.

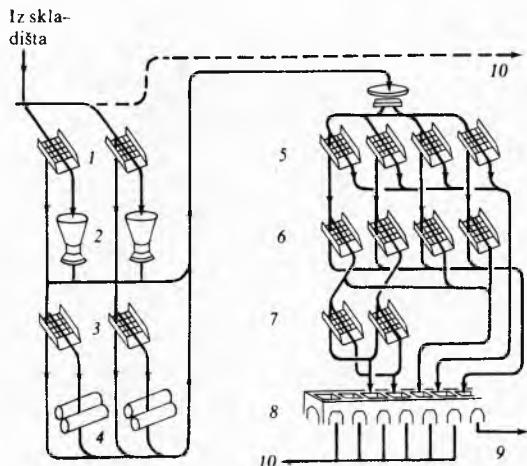
Tave za aglomeriranje su zastarjele. U Jugoslaviji se još upotrebljavaju u željezarama u Štorama, Zenici, Sisku i Ilijasu. To su fiksne tave (postoje i prenosive), pravougaonog oblika, iz kojih se istresa gotovi sinter iskretanjem za  $180^\circ$  oko horizontalne osovine. Površina je tava obično  $12\text{m}^2$  (u Zenici  $22\text{m}^2$ ).

Danas se u nove objekte za aglomeriranje ruda željeza ugraduju samo postrojenja s aglotrakama (v. *Oplemenjivanje mineralnih sirovina*, v. *Sinteriranje*). Postoje različite izvedbe tih postrojenja. Često imaju i uređaje za prethodnu peletizaciju. U Jugoslaviji su postrojenja za aglomeraciju ruda željeza s aglotrakama izgrađena u Jesenicama, Smederevu i Zenici.

Za aglomeriranje ruda željeza obično se upotrebljavaju jamske peći, zapremljene  $50\cdots80\text{m}^3$ . Veoma su rijetke rotacione



Sl. 21. Shema proizvodnje gvožđa u visokoj peći. 1 uređaji za istovar sirovina, 2 skladište sirovina, 3 uređaji za pripremu zasipa i hranjenje peći, 4 visoka peć, 5 kauper, 6 uređaj za grubo čišćenje plina, 7 uređaj za čišćenje plina vodom, 8 uređaj za elektrostaticko čišćenje plina, 9 kazan za gvožđe, 10 kazan za trosku, 11 uređaj za granulaciju troske, 12 jama za kristalizaciju troske, 13 mikser čeličane, 14 livni stroj, 15 bunker za suhu prašinu, 16 taložni bazen, 17 filter za suspenziju prašine, 18 uređaj za aglomeraciju sinterovanjem, 19 plinska turbina, 20 ventilatori, 21 zagrijevna peć, 22 ognjišna peć, 23 kotlovnica, 24 parni turbogenerator, 25 parni duvaljka za zrak, 26 uređaj za grijanje kazana, 27 peć za proizvodnju koksa, 28 dubinske peći, 29 potisne peći



Sl. 22. Shema običnog procesa sitnjenja i prosijavanja rude željeza za proizvodnju gvožđa. 1 odvajanje frakcije čestica < 300 mm, 2 drobljenje frakcije čestica > 300 mm u čestice od ~50 mm, 3 odvajanje frakcije čestica < 50 mm, 4 drobljenje frakcije čestica > 50 mm u čestice od 20 mm, 5 odvajanje frakcije čestica 20...50 mm i < 20 mm, 6 odvajanje frakcije čestica od 6...20 mm i < 6 mm, 7 odvajanje frakcije čestica 10...20 mm i 6...10 mm, 8 bunker, 9 transport u peć, 10 transport u postrojenje za aglomeriranje

peći. Takve peći imaju prečnik 2...4m, dužinu 30...40m, a kapacitet 250...1000t/d. Lože se plinom. Dio plina se može zamjeniti čvrstim gorivom, koje se dodaje sirovini prije ulaza u peć. Potrošnja je toplotne  $2,2 \cdot 3 \cdot 10^5$  kcal po t prženca.

Postrojenja za aglomeriranje u željezarama osim za pripremanje rude potrebna su i za preradu prašine izdvojene iz plina visoke peći.

**Bunkeri** visoke peći služe za prihvatanje pojedinih komponenata zasipa pri njegovu pripremanju. Bunkeri moraju imati toliku zapreminu da mogu prihvati zalihe komponenata nužne za vrijeme normalnog toka procesa, ali i za vrijeme uklanjanja kvarova na uređajima unutrašnjeg transporta između skladišta i peći. Premali kapacitet bunkera može bitno poremetiti proizvodni proces, ali investicije za prevelike bunkere nisu ekonomski opravdane.

Za proporcionaliranje rude i taljiva pri formiraju zasipa bunkeri imaju prikladne ispusne uređaje i uređaje za vaganje, a za proporcionaliranje koksa još i uređaje za prosijavanje (prije vaganja) i za povrat sitnog koksa (npr. za aglomeraciju, za loženje i sl.).

Najprikladniji oblik bunkera visoke peći je pravougaonik s kosim dnom ( $45\text{--}55^\circ$ ). Transport proporcionaliranih količina komponenata do zasipnih uređaja mora biti što kraći, pa se bunkeri smještaju u neposrednu blizinu visoke peći.

**Zasipni uređaji** visoke peći sastoje se od nekoliko mehanizama povezanih u sistem automatskom koordinacijom rada. U taj sistem nužno su uključeni i svi procesni uređaji, počevši od ispusta bunkera. Na drugom kraju tog sistema nalazi se konstrukcija nad ždrijelom peći koja omogućava hranjenje peći zasipom uz izolaciju plinskog prostora peći od okoline (zasipni toranj). Mehanizam za transport zasipa do ždrijela vrlo je bitni dio tog sistema.

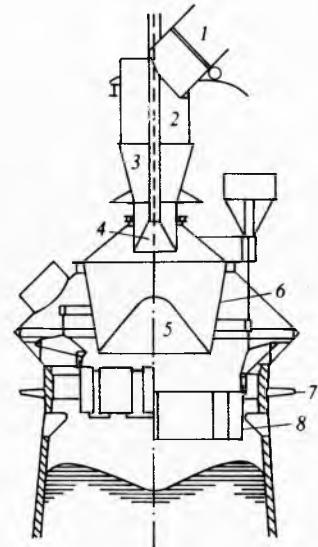
Zasipni tornjevi ždrijela starijih peći s malim tlakom plina gradili su se samo kao uređaji s dva zvona (sl. 23). Ta su zvona smještena u kućištu spojenom s odvodima plina i učvršćena na ždrijelu peći prirubničkim spojem ili na posebnoj konstrukciji. Čim se prihvativi lijevak napuni, malo se zvono spušta i zasip pada u zdjelu zatvorenu velikim zvonom. Nakon što se prihvativi lijevak isprazni, malo se zvono podiže i zatvara ispušti lijevku. Zatim se spušta veliko zvono i zasip pada u ždrijelo peći. Kad se zdjela isprazni, veliko se zvono podiže i ponovno zatvori zdjelu. Ponavljanje tog ciklusa hranjenja regulira sonda (motka prečnika ~50mm) nivoa zasipa u ždrijelu posredstvom njenog zagonskog uređaja.

Zvona i zdjela izrađeni su od lijevanog čelika sa zidovima od ~60mm. Veliko zvono je od jednog, a malo zvono i zdjela

od dva komada, da bi se mogli mijenjati donji dijelovi koji su više izloženi trošenju. Da bi dodirne površine zvona i zdjele dovoljno dobro prilijegale jedna na drugu, kako bi se postiglo dobro zaptivanje, izrađuju se navarivanjem sloja tvrdog metala debljine ~5mm, koji se naknadno obrađuju. Iz istog razloga zvona se balansiraju prije ugrađivanja. Zaptive zvona i zdjele provjerava se pri montaži nasipavanjem vode u zdjelu.

Dimenzije zasipnih tornjeva određuju se empirijski. Volumen je zdjele  $2,5\text{--}3\%$  volumena peći. Prečnik je malog zvona  $1,5\text{--}2\text{m}$ , a prečnik velikog manji je za  $1,2\text{--}1,9\text{m}$  od prečnika ždrijela. Plašt velikog zvona zatvara s horizontalom ugao od  $\sim 53^\circ$ , a malog  $50\text{--}55^\circ$ . Zvona su motkama spojena s mehanizmom za pomicanje. Motka malog zvona je šuplja (zidovi su joj debeli ~22mm), a kroz nju je provučena motka velikog zvona. Malo zvono spojeno je kruto s motkom, a veliko elastično. Hod je velikog zvona  $450\text{--}1000\text{mm}$ . Mehanizmi za pomicanje zvona mogu biti elektromotorna vila ili pneumatski cilindri. S motkama su spojeni čeličnim užetima preko protivtegova. Sonda se također pomiče pomoću elektromotornog vila.

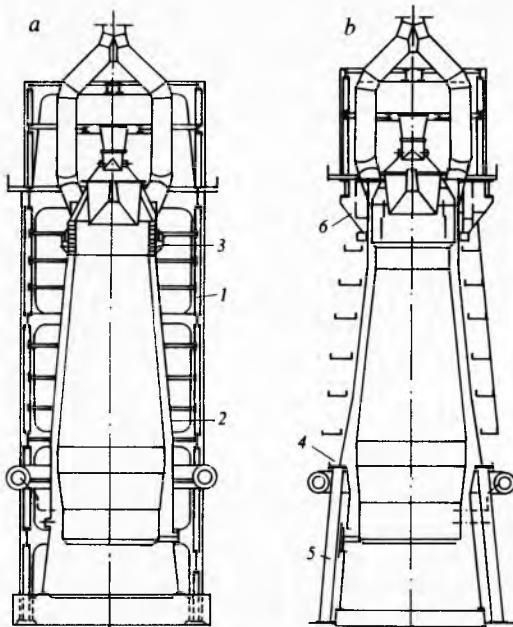
Zasipni tornjevi služe, također, za ravnomjerno zasipavanje visoke peći. Tako se, pri šaržnom dovođenju skipovima, zasip ravnomjerno raspoređuje u prihvatom lijevku jer se nakon svakog skipa lijevak zakrene za  $60^\circ$  ili višekratnik tog ugla. Brzina zakretanja iznosi  $\sim 20^\circ$  u sekundi. Skip koji doprema zasip prihvatom lijevku kreće se po kosom mostu, također pomoću elektromotornog vila. U novije vrijeme zasip se doprema u lijevak kontinuirano transportnim trakama.



Sl. 23. Shema uređaja sa dva zvona zasipnog tornja visoke peći. 1 skip, 2 usipni lijevak, 3 okretnivi lijevak, 4 malo zvono, 5 veliko zvono, 6 zdjela, 7 kompenzator, 8 pokretnivi oklop za zaštitu od udara

U novijim visokim pećima, koje imaju zasipne tornjeve s dva zvona, pojavljuju se poteškoće jer je u njima tlak plina dosta visok (do  $0,4\text{MPa}$ ). Tada prašina u plinu djeluje snažno abrazivno, pa može doći do vrlo skupih prekida proizvodnje. Zbog toga su se u posljednje vrijeme počeli upotrebljavati i uređaji koji imaju do 4 zvona, te uređaji koji na drugim principima (npr. s pomoću zaklopki) izoliraju plinski prostor peći od okoline i koji raspoređuju zasip u ždrijelu pomoću pokretnih mehaničkih uređaja.

**Konstrukcija visoke peći.** Visoke peći mogu se svrstati u dvije temeljne skupine: peći s nosačima zasipnog tornja i peći s nosačima trupa (sl. 24). Svaka visoka peć ima četiri osnovna dijela (sl. 25): ždrijelo (grotlo), trup (jamu, šaht), sedlo i glijezdo. One se sastoje od ozida i čelične konstrukcije. Na njima su smješteni uređaji za hlađenje, a na glijezdu i duvnice s dovodima zraka, ispušti gvožđa i troske. Osim toga, u opremu visoke peći spadaju uređaji za probijanje i začepljivanje ispušta gvožđa i troske, za mjerjenja, kontrolu i regulaciju, montažni kran. Temelj je važan dio visoke peći.



Sl. 24. Tipovi visokih peći: a peć s nosačima zasipnog tornja, b peć s nosačima trupa: 1 nosiva čelična konstrukcija, 2 plašta, 3 kompenzator, 4 prstenasti nosač trupa, 5 nosači trupa, 6 potporni zasipnog tornja

Ozid visoke peći sastoji se od vatrostalnih opeka, maltera i masa za nabijanje. Izložen je vrlo složenom agresivnom djelovanju niza činilaca (sl. 26). Zbog toga su pojedini dijelovi ozida visokih peći od različitih opeka.

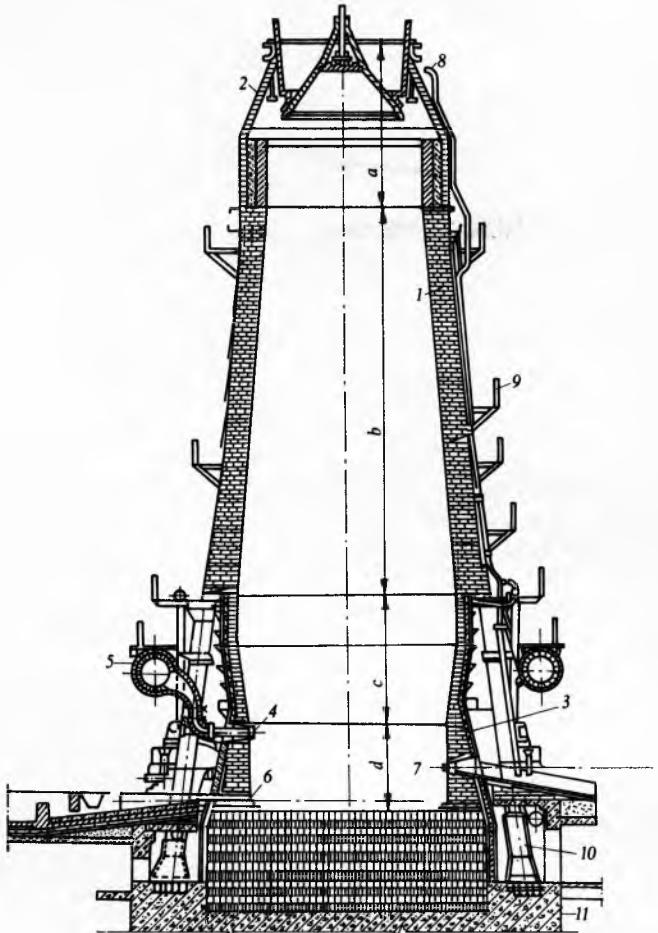
Najčešće se za ozid trupa upotrebljavaju opeke i malter od tvrdog šamota. U donjoj su trećini opeke od kvalitetnijeg materijala (sa  $42\cdots44\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), u srednjoj od materijala nešto slabijeg kvaliteta (sa  $36\cdots39\%$ , ili  $32\cdots35\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), a u gornjoj trećini od materijala s niskim sadržajem  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Šamotni materijal za ozid trupa ne smije sadržavati više od  $1,5\%$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , jer on katalizira Boudouardovu reakciju, pa uzrokuje ugrađivanje ugljika u ozid i time pospješuje njegovo raspadanje. Osim toga te opeke ne smiju biti odviše porozne da ne bi absorbirele mnogo plina, iz kojeg se može izlučiti ugljik. One moraju biti vrlo čvrste i postojanih dimenzija (što manja termička istezljivost) da bi se smanjile dimenzije fuga.

Za ozid ostalih dijelova visokih peći najviše se upotrebljavaju ugljične opeke ( $250 \times 250 \times 500\text{mm}$ ) i blokovi ( $700 \times 500 \times 200\text{mm}$ , pa i  $600 \times 600 \times 500\text{mm}$ ). Za kompenzaciju termičkog istezanja ozida od velikih blokova potrebne su velike fuge ( $\sim 50\text{mm}$ ). One se ispunjavaju masama za nabijanje koje se sastoje od koksa i katranja. Dna gnijezda novijih visokih peći zidaju se od kombinacije šamotnih i ugljičnih opeka. Šamotom se obzidavaju i otvori za duvnice i ispusti. Ispust za gvožđe širok je  $250\text{mm}$ , a visok  $500\text{mm}$ . Ojačan je okvirom od livenog čelika. Zatvara se masom od vatrostalne gline. Ispust za trosku je od bakrenih hladnjaka hlađenih vodom koji su teleskopski smješteni jedan u drugi. Otvor tog ispusta na ulazu u peć ima prečnik  $50\cdots65\text{mm}$ . Veće peći imaju dva ispusta za trosku. Ispusti za trosku i gvožđe nalaze se na dva različita nivoa, a razmaknuti su  $90\cdots180^\circ$  po obodu peći.

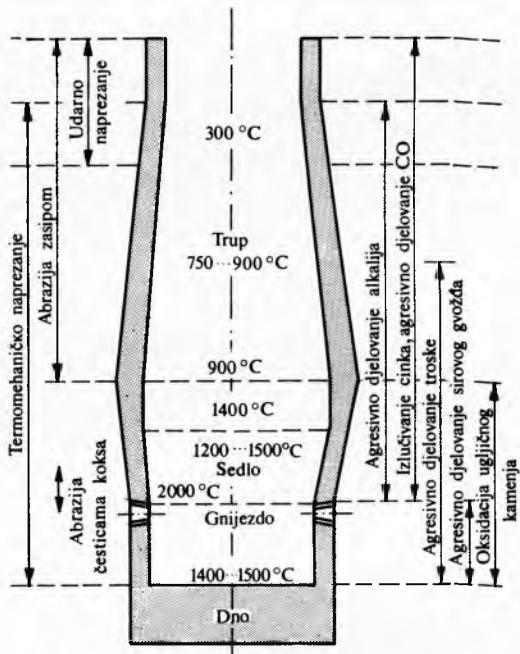
Trajanost visoke peći zavisna je od trajnosti njenog ozida. Dno visoke peći traje  $10\cdots15$  godina. Za to vrijeme obično se ozid trupa mijenja dvaput, a ozid sedla jedanput. Stanje ozida visoke peći kontrolira se pirometrima s osjetilima ugrađenim na potrebnim mjestima.

*Uredaji za hlađenje visoke peći.* Trajanje ozida visoke peći uvelike je zavisno od njegove radne temperature. Zbog toga je nužno njegovo vrlo intenzivno hlađenje. Pri tome se doduše gubi do  $200\text{kcal}$  po  $1\text{kg}$  goriva, ali ti su gubici opravdani smanjenjem troškova eksploracije.

Najčešće se visoka peć hlađi vodom oblijevanjem plašta izvana. Za tu svrhu se oko trupa na tri horizonta postavljaju



Sl. 25. Konstrukcija visoke peći: a ždrjelo, b trup, c sedlo, d gnijezdo; 1 ozid, 2 konstrukcija zasipnog tornja, 3 plašt gnijezda i sedla, 4 duvnica, 5 vodovi za dovod zraka, 6 ispust gvožđa, 7 ispust troske, 8 dovod vode za hlađenje, 9 radna platforma, 10 nosač, 11 temelj



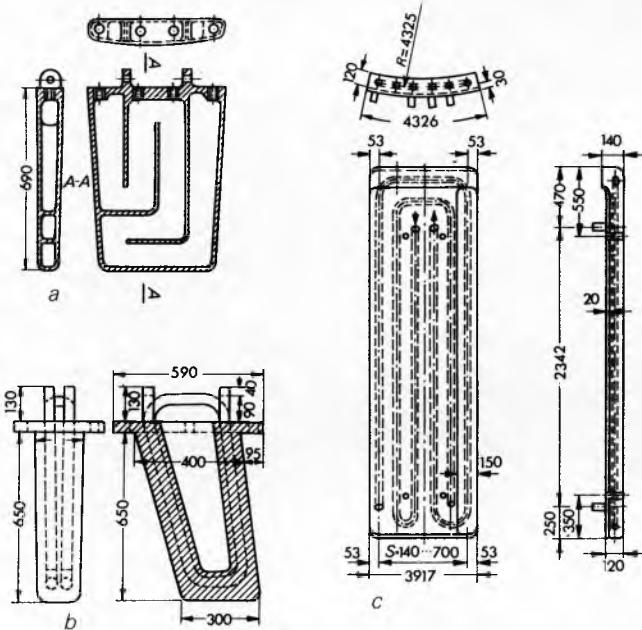
Sl. 26. Činoci agresivnog djelovanja na ozid visoke peći

obljevači. To su prsteni od cijevi prečnika  $50\cdots150\text{mm}$  s brzalicama (rupicama prečnika  $4\cdots5\text{mm}$ ). Na sedlu su obljevači izvedeni kao prstenasti žljebovi, jer se ono prema dolje sužava.

Takvo je hlađenje dosta uspješno, ali plašt brzo korodira, što je svakako nedostatak.

Hlađenje visoke peći posebnim hladnjacima (sl. 27) jednako je uspješno, a nema spomenute mane. Hladnjaci su od live-nog gvožđa. Vertikalni se hladnjaci upotrebljavaju za hlađenje ozida grijezda, a ugrađuju se između ozida i plašta. Za hlađenje ozida ostalih dijelova peći prikladniji su horizontalni hladnjaci koji se ugrađuju u ozid kao pločasti i konzolni hladnjaci. Kroz vertikalne i konzolne hladnjake voda cirkulira kroz ulivene cijevi, a u horizontalnim pločastim hladnjacima ulivene pregrade usmjeravaju njezino strujanje.

Vertikalni hladnjaci obuhvataju skoro čitavo gnijezdo, ponekad do 3 m ispod ispusta za gvožđe. Segmenti su visoki do 5 m i široki 700–1500 mm. Pločasti se hladnjaci upotrebljavaju za hlađenje ozida sedla i dijela ozida gnijezda u zoni duvnica, a konzolni hladnjaci za hlađenje ozida trupa. Obično su horizontalni hladnjaci razmaknuti 1–1,5 m u horizontalnom i 0,4–1 m u vertikalnom smjeru. Pločasti su hladnjaci odvojeni od ozida fugom, ispunjenom masom za nabijanje, koja omogućava širenje ozida tokom prvog zagrijavanja. Konzolni se hladnjaci kruto učvršćuju za plašt, jer služe i kao nosači ozida. Zbog toga se ne mogu mijenjati kao pločasti hladnjaci.



Sl. 27. Najčešći oblici hladnjaka visokih peći. a) pločasti, b) konzolni, c) vertikalni

U novije se vrijeme nastoji uvesti hlađenje visokih peći uz istovremenu proizvodnju pare. Međutim, takvi sistemi hlađenja još se malo primjenjuju.

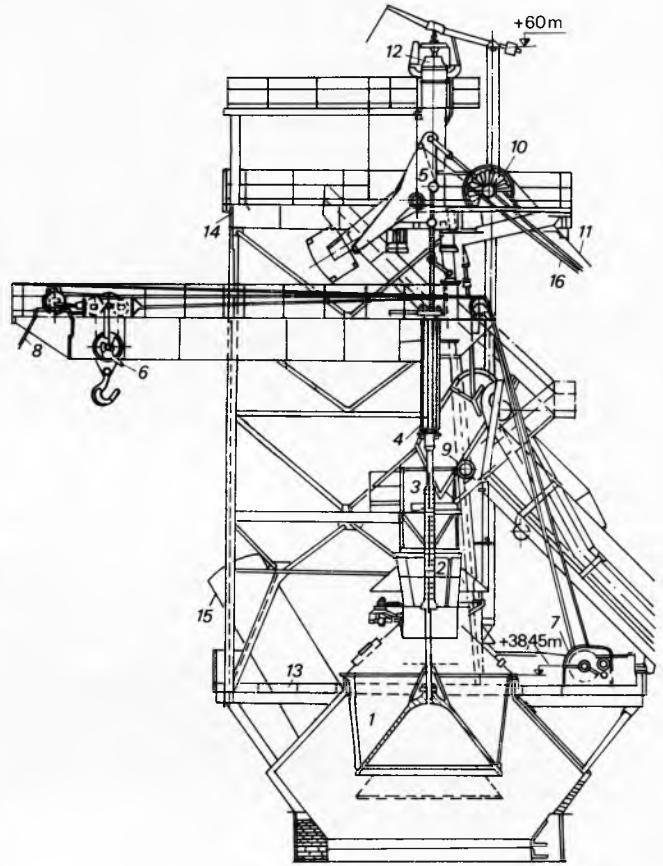
*Čelična konstrukcija visoke peći* sastoji se od ojačanja ozida koja preuzimaju mehanička naprezanja, radnih platformi sa stepeništim, montažne kranske staze i nosača.

Za ojačanje ozida novijih visokih peći, posebno peći s nosačima trupa, služi kompaktni plašt od čeličnih limova, koji su najčešće međusobno zavareni. Na visokim pećima s nosačima zasipnog tornja umjesto plašta trupa upotrebljavaju se čelični obruci; limeni je plašt tada samo oko sedla i gnijezda. Prostor između plašta i ozida ispunjen je šamotnim malterom, odnosno masom za nabijanje. Peći s potpunim plaštem općenito su sigurnije, pogotovo kad je ozid već djelomično istrošen. Da bi bio siguran i na višim temperaturama koje se mogu pojavit u uslijed uznapredovalog odgora ozida, plašt se često ojačava dodatnom čeličnom konstrukcijom na stubovima oslonjenim na nosače trupa.

Obično su s plaštem spojene i oklopne ploče u unutrašnjosti ždrijela, visoke 2,5–3 m, koje štite ozid od udaraca materijala koji pada sa zvana, od pritiska zbog spuštanja tvrdog

zasipa u niže slojeve, te od abrazije zbog strujanja prašine u plinu. Oklopne ploče ždrijela vežu se ponekad samo za oblogu, ali su tada manje sigurne.

Radne platforme visokih peći s pristupnim stepeništim nalaze se na svim nivoima na kojima je potrebno raditi za vrijeme pogona ili popravka. Na pećima s nosačima zasipnog tornja učvršćene su na čeličnu konstrukciju nezavisnu od konstrukcije peći. Na pećima s nosačima trupa učvršćene su dijelom na posebnu konstrukciju, dijelom na samoj peći, a dijelom su uklopljene u konstrukciju zasipnog tornja (sl. 28).



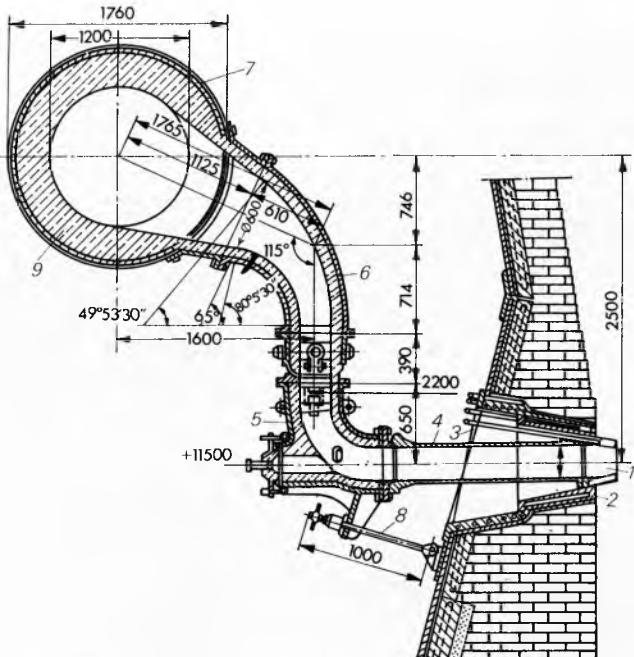
Sl. 28. Primjer konstrukcije zasipnog tornja visoke peći. 1) veliko zvono, 2) razdjelnik zasipa, 3) prihvati lijevak, 4) protivteg zvona, 5) motka za balansiranje, 6) montažni kran, 7) vitlo krana, 8) užad krana, 9) skip, 10) kolotor, 11) užad vitla skipa, 12) odušni ventil, 13) zasipna platforma, 14) čelična rešetka, 15) odvod plina, 16) užad za upravljanje zvonom

Montažna kranska staza služi za izmjenu dijelova zasipnih uređaja. Učvršćena je na konstrukciju zasipnog tornja. Kranom se upravlja sa zasipne platforme.

*Duvnički sistem visoke peći* (sl. 29) sastoji se od prstena nastog razdjelnika vrućeg zraka smještenog oko sedla, potrebnog broja duvnica smještenih oko gnijezda, dijelova za spoj duvnica s razdjelnikom (koljena, duvnog nastavka) i hladnjaka duvnica.

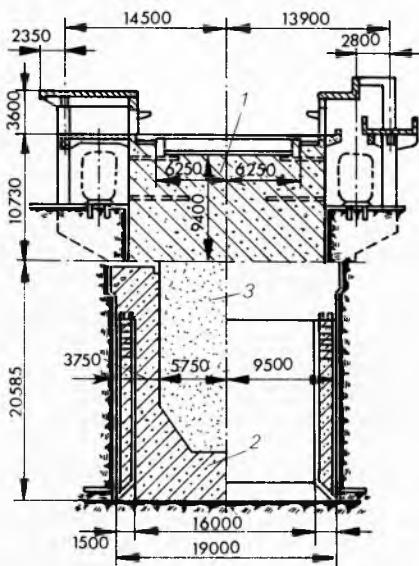
Duvnice su okrugli, bakreni elementi s prečnikom od 140–250 mm hlađeni vodom. Smješteni su teleskopski unutar većih hladnjaka. Njihova priključna koljena i razdjelnik zraka su ozidani.

Budući da se broj duvnica ne može mijenjati tokom eksploracije peći, potrebno ga je odrediti pri projektovanju. Eventualno potrebne korekcije količine zraka koja se uduvava u peć mogu se kasnije postići samo promjenom prečnika duvnica. Za orientaciju se uzima da je broj potrebnih duvnica  $n = 2d$ , gdje je  $d$  (m) prečnik gnijezda. On mora biti toliki da osigurava formiranje zatvorene prstenaste zone sagorijevanja. To zavisi od niza faktora, pa broj potrebnih duvnica varira unutar granica koje odgovaraju razmaku od 1,3–2 m među duvnicama.



Sl. 29. Presjek duvnice i razdjelnika zraka. 1 duvnica, 2 hladnjak duvnice, 3 ram, 4 duvni nastavak, 5 okretno koljeno, 6 fiksno koljeno, 7 razdjelnik zraka, 8 stezni vijak, 9 ozid

Temelj visoke peći izložen je velikim mehaničkim naprezanjima. Savremene peći normalnog kapaciteta visoke su  $\sim 70$ m, računajući od ispusta za gvožđe, a zajedno sa slojem materijala u njima, visokim  $\sim 30$ m, imaju masu od 30kt (u eksploraciji su i mnogo više, do 130m). Pored toga, temelj je visoke peći izložen i djelovanju bočnih sila od kosog mosta dizala zasipa i kose cijevi za odvod plinova. Velika su i termička opterećenja temelja visokih peći jer na njihovoj gornjoj površini vladaju temperature i više od  $1000^{\circ}\text{C}$ .



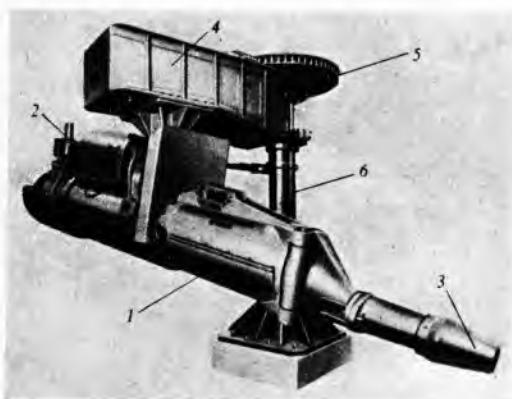
Sl. 30. Primjer presjeka temelja visoke peći. 1 vlastalni beton, 2 obični armirani beton, 3 nasip

Zbog toga temelji visokih peći imaju uvjek gornji dio od vratostalnog i donji od kvalitetnog armiranog betona. Gornji dio mora biti toliko debeo ( $3,5\text{--}4\text{m}$ ) da temperatura njegova dna ne bude viša od  $250^{\circ}\text{C}$ . Izvedba donjeg dijela temelja visoke peći mora biti prilagođena nosivosti tla. Na tlu vrlo dobre nosivosti taj dio može biti betonska stopa. Inače je nužan dubinski temelj (sl. 30) koji se mora oslanjati na nosivi sloj (kamen, debeli sloj šljunka).

**Strojevi za probijanje i začepljivanje ispusta.** Za probijanje ispusta za gvožđe upotrebljavaju se velike bušilice, a za njegovo zatvaranje tzv. puške za zatvaranje. To su strojevi okretljivo montirani na nosećim stubovima u neposrednoj blizini ispusta, da bi se mogli skloniti kad nisu u upotrebi.

Bušilice za probijanje ispusta za gvožđe imaju elektromotorni ili pneumatski pogon. Puške za zatvaranje su strojevi s jednim ili dva dvojna cilindra s po dva mehanički spregnuti klipa: tlačnim na pneumatski ili hidraulički pogon i radnim koji tlači masu u ispust. U novije vrijeme upotrebljavaju se elektromotorne puške za zatvaranje (sl. 31). One imaju vlastitu pumpu s elektromotornim pogonom za tlačenje ulja potrebnog za hidraulički pogon. Obično se uz pušku nalaze i uređaji za drobljenje i miješanje potrebnii za pripremu mase za zatvaranje ispusta.

Za otvaranje i zatvaranje ispusta za trosku upotrebljavaju se čepovi od livenog gvožđa. Vade se iz ispusta i vraćaju u nj strojevima koji se, kad nisu u radu, podignu iznad radne površine.



Sl. 31. Elektromotorna puška za zatvaranje ispusta za gvožđe.  
 1 cilindri, 2 zagonski sklop, 3 sapnica, 4 konzola s prenosima  
 za pomicanje, 5 okretište, 6 nosač

**Uredaji za snabdijevanje zrakom.** Za sagorijevanje 1t koksa u visokoj peći potrebno je  $2400\cdots2700 \text{ m}^3$  zraka. Na putu do ulaza u peć u novijim se postrojenjima gubi 5…8% zraka. Aerodinamički otpor na tom putu je  $0,01\cdots0,04 \text{ MPa}$ . Pored toga, tlakom zraka treba sviadati i razliku pritisaka od  $0,01\cdots0,03 \text{ MPa}$  na putu od duvnica do ždrijela peći, te, u novijim pećima, osigurati potreban natpritisak u ždrijelu (obično  $0,1\cdots0,3 \text{ MPa}$ ).

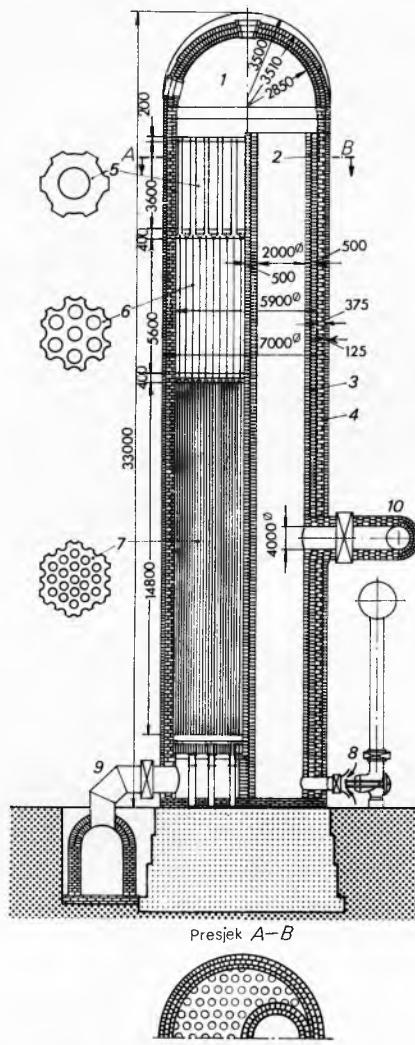
Budući da je temperatura ulaznog zraka bitan činilac specifičnog učinka peći, teži se što višim temperaturama zraka. Tako se donedavno zrak za visoke peći zagrijavao samo do  $\sim 800^{\circ}\text{C}$ , a za postizavanje visokih specifičnih učinaka savremenih visokih peći zrak se grijе na temperaturu od  $\sim 1300^{\circ}\text{C}$ . Zbog toga su za pripremu zraka potrebnog u savremenim visokim pećima nužna vrlo efikasna postrojenja za kompresiju i za zagrijavanje.

*Postrojenja za kompresiju zraka* (kompresorske stanice) vrlo su velika. U njima se troši 9...12% od energije potrebne za taljenje gvožđa. Ranije su se za kompresiju zraka za visoke peći upotrebljavali klipni kompresori s parnim ili plinskim pogonom. Danas se upotrebljavaju praktički samo parne turboduvaljke (centrifugalne duvaljke s parnom turbinom kao pogonskim strojem).

Zagrijivač zraka. Po prvi put je zagrijavanje zraka za visoku peć primijenjeno 1830. godine, i to na rekuperativnom principu. Od 1857. primjenjuje se regenerativno zagrijavanje zraka. Za to se upotrebljavaju tzv. kauperi (prema konstruktoru E. A. Cowperu).

To su aparati ispunjeni vatrostalnim opekama posebnih oblika kroz koje naizmjenično struje plinovi sagorijevanja plinova visoke peći i zrak koji treba zagrijati. Zbog njihova intermitentnog pogona za jednu je visoku peć potrebna baterija kaupera. Ona se obično sastoji od 3 ili 4 kaupera. Jedan ili

dva kaupera zagrijavaju se plinovima sagorijevanja, a dva služe za zagrijavanje zraka. U jednom od njih, koji je tek zagrijan, zagrijava se zrak na visoku temperaturu, a drugi, već prilično ohlađen, služi za predgrijavanje zraka. Vrućem zraku iz prvog kaupera dodaje se toliko hladnjeg zraka iz drugoga koliko je potrebno da se održava konstantna temperatura zraka na ulazu u peć.



Sl. 32. Kauper s ugrađenom komorom za sagorijevanje. 1 kupola, 2 unutrašnji ozid komore za sagorijevanje, 3 vanjski ozid komore za sagorijevanje, 4 ozid i plasti kaupera, 5 sače od vatrostalnih opeka s jednim kanalom, 6 sače od vatrostalnih opeka sa 7 kanala, 7 sače od vatrostalnih opeka sa 19 kanala, 8 dovod plina s gorionikom i pripadajućim uređajima, 9 odvod dimnih plinova, dovod zraka za peć, 10 odvod zraka u peć

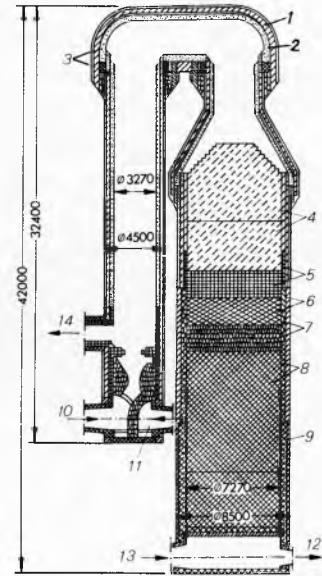
Kauperi se izvode s ugrađenom ili vanjskom komorom za sagorijevanje (sl. 32 i 33). Kauperi s ugrađenom komorom još se uvek najviše upotrebljavaju, ali nisu prikladni za zagrijavanje zraka na vrlo visoke temperature zbog odviše velikih termičkih naprezanja graničnih zona njihove konstrukcije između komore za sagorijevanje i sača.

Saće kaupera s ugrađenom komorom za sagorijevanje obično ima tri sloja vatrostalnih opeka specijalnih oblika i od različitih materijala. Oblik i vrsta opeka prilagođeni su zahtjevu da se postigne dobar prelaz toplove. U gornjem sloju toplo-ta s plinom prelazi vrlo brzo na sače, jer najviše topline prelazi zračenjem zbog visoke temperature plina. Za te uslove potrebna je, dakako, razmjerno velika masa sača, a nisu u saču potrebni kanali velikog presjeka. Potrebne su, dakle, opeke s debelim stijenkama. U donjim je slojevima prelaz toplove mnogo

sporiji, jer se pretežno odvija konvekcijom, pa je potreban manji presjek kanala u saču, masa sača može biti razmjerno manja. Tada su opeke s mnogo kanala i s razmjerno tankim stijenkama.

Opeke za kaupere obično su od šamotnih materijala (sa 42...44%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u kupoli, 40...42%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u gornjem, a 30...39%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  u donjim slojevima sača).

Saće kaupera s vanjskom komorom za sagorijevanje obično se sastoji od pet slojeva. Opeke, kojima su ispunjeni, moraju biti od kvalitetnijeg materijala. U kupoli su obično opeke u kojima je do 72%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , u gornjem sloju sača obično od silikatnog materijala, a u slijedeća dva od visokokvalitetnog vatrostalnog materijala s više od 50%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .



**Postrojenja za snabdijevanje vodom.** Visoka je peć najveći korisnik vode u željezari. Protok vode za njeno hlađenje iznosi 0,9...3,3 m<sup>3</sup>/h po m<sup>3</sup> njene zapremine, što je obično 18...25% od ukupno potrebne vode. U rashladnom sistemu gubi se isparavanjem ~0,1%. Ostatak se može ponovno upotrijebiti, nakon što se ohladi, pri čemu se gubi daljih 0,3...0,4%. Za osiguranje neprekidnog snabdijevanja vodom potreban je dvojni sistem pumpnih stanica.

Voda se hlađi u rashladnim tornjevima, pored kojih su taložni bazeni s pumpama za filtraciju mulja nastalog od prašine iz plina visoke peći. Ako dođe do kvara, rezerva vode nalazi se u visoko podignutom rezervoaru.

**Elektroenergetska postrojenja visoke peći.** Pogon visoke peći ima 90 potrošnih mjesto električne energije. Za visoku peć zapremine 1000 m<sup>3</sup> ukupna je instalirana snaga tih potrošača do 4 MW. Potrošači su priključeni na 220/380V i 6000V. Da bi se proizvela 1t gvožđa, potrebno je 5,5...8,5 kWh.

Transformatorske stанице s rasklopnim uređajima smještene su neposredno uz visoku peć.

**Postrojenja za preradu plina visoke peći.** Plin visoke peći vrlo je važan sporedni produkt proizvodnje gvožđa jer se može upotrijebiti kao energetsko gorivo. Njime se može pokriti 25...35% od ukupnih energetskih potreba željezare. Radi zaštite okoline plin visoke peći ne smije sadržavati više od 10 mg prašine u m<sup>3</sup>. Osim toga, za mnoga trošila ogrjevna je moć plina visoke peći preniska, pa se plin mora obogatiti koksnim ili zemnim plinom.

Osim za predgrijavanje zraka, plin visoke peći troši se u koksnim baterijama ako takve postoje u blizini željezare, a nakon obogaćenja (do ogrjevne moći od 4000 kcal m<sup>-3</sup>) u Siemens-Martinovim pećima, zagrijevnim pećima valjaonice, za potpalu mješavine u aglomeraciji za proizvodnju pare itd.

Plin visoke peći čisti se (v. Čišćenje plinova, TE 3, str. 115) najprije grubo u hvatačima prašine i ciklonima. Time se

sadržaj prašine sniže na  $3\text{--}12 \text{ gm}^{-3}$ . Zatim slijedi polufino čišćenje skraberima, gdje se sadržaj prašine sniže na  $0,6\text{--}1,8 \text{ gm}^{-3}$ . Na kraju se plin visoke peći čisti dezintegratorima, elektrofiltrima ili filtrima s tkaninama. Njaviše se upotrebljavaju elektrofiltri (ponekad povezani sa skraberima). Nova filterska sredstva od sintetskih tkanina omogućavaju čišćenje vrućih plinova (do  $600^\circ\text{C}$ ). Takvim se postupkom sadržaj prašine može sniziti i na manje od  $1 \text{ mgm}^{-3}$ .

Za obogaćivanje plina visoke peći zemnim plinom potrebne su posebne stanice. Za dovođenje plina visoke peći udaljenim trošilima potrebno je povećati pritisak plina, već prema dužini plinovoda, posebnim kompresorskim stanicama.

**Transportna sredstva za gvožđe i trosku.** Rastaljeno se gvožđe iz peći uliva u kazanska željeznička kola i transportira na dalju preradu: livenje ili direktno u čeličanu, odnosno u livnicu za preradu. Ako se troska dalje preradi samo granulacijom, ona se obično poliva jakim mlazom vode odmah po izlasku iz peći. Inače se također uliva u kazanska željeznička kola i odvozi na preradu.

Obična kazanska željeznička kola za gvožđe imaju nosivost od  $40\text{--}140 \text{ t}$ . Tzv. torpedo-mikser (vagon s velikim cilindričnim kazanom) ima nosivost do  $400 \text{ t}$ . Kazani na tim vozilima izrađeni su od međusobno zavarenih ili zakovanih čeličnih limova, a iznutra su ozidani šamotom. Ozid kazana za gvožđe potrebno je povremeno obnavljati. Ti se radovi izvode u posebnom odjeljenju željezare snabdjevenom kranovima veće nosivosti. Kazan za trosku od livenog su čelika sa zidovima debljine  $60\text{--}100 \text{ mm}$ . Zapremina im je  $8\text{--}16,5 \text{ m}^3$ .

Gvožđe se iz kazana izliva pomoću kranova, a iz miksera njegovim nagibanjem. U čeličani se gvožđe iz miskera istresa u razlivne kazane. Troska se iz kazana također izliva nagibanjem. Za nagibanje kazana na kolima su ugrađeni potrebni uređaji.

**Postrojenja za livenje gvožđa** (v. Lijevanje) u biti su livni strojevi. To su lančasti konvejeri na kojima su učvršćene koke. Težina je odlivka u kokilama obično  $30\text{--}50 \text{ kg}$ . Najčešće je kapacitet livnog stroja  $1\text{--}1,8 \text{ kt}$  gvožđa na dan. Skladište gotovog gvožđa obično je u neposrednoj blizini livnog stroja.

**Uređaji za mjerjenja, kontrolu i regulaciju.** Još do pred dvadesetak godina procesom visoke peći upravljalo se ručno pomoću malobrojnih mjernih uređaja za nadzor pogona. Međutim, s povećanjem kapaciteta visokih peći postalo je suviše rizikantno voditi njihov pogon izvan optimalnog režima, pa se sve više upotrebljava daljinsko mjerjenje i automatsko upravljanje procesnim računalima (sl. 34).

Temeljni je problem razvoja sistema za takvo upravljanje procesom visoke peći dobivanje postavnih vrijednosti za regulacione krugove iz mnoštva informacija o procesu. Zbog toga su razvijeni različiti matematički modeli kojima se određuju algoritmi za dobivanje tih vrijednosti.

Čitav dojavni i upravljački dio tog sistema smješten je u posebnoj kabini na radnoj platformi visoke peći. Pored

čitača dojavni sistem ima brojne registratore za naknadnu kontrolu i analizu mjerjenja.

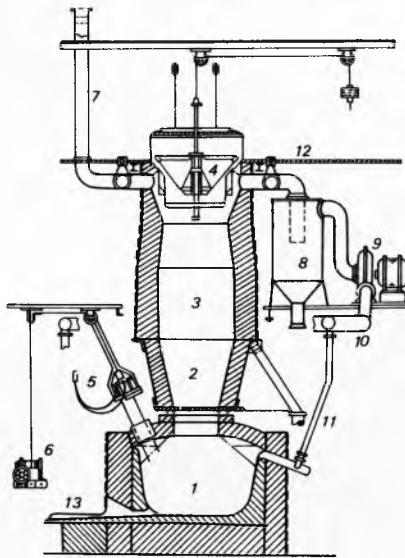
D. Rejc

### ELEKTRIČNE PEĆI ZA PROIZVODNJU GVOŽĐA

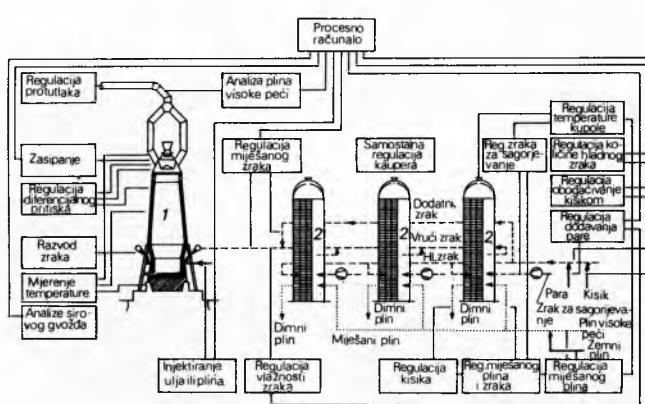
Procesi proizvodnje gvožđa u električnim pećima (elektroreduktioni procesi) razlikuju se od procesa u visokoj peći, jer je u električnim pećima električni luk izvor toplote umjesto energije oslobođene sagorijevanjem koksa (v. Elektrokemijska, TE 5, str. 182). Poticaj za razvoj elektroreduktionih procesa bio je nedostatak nalazišta uglja prikladnog za proizvodnju metalurškog koksa.

Prvi pokušaji proizvodnje gvožđa elektroredupcionim procesom izvedeni su u pećima sličnim visokim pećima, bez duvnica i s ugradenim elektrodama (električnim visokim pećima). Jedna od prvih takvih peći izgrađena je u Italiji (1898). Za redukciju se upotrebljavala smjesa drvnog uglja i koksa. Udio koksa nije smio biti veći od  $30\%$ , jer su se inače zbog smanjenog specifičnog volumena i električnog otpora zasipa pojavitivale potiske u pogonu (prerano sinterovanje, stvaranje naljepa, urušavanje i druge smetnje pri spuštanju zasipa). Međutim, glavni nedostatak tih peći bila je premala količina reducionog plina ( $\sim 1/6$  od količine po t gvožđa u visokoj peći) i zbog toga preslabo zagrijavanje zasipa u trupu, što je, dakako, slabilo ionako slabu indirektnu redukciju. Pored toga, stepen iskorištenja ugljik-monoksida ( $\text{CO}_2$ ) bio je vrlo nizak, pa je plin u ždrijelu sadržavao  $55\text{--}70\%$  ugljik-monoksida. Djelomično se taj posljednji nedostatak kompenzirao većom ogrevnjom motora ( $\sim 2400 \text{ kcal m}^{-3}$ ).

Kasnije se pokušavalo te nedostatke električnih visokih peći ukloniti recirkulacijom dijela plina kroz trup. Jedna od prvih električnih visokih peći s recirkulacijom plina bila je tzv. Grönwallova peć, izgrađena 1907. godine u Domnarfvetu u Švedskoj (sl. 35). Slične su peći podignute u Trollhättanu



Sl. 35. Grönwallova peć. 1 gnijezdo, 2 sedlo, 3 trup, 4 zaporni uređaji, 5 elektroda, 6 vilo za podizanje i spuštanje elektroda, 7 odvod plina, 8 ciklon, 9 duvaljka za recirkulaciju plina, 10 razvodnik plina, 11 dovod plina u gnijezdo, 12 zaspina platforma, 13 isput gvožđa



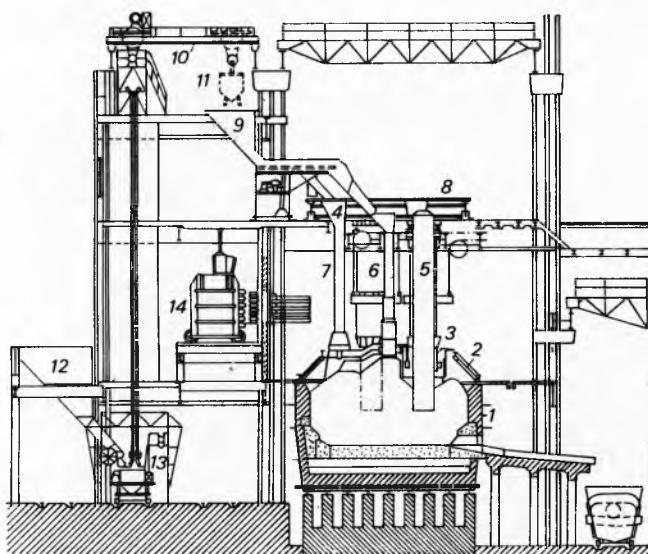
Sl. 34. Blok-sHEMA jednog od sistema uređaja za nadzor i upravljanje procesom visoke peći. 1 visoka peć, 2 kauperi

(1910), također u Švedskoj, i u Aosti (1925) u Italiji. Recirkulacijom plina donekle se povećava (za  $15\text{--}20\%$ ) udio indirektnе redukcije u električnim visokim pećima, ali su rezultati ostali i dalje nezadovoljavajući. Između ostalog, zbog hladnog hoda tih peći, slabiji je proces odsumporavanja i manji stepen redukcije oksida silicija, manji je sadržaj ugljika u gvožđu za  $3,2\text{--}3,8\%$ , a temperatura gvožđa na izlazu ( $1280\text{--}1350^\circ\text{C}$ ) niža nego u visokim pećima. Uvjereni se na slabu funkcionalnost trupa električnih peći, konstruktori su počeli proučavati mogućnost proizvodnje gvožđa elektroredukcijom u elektrolučnim pećima s niskim trupom. Tako su nastale tzv. niske elektroreduktione peći, uglavnom za direktnu redukciju ruda željeza. Jedna od prvih otvorenih elektrolučnih peći za proizvodnju gvožđa (tzv. procesom redukcije u plitkim ognjištima) bila je izgrađena u Francuskoj (1909). Novija takva peć s kupkom pokrivrenom tankim slojem zasipa izgrađena je u Torinu (Italija). Komercijalna primjena tih peći za proizvodnju gvožđa uslijedila je tek pred nešto više od dvije decenije.

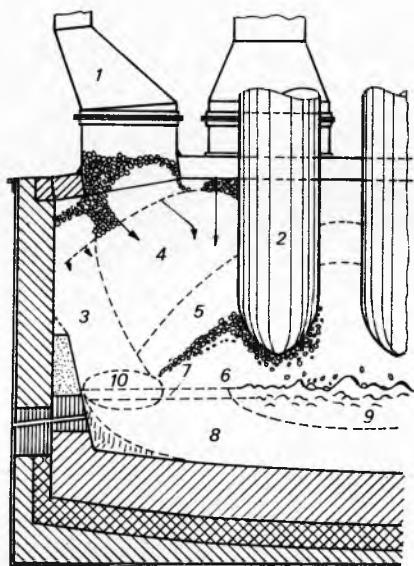
Osim toga, razvili su se i različiti procesi u kojima se, da bi se poboljšala, elektroredukcija kombinira s drugim postupcima redukcije ruda željeza. Jedan od takvih je tzv. strateški Udy-proces

**Niske elektroreduktione peći** za proizvodnju gvožđa (sl. 36) zatvorene su peći u kojima se, za razliku od mogućnosti u

visokim pećima, mogu prerađivati finozrne rude s koksom male čvrstoće. Proces se proizvodnje gvožđa u tim pećima odvija u nekoliko zona (sl. 37).



Sl. 36. Primjer postrojenja niske elektroredukcione peći. 1 zid, 2 vanjski prsten pokrova, 3 grlo elektrode, 4 usipni lijevak, 5 elektroda, 6 srednja usipna cijev, 7 periferna usipna cijev, 8 usipni karusel, 9 prihvatanje lijevaka za zasip, 10 kran zasipnog uređaja, 11 transportna košara za zasip, 12 bunker, 13 dizalo za transportne košare, 14 transformator



Sl. 37. Procesne zone niske elektroredukcione peći. 1 usipna cijev, 2 elektroda, 3 neaktivna zona, 4 gornja i 5 donja zona spuštanja zasipa prema elektrodama, 6 zona direktnе redukcije, 7 troska, 8 gvožđe, 9 zona snažnog gibanja slojeva, 10 zona reakcije između troske i metala

Niske elektroredukcione peći podižu se na temeljima od armiranog betona u koje su ugrađeni kanali za hlađenja dna peći zrakom. Peći su cilindričnog oblika i imaju po tri Söderbergove elektrode razmještene u uglove istostraničnog trokuta. Plašt im je od čeličnih zavarenih limova. Uz plašt je ozid od šamota. Središnji su dijelovi ozida od magnezita, a unutrašnji, koji su u dodiru sa zasipom, od ugljičnih masa za nabijanje. Ispust za gvožđe smješten im je na nivou dna, a ispust troske bočno, nešto više. Pokrovi su iznutra također ozidani vatrostalnim opekkama. Na njima su otvori za elektrode, hranjenje zasipom i promatranje.

Peć se hrani kroz usipne cijevi. Zone su uz zidove peći neaktivne, pa se u njima ne odvijaju nikakve reakcije. U gor-

njoj zoni spuštanja prema elektrodama zasip se predgrijeva, a u donjoj zoni odvijaju se procesi kalciniranja. Ispod toga je zona usijanog koksa u kojoj se odvijaju procesi direktnе redukcije. Time formirana troska i gvožđe teku prema dnu, gdje se odvajaju u slojevima. Ispod elektroda je zona snažnog gibanja tih slojeva. Na granici između sloja troske i gornjeg sloja gvožđa nalazi se zona reakcije između troske i metala. Ispod sloja gvožđa nalazi se zona poluvrstog zasipa.

Plin se iz niskih elektroredukcionih peći odvodi bočno, odmah ispod pokrova, pomoću ventilatora. S njime se dalje postupa slično kao s plinom visoke peći.

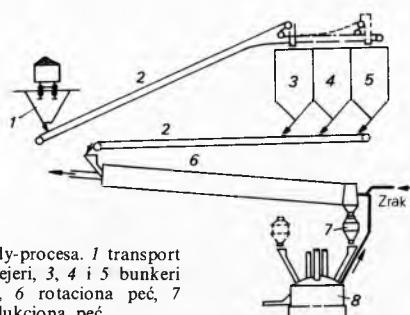
Niske elektroredukcione peći najprije su se pojavile u Norveškoj, jer tamo nije bilo sirovina za proizvodnju drvnog uglja, a bila je na raspolažanju razmjerno jeftina električna energija. Prva niska elektroredukciona peć, prema konstruktoru nazvana Tyslandovom, izgradena je između 1922. i 1925. godine (Fiskaa, južna Norveška). Imala je snagu od 600kW. Druga je peć izgradena u Oslu (1928). Pored poboljšane konstrukcije, zbog čega je prema konstruktoru koji je izveo poboljšanje nazvana Tysland-Holeovom, odnosno TH-peći, ona je bila i mnogo većeg kapaciteta (6MVA). Kasnije su se te peći počele upotrebljavati za proizvodnju gvožđa i u drugim zemljama gdje su prilike snabdijevanja koksom i električnom energijom bile slične prilikama u Norveškoj. Najveće savremene niske elektroredukcione peći također su u Norveškoj (tabl. 7). Imaju snagu od 60MVA. Među najveće peći te vrste na svetu ubrajaju se i peći u željezari u Skopiju. U toj se željezari zasip predgrijava i predredukuje u rotacionim pećima. Time se smanjuje potrošnja koksa i električne energije.

Proizvodni kapaciteti savremenih niskih elektroredukcionih peći dosižu do 500t gvožđa na dan. Predviđa se da će se u budućnosti graditi takve peći s kapacitetima do 1000t gvožđa na dan. Međutim, u usporedbi s proizvodnim kapacitetima visokih peći (5–10kt/dan) to su mali kapaciteti. Drugi je veliki nedostatak niskih elektroredukcionih peći velika potrošnja električne energije (2–2,5MWh po t proizvedenog gvožđa pri radu s hladnim, odnosno ~50% od toga pri radu s predgrijanim i predredukovanim zasipom), pa su za njihov pogon potrebna velika elektroenergetska postrojenja. Zbog toga su troškovi proizvodnje u tim pećima najviše zavisni od cijena električne energije. Pored toga, oni znatno zavise i od cijena koksa. Investicije postrojenja elektroredukcionih peći, bez investicija za elektroenergetska postrojenja, koksare i rudnike uglja približno su jednake investicijama za postrojenja visokih peći.

Usprkos tim nedostacima proizvodnja gvožđa u niskim elektroredukcionim pećima ima dosta uslova za razvoj u zemljama bez rezerva uglja pogodnog za proizvodnju metalurškog koksa ali s jeftinim izvorima električne energije. Tako je u Jugoslaviji moguća proizvodnja gvožđa u tim pećima pomoću koksa od domaćeg lignita (područje Kreka—Tuzla). Industrijska ispitivanja obavljena u željezarama u Storama i Ilijasu pokazala su da se u niskim elektroredukcionim pećima postižu bolji rezultati s tim koksom, zbog njegova većeg električnog otpora, nego s metalurškim koksom. Ta mogućnost još nije iskorištena, jer još nisu izgrađena postrojenja potrebna za proizvodnju lignitnog koksa.

Ispitivanja mogućnosti razvoja proizvodnje gvožđa elektroredukcijom obuhvataju i kombinacije s drugim procesima pripreme zasipa, posebno postupcima predredukcije ugljem. U Norveškoj, Kanadi i SAD podignuta su takva eksperimentalna postrojenja.

**Strateški Udy-proces** (sl. 38) također je kombinirani proces predgrijavanja i predredukcije s elektroredukcijom. Pri tom se predgrijavanje i predredukcija izvode u rotacionim pećima, a elektroredukcija procesom u plitkom ognjištu. Time je omogu-



Sl. 38. Shema strateškog Udy-procesa. 1 transport iz pripreme zasipa, 2 konvejeri, 3, 4 i 5 bunkeri za ruder, krčnjak i ugajalj, 6 rotaciona peć, 7 vaga, 8 elektroredukciona peć

ćena upotreba jeftinjih reducenata (ugljena) i potrošnja električne energije znatno manja (također ~50% od potrošnje pri radu s hladnim zasipom). Pored jednog postrojenja s takvim procesom u Kanadi, gdje je on i nastao, jedno je postojeće postrojenje s elektroredukcijom peći u Matanzasu (Venezuela) rekonstruirano za uvođenje Udy-procesa.

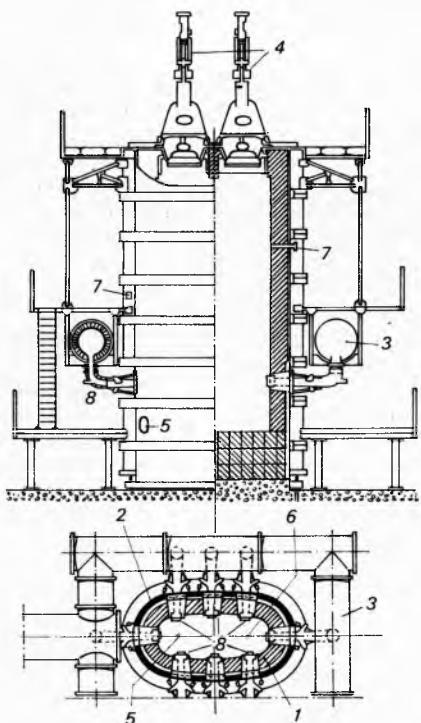
M. Vranešić

### OSTALI PROCESI PROIZVODNJE GVOŽĐA

Ostali procesi proizvodnje manje su važni za industriju. Među njima najveće značenje imaju procesi proizvodnje gvožđa u niskim pećima, kombinacije proizvodnje željeznog koksa i proizvodnje željeza, te procesi u rotacionim pećima.

Niske peći omogućavaju proizvodnju gvožđa iz sirovina koje se ne mogu preraditi ili koje se ne mogu izravno preraditi u visokim pećima. Po tome su slične elektroredukcionim pećima. Međutim, procesi u niskim pećima slični su procesima visoke peći, jer se toploća dobiva sagorijevanjem goriva.

Razvoj niskih peći potaknut je u prvom redu potrebom prerade finozernih ruda toliko siromašnih željezom da je njihova priprema za preradu u visokoj peći neekonomična. U niskim pećima upotrebljava se gorivo slabijeg kvaliteta, posebno s obzirom na zrnovitost, čvrstoću i ogrjevnu moć. Za preradu takvih sirovina procesom sličnim procesu visoke peći ne mogu se graditi peći velikog kapaciteta, pa su niske peći u usporedbi s visokim vrlo male. Presjek im može biti kružan (sl. 39), ili



Sl. 39. Niska peć firme S. A. Ongrée Marihaye.  
1 ozid (opeka sa 40%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 2 plasti, 3 razvod  
zraka, 4 zasipni toranj, 5 položaj ispusta za  
gvožđe, 6 položaj ispusta za trosku, 7 priključci  
za uzimanje uzoraka, 8 duvnice

četvrtast. Visina im je iznad duvnica različita, već prema specifičnostima procesa. Naime, da bi se pri sagorijevanju slabijih goriva postigle temperature za odvijanje reakcija, zrak se za pogon niske peći vrlo često obogaćuje, a ponekad i potpuno zamjenjuje kisikom. Zbog toga se količina, sastav i temperatura reakcionog plina, njegova brzina, opseg indirektnе redukcije i potrebna visina zasipa iznad duvnica znatno razlikuju. Npr., u pogonu s kisikom visina niskih peći iznosi samo 1,5–2m, sa zrakom obogaćenim kisikom 3–5m, a sa vrućim zrakom 5–8m.

Prva, pokusna niska peć podignuta je 1944. godine u Trosbergu (Njemačka). Poslije rata gradnja se niskih peći nastavila, naročito u Njemačkoj DR

(Unterwellenborn i Calbe na Saali), Belgiji (S. A. Ongrée-Marihaye), Švajcarskoj (Geraffingen) i Indiji (Barbil, Jamshedpur). Za sada, dok još ima komadastih i sitnozernih ruda željeza koje se mogu ekonomično pripremiti za preradu u visokoj peći i uglju za proizvodnju metalurškog koksa, niske peći još ne mogu konkuriратi visokima, jer visoke peći imaju mnogo veće kapacitete, sigurniji pogon i znatno su ekonomičnije (barem tamo gdje za to postoje potrebni uslovi).

Tokom razvoja nastala su dva glavna postupka proizvodnje gvožđa niskim pećima: postupak sa sitnozernim koksom male čvrstoće i postupak s ugljem koji se ne može koksovati (npr. mrkim ugljem) ili polukoksom.

**Postupak sa sitnozernim koksom male čvrstoće.** Kratki put zasipa kroz peć kojim se kompenzuje učinak male čvrstoće koksa zahtjeva da se procesi redukcije i formiranja gvožđa i troske odvijaju znatno brže nego u visokoj peći. Osim povećavanjem temperature plinova sagorijevanja dovođenjem u peć zraka obogaćenog kisikom ili kisika samog, procesi se ubrzavaju i povećanjem kontaktne površine reaktanata (usitnjavanjem zasipa) i što prisnijim dodirom reaktanata (dobrim miješanjem zasipa). Kad se u niske peći dovodi zrak obogaćen kisikom ili kisik sam, sagorijevanje je brže i manja je zona sagorijevanja koksa, viša je temperatura u grijezdu, stvara se manja količina plina i povećava se njegova reduktivna moć, a na izlazu iz peći plin ima veći sadržaj ugljik-dioksida nego u procesu visoke peći. Zbog visoke temperature grijezda tim se postupkom mogu proizvoditi i ferolegure.

Ipak, prekratak je put kroz zasip da bi se većom reduktivnom moći i višom temperaturom plina mogao postići onaj stepen indirektnе redukcije koji se ostvaruje u visokoj peći, pa se gvožđe ponajviše formira direktnom redukcijom. Međutim, veći udio direktnе redukcije u tom postupku nije tako veliki nedostatak kao što je to u visokoj peći, jer se on uglavnom kompenzuje nižom cijenom goriva.

Postupak s ugljem koji se ne može koksovati zahtjeva pripremu zasipa finim mljevenjem goriva, rude i taljiva, miješanjem njihove smjese s vezivom i briquetiranjem. Za vezivo se upotrebljava katran 3–6% od mase smjese. Briketi se nakon toga šveluju (v. *Ugljen*) (do temperature 700–800°C) predredukuju pa redukuju uz taljenje gvožđa i troske. Isprva se švelovanje i taljenje gvožđa izvodilo u odvojenim aparatu. Kasnije su se (Demag-Humboldt-Niederschachtofen GmbH, DHN, 1952) obje te operacije počele izvoditi u jednom aparu. To je niska peć s ovalnim presjekom s osima 1 i 1,3m, volumen 5,1m<sup>3</sup>, s četiri duvnice (prečnik 90mm) i ždrjelom s dva zvona, za pogon s vrućim zrakom. Ukupno je trajanje spuštanja zasipa 2,5–3h. Pri tom se za razmjerno kratko vrijeme briketi predgrijaju na temperaturu 300–400°C, pa se 25–30min šveljuju (između 400–800°C) i zatim na višim temperaturama počinju procesi redukcije i taljenja kojima se formira gvožđe i troska. Za vrijeme predgrijavanja briketi ne smiju ni ispucati, ni omekšati, a za vrijeme švelovanja mora se u njima stvoriti koksni skelet koji može izdržati težinu sloja zasipa nad njima. To se može postići sa skoro svakim ugljem. U uglju može biti 5–23% gorivih sastojaka i 4–35% hlapljivih tvari. Katran koji se izluči iz plina može se ponovno upotrebiti za briquetiranje. Ogrjevana je moć plina 1400–1450 kcal m<sup>-3</sup>. Troska ima sastav sličan sastavu troske visoke peći i upotrebljiva je za jednake svrhe.

**Kombinacije proizvodnje željeznog koksa i željeza.** Željezni koks je proizvod koji se dobiva koksovanjem različitih smjesa uglja i sitnozernih ruda željeza. Pri tom se, dakako, znatno redukuju rude željeza. Najlakše se željezni koks proizvodi ugljem koji se dobro koksuje (tzv. masni ugalj), ali to je moguće i smjesom uglja koji se ne koksuje i bitumena s visokim temperaturama taljenja. U novije se vrijeme nastoji proizvesti željezni koks jeftinijim visokobitumenoznim (tzv. plinskim) ugljem od kojeg se inače dobiva koks lošijeg kvaliteta. Koksovanjem takva uglja s rudama željeza dobiva se bolji koks. Poteškoće se pojavljuju zbog katalitičkog djelovanja viših oksida željeza što pobuduje razaranje vezivnih komponenata koka. Postojanje samo 5% tih oksida u smjesi onemogućava koksovanje uglja. Ipak, koksovanjem visokobitumenoznih ugljeva s magnetitnim i drugim sirovinama može se dobiti željezni koks zadovoljavaju-

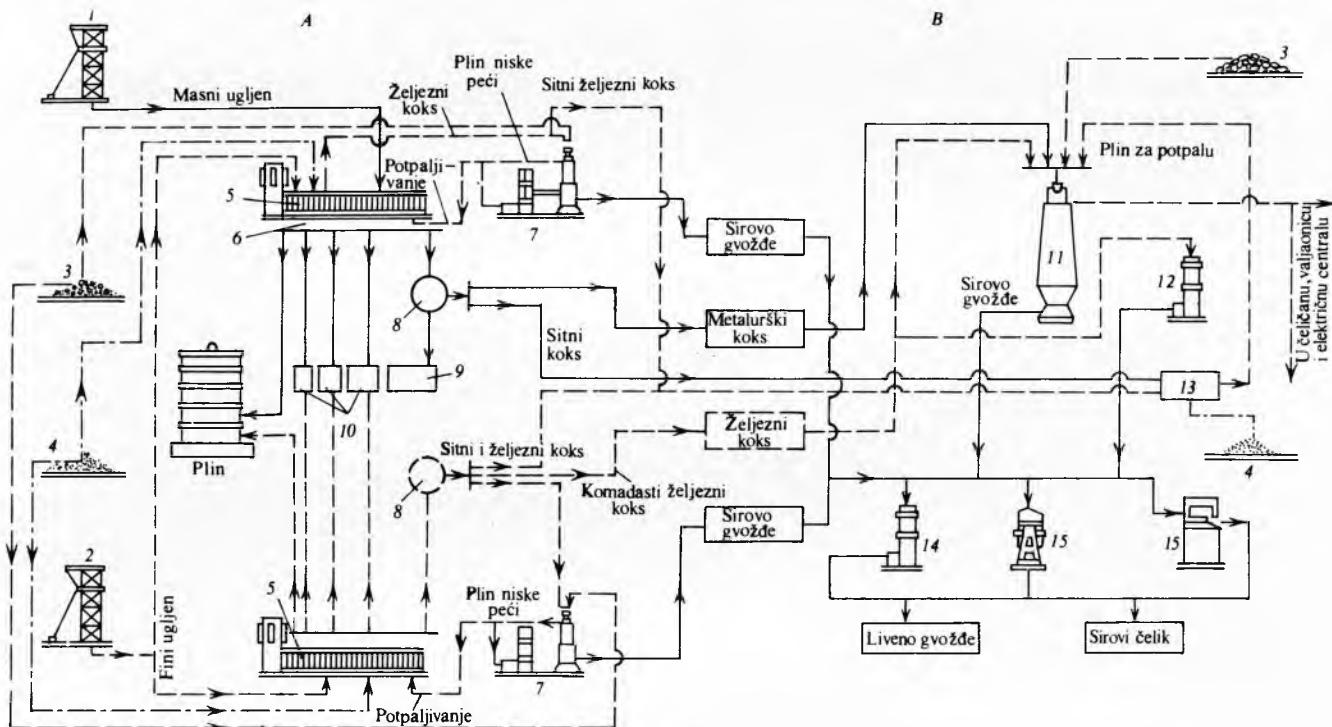
juće čvrstoće koji sadrži do 35% željeza, vezanog u različitim spojevima s nižim stepenom oksidacije.

Isprva se željezni koks proizvodio samo od prašine iz plina visoke peći, jer su se time mogli izbjeći skupi procesi njenog aglomeriranja. Međutim, proizvodnjom se željeznog koksa u koksarama povezanom s proizvodnjom gvožđa u niskim i visokim pećima (sl. 40) može znatno poboljšati zbirna ekonomičnost dobivanja rude, koka, gvožđa i čelika. Pri tom se u jednom (većem) dijelu koksare proizvodi željezni koks od sitnozrne rude željeza i plinskog uglja, u drugom (manjem) normalni metalurški koks. Oba se proizvoda klasiraju. Krupni se željezni koks dalje prerađuje u niskim i visokim pećima. Zajedno s krupnim željeznim koksom u niskim se pećima prerađuje i krupnozrna ruda željeza. Osim krupnozrnim željeznim i potrebnim, normalnim metalurškim koksom visoke se peći zasipavaju još i proizvodima aglomeriranja sitnozrnih ruda željeza i sitnozrnog željeznog i normalnog metalurškog koka. Plinovi niskih i visokih peći upotrebljavaju se i za potpalu koksnih peći.

kraja peći. Produkt izlazi na donjem kraju, pa u peći čvrsti materijal i plin struje jedan nasuprot drugome. Zasip je sličnog sastava kao i u ostalim procesima proizvodnje gvožđa, osim što je reducent u njemu obično ispljenjeni (degazirani) ugalj.

Dakako, na dijelu puta zasipa kroz peć ( $\sim 1/3$  dužine peći) ne odvijaju se procesi redukcije, jer zasip još nije dovoljno ugrijan. Na tom putu zasip se predgrijava izmjenom toplotne s plinovima sagorijevanja.

Sagorijeva uglavnom ugljik-monoksid, koji nastaje Boudouardovom reakcijom u zasipu u plamenom prostoru peći. Naime, gorivo udruženo u peći s vrućim zrakom skoro potpuno sagorijeva, ali nastali ugljik-dioksid odmah reaguje s ugljikom u zasipu. Dio tako nastalog ugljik-monoksida odmah reaguje s oksidima rude oksidirajući se u ugljik-dioksid, pa se reakcioni ciklus ponavlja. Budući da se u svakom takvom ciklusu udvostručuju molovi plina za svaku formulsku konverziju, u reakcionej zoni peći struji plin iz zasipa u plinsku fazu. Obično je reaktivitet uglja u zasipu visok, pa se Boudouardova reakcija odvija vrlo



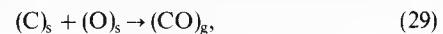
Sl. 40. Shema proizvodnje gvožđa i čelika pomoću željeznog koksa. A koksara, B željezara; 1 i 2 skladište masnog i plinskog uglja, 3 i 4 skladište komadaste i finozrne rude, 5 komore za željezni koks, 6 komore za normalni koks, 7 niske peći za preradu željeznog koksa, 8 uređaj za prosijavanje koksa, 9 skladište lomljene koks, 10 skladište sporednih proizvoda, 11 visoka peć, 12 kupolna peć, 13 postrojenje za aglomeriranje, 14 livenica, 15 čeličana

Proizvodnja gvožđa pomoću željeznog koksa može biti ekonomski opravdana, u usporedbi s drugim procesima, zbog veće proizvodnje koksognog plina (uslijed djelomične zamjene masnog uglja plinskim u koksnim pećima), manjeg opsega skupog aglomeriranja sirovina, manje potrošnje goriva za taljenje gvožđa (uslijed velikog stepena predredukcije ruda željeza tokom proizvodnje željeznog koksa) i manjih troškova za ugalj (uslijed razlike cijena masnih i plinskih ugljeva).

**Proizvodnja gvožđa u rotacionim pećima.** Prvi su postupci proizvodnje gvožđa u rotacionim pećima također obuhvatili taljenje. To je nužno zahtijevalo šaržni pogon. Razvoj kontinualnih postupaka proizvodnje tzv. spužvastog gvožđa u rotacionim pećima omogućen je procesom na temperaturi nižoj od tališta metalne faze sistema. Upotreba jeftinijih reducenata glavna je prednost tih postupaka u usporedbi s postupcima proizvodnje gvožđa u jamnim pećima.

Unutar rotacionih peći proces obično teče protustrujno. Peć je koso postavljena, a hrani se zasipom s gornjeg i smjesom fluidnih ili fluidiziranih čvrstih goriva i vrućeg zraka s donjeg

brzo, te se može pretpostaviti da iz zasipa struji čisti ugljik-monoksid. Takva se redukcija može prikazati sumarnim procesom

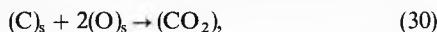


gdje indeksi s označavaju čvrste faze u zasipu, a g označava plinsku fazu, iako nije direktna (odvija se posredstvom plinske faze).

Toplotna potrebna za taj vrlo endotermni proces dobiva se sagorijevanjem ugljik-monoksida koji dospijeva u plinsku fazu sistema, a potrebni vrući zrak dovodi se u peći sapnicama smještenim na plaštu peći. Zbog toga je transport toplotne iz prostora sagorijevanja u zasip dominantan faktor redupcionog učinka peći. Da se osigura potrebiti prelaz toplotne, potrebna je velika površina čestica i mala debljina sloja zasipa. Da se sprijeći reoksidacija željeza oksidacionom atmosferom peći, nužni su upravo suprotni uslovi.

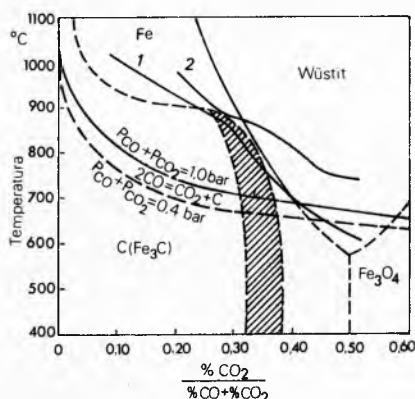
Može se pokazati da su, u sumarnom procesu (29), jednake brzine redukcije rude  $v_1$  i rasplinjavanja  $v_2$  uglja (Boudouardove reakcije). Međutim, kad je  $v_1/v_2 > 1$ , redukcija se ne odvija samo

sumarnim procesom (29), već nastupa i sumarni proces

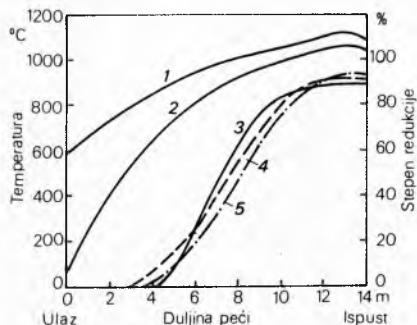


koji poremećuje opisani mehanizam procesa u peći. Zbog toga je za vođenje procesa proizvodnje sružastog gvožđa u rotacionoj peći važan izbor goriva prikladnih svojstava i uslova od kojih zavisi sastav plinske faze, u prvom redu temperaturnog režima procesa (sl. 41).

Tako se npr. na temperaturi od  $1000^{\circ}\text{C}$  redukcija odvija skoro jedino prema (29) kad je reducent švelni koks mrkog uglja. Udio je procesa (30) u konverziji znatno veći kad se za redukciju upotrebi sitnozrni metalurški koks.



Sl. 41. Primjer sastava plina u zasipu rotacione peći za proizvodnju sružastog gvožđa u zavisnosti wüstit – željezo. 1 redukcija švelnim koksom mrkog uglja, 2 redukcija sitnim koksom

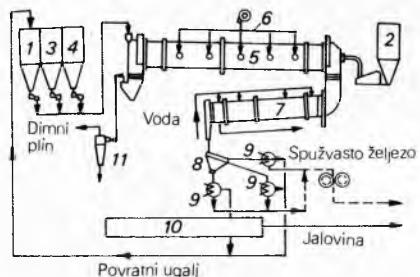


Sl. 42. Primjer toka redukcije i temperaturni režim u rotacionoj peći za proizvodnju sružastog gvožđa. 1 i 2 temperatura plina, odnosno zasipa, 3, 4 i 5 stepen redukcije rude iz Venezuela, Itabire, odnosno Bomi-Hilla

U praksi, kad se proizvodi sružasto gvožđe, mogući se stepen redukcije ruda željeza u rotacionim pećima (sl. 42) dostiže na temperaturi od  $\sim 1050^{\circ}\text{C}$ . U zoni predgrijavanja (do  $\sim 800^{\circ}\text{C}$ ) stepen je redukcije samo  $\sim 20\%$ . Najveći dio redukcije, iza zone predgrijavanja, odvija se u zoni dugoj  $\sim 60\%$  od ukupne dužine peći.

Postupak SL/RN (razvijen saradnjom Steelco-Lurgi, Republic-Steel i National-Lead) jedan je od najnovijih postupaka

proizvodnje sružastog gvožđa rotacionim pećima. Peć se na gornjem kraju (sl. 43) hrani ispljenjenim ugljem, peletiziranim rudom i sredstvima za odsumporavanje (krečnjakom, dolomitom). Plin bogat ugljik-monoksidom koji se razvija iz zasipa redukcijom spaljuje se vrućim zrakom koji se dovodi kroz sapnice na plaštu peći. Pri rotaciji peći dovod se zraka prekida za vrijeme dok su sapnice prekrivene slojem zasipa. Kad se potrebna toplota u peći ne može osigurati tim sagorijevanjem, u ispusni se kraj peći injektira neko fluidno gorivo. U taj se kraj peći injektira i svježi ugalj pomoću posebnog pneumatskog uređaja. Kad bi se, naime, peć hrana sviđajušim ugljem s gornjeg kraja, ispljavljivanje bi nastupilo već u blizini izlaza plina, pa njezini sastojci nastali ispljavljivanjem ne bi bili dovoljno iskorisceni. Ispljenjeni ugalj, sružasto gvožđe i sredstvo za odsumporavanje (jalovina) zajedno izlaze iz peći, pa se hlađe u rotacionom hladnjaku. Iz ohlađenog se materijala izdvaja sružasto gvožđe prosijavanjem i magnetskom separacijom. Ispljenjeni se ugalj odvaja od jalovine posebnim uređajem i prihvata u bunker iz kojeg se uzima za pripremu zasipa.



Sl. 43. Shema procesa SL/RN. 1, 2, 3 i 4 bunkeri za povratni i svježi ugalj, rudu, sredstva za odsumporavanje, 5 rotaciona peć, 6 dovod zraka za sagorijevanje, 7 rotacioni hladnjak, 8 sito, 9 magnetski separatori, 10 uređaj za razdvajanje ugalja i jalovine, 11 ciklon

Specifičnosti proizvodnje gvožđa u rotacionim pećima nekada se mogu vrlo dobro iskoristiti: npr. za proizvodnju gvožđa iz ilmenita bogatih titanom, za preradu prašine iz visokih peći. Tada se u rotacionim pećima redukcija odvija samo do određenog stepena (npr. za preradu ilmenita do 60...70%), za preradu prašine iz plina visoke peći do metalizacije do  $\sim 75\%$ ), a produkt se dalje preradi (elektroreducijom ili u visokoj peći). Iz plina rotacionih peći može se izdvajati prašina koja je, u stvari, koncentrat drugih metala (npr. cinka, olova).

#### F. Gostiša

LIT.: B. A. Кылибин, Подготовка руд к плавке. Металлургиздат, Москва 1952. — В. Божић, Металургија гвоžђа. ВЈГЗ, Београд 1960. — И. П. Баринин, Доменное производство, справочник. Металлургиздат, Москва 1963. — The making, shaping and treating of steel. United States Steel, Pittsburgh 1963. — В. П. Щербаков, Доменное производство. Металлургиздат, Москва 1964. — Z. Радошевић, Razvitak proizvodnje жељеза у наšim krajevima. Metalurški institut »Hasan Brkić«, Zenica 1966. — L. von Bogdandy, H. J. Engell, Die Reduktion der Eisenerze. Springer, Berlin 1967. — Đ. Лесић, Припрема минералних сировина. Београд 1968. — V. Mikolj, Povijest жељеза и жељeznog obrta u Bosni. Metalurški institut »Hasan Brkić«, Zenica 1969. — Blast furnace theory and practice. J. A. Strassberger, New York 1969. — C. Bodsworth, Physical chemistry of iron and steel manufacture. Longmans, London 1972. — R. Durrer, Verhütten von Eisenerzen. Verlag Stahleisen, Düsseldorf 1972. — B. B. Поплавец, Доменное производство. Металлургиздат, Москва 1972. — Gmelin-Dürer, Metallurgie des Eisens. Verlag Chemie GmbH, Weinheim 1972.

A. Čavić F. Gostiša B. Koželj  
D. Rejc M. Vranešić