

U

UGLJEN, najvažnija i najraširenija goriva sedimentna stijena organskog podrijetla, jedan od glavnih energenata današnjice i industrijska sirovina za različite proizvode. Zajedno s naftom i ostalim prirodnim bitumenima (v. *Bitumen*, TE 2, str. 40) svrstava se u skupinu *fosilnih goriva* ili *kaustobiolita*.

Iz reda ugljena u fosilna se goriva ubrajaju njegove glavne vrste, smeđi i kameni ugljen. Njima se pridružuje i treset kao fosilna nakupina raspadnutih biljnih ostataka te specifične vrste, npr. bituminozni ugljen i bituminozni ugljeviti škrljanci (udio mineralnih sastojaka > 40%), kao prijelazni oblici između ugljena i nafte.

Najpoznatiji fosilni ugljen smeđe je ili crne boje, zagasita ili svijetla sjaja te mekane do kamenotvrde građe, a uz gorivu organsku tvar sadrži i veći ili manji udio negorivih mineralnih sastojaka. Različite je geološke starosti, većinom pretkvartarne.

Od prirodnog se ugljena razlikuje *drveni ugljen*, koji se dobiva suhom destilacijom drveta bez pristupa zraka (v. *Drvo, kemijska preradba*, TE 3, str. 446), te *aktivni ugljen*, koji i nije ugljen, nego finoporozni ugljik (v. *Ugljik*).

Fosilni je ugljen poznat od davnih vremena. U starim je zapisima zabilježeno da je ← 833. godine ugljen zapažen u blizini Sheffielda u Engleskoj. U Yorkshiru su već u predrimsko doba izrađivali crne ukrasne predmete i nakit od specifičnih vrsta bituminoznog ugljena.

Teofrast, učenik Aristotelov, u ← III. st. spominje kako kovači i talioničari upotrebljavaju ugljen u grčkoj pokrajini Elis.

Marco Polo bilježi 1280. da Kinezi kopaju crno kamenje i njime lože vatru. Prema njegovim navodima, sposobnost gorenja ugljena bila je u Kini poznata već 1000 godina prije Krista.

Najstariji ugljenokopi u europskim zemljama otvoreni su vjerojatno u XII. i XIII. stoljeću. Kao prvi spominje se 1113. rudnik Kerkrade (Kirchrath) na njemačko-nizozemskoj granici, u aachenskom ugljenonosnom bazenu. Postoje zapisi i drugi sigurni znakovi da su ondje ugljen vadili podzemnim radovima.

U Sheffieldu u Engleskoj počeli su otkopavati, inače mnogo prije poznat kameni ugljen, tek oko 1183. godine. Rudnik kod Newcastlea otvoren je krajem 1240. a rudnici u Walesu i Škotskoj 1291. godine. Nešto se ugljena tamo skupljalo i na obalama mora, kamo su ga izbacivali valovi.

Ljudi su u početku smatrali da ugljen pri kuhanju i pečenju uzrokuje loš miris i kvari okus hrane. U Engleskoj je za vladavine Eduarda II. (1307–1327) izdana proklamacija protiv upotrebe kamenog ugljena. U brojnim se pritužbama navodilo da njegovim izgaranjem nastaju plinovi koji su uzrokom priljepčivim bolestima i drugim štetnim posljedicama za ljude, životinje i biljke. Slično je postupila i uprava grada Zwickaua. U jednom njezinu oglasu iz 1348. upozoravalo se metalurške radnike, koji su imali svoje radionice ispod gradskih zidina, da ne upotrebljavaju kameni ugljen kao gorivo jer plinovi okužuju zrak.

Fosilni se ugljen ipak sve više upotrebljavao, jer je drvo, tadašnje jedino ogrjevno sredstvo, postajalo sve skuplje i rjeđe. Međutim, sve do pronalaska i primjene parnog stroja ugljen se u ljevarstvu, kovačnicama i kao ogrjev u kućanstvu trošio u razmjerno malenim količinama. Šira upotreba ugljena u industriji počinje na prijelazu u XIX. stoljeće, kada se počeo upotrebljavati i za proizvodnju koksa i time potisnuo drveni ugljen kao redukcijsko sredstvo pri dobivanju željeza.

Ugljen koji se vadi izravno iz rudnika naziva se *rovnim ugljenom*. Cjelokupna rudarska problematika u vezi s ugljenom, tj. istražni radovi, otvaranje rudnika, otkopavanje, strojevi, transport i oplemenjivanje, nije predmet ovog članka i opisana je na drugom mjestu (v. *Oplemenjivanje mineralnih sirovina*, TE 9, str. 613; v. *Rudarstvo*, TE 11, str. 588, 593, 607, 614, 652, 661, 686 i 696).

Kad se rovní ugljen pročisti od jalovine, razvrstava se prema veličini, pa se na tržištu pojavljuje kao *klasirani ugljen*, i to komadni, kockasti, orašasti ili kao još sitniji ugljen. Udio sitnog ugljena ovisi o sastavu ugljenih slojeva i o načinu iskorištavanja. On može biti dosta velik u mekanom lignitu, ali i u kamenom masnom i koksom ugljenu, odnosno u svim tektonski jako zdrobljenim slojevima ugljena. Prije je velik udio sitnog ugljena bio nepoželjan jer je sitni ugljen neprikladan za prijevoz i smještaj, a prašinom kvari zrak. U novije doba to više nije tako jer je za koksiranje potreban sitni ugljen, a krupniji se u tu svrhu mora mljeti. U druge se svrhe sitni ugljen okrupnjuje u brikete (v. *Briketiranje*, TE 2, str. 153). Međutim, ugljen bogat hlapljivim sastojcima odlično izgara u ložištima i kao prašina.

Podjela ugljena. Razlike među pojedinim vrstama ugljena potječu od različite ishodišne tvari, ali nastaju i tijekom niza biokemijskih, geokemijskih i geoloških pretvorbi te tvari.

S obzirom na sastav ishodišne tvari (genetska podjela), ugljen može biti humusni (humitni), sapropelitni ili liptobiolitni, a oblik nakupljanja ishodišne tvari bio je treset, sapropel, odnosno vosak, smola i sl. Na Zemlji ima najviše humusnog ugljena, dok su sapropelitni i liptobiolitni ugljeni rjeđi i često se ubrajaju u specijalne vrste ugljena.

Humusni ugljen postao je uglavnom od ligninsko-celuloznog tkiva viših biljaka. To je izrazito ogrjevni ugljen, slojevit, trakaste teksture, ne sadrži mnogo bitumena.

Sapropelitni ugljen potječe od sapropela, ostataka nižih organizama, fitoplanktona i zooplanktona (v. *Nafta*, TE 9, str. 192). Ishodišne su tvari bile bjelančevine i masti, a nastali proizvod *bitumen*. Razlikuju se *pravi (strukturni) sapropeliti*, u kojima su npr. alge i njihove kolonije sačuvala svoju građu i oblik, te *sapropolitni*, u kojih su alge i drugi elementi planktona prešli u koloidnu (želatinoznu) masu bez pravilne strukture. Sapropeliti obuhvaćaju ugljene kenel i boghed te još neke vrste.

Liptobiolitni ugljen nastao je pretežno ili jedino od otpornih, bituminoznih ostataka viših biljaka: voštanih i smolnih tjelešaca, spora, kutikula i sl. On ne sadrži dijelove ligninsko-celuloznih tkiva ili se oni u njemu pojavljuju samo u manjim količinama (< 10%). Obično je homogen u cijeloj svojoj masi (atritusni ugljen). Postoje smolni i kutikulski liptobiolitni, a glavni su predstavnici disodil, piropisit i rabdopisit. Od humusnog se ugljena razlikuju kemijskim sastavom (daju veće količine lako hlapljivih sastojaka) i po tome što nisu prugaste teksture. Kako su humusni i liptobiolitni ugljen istog podrijetla (potječu od viših biljaka), ponekad se zajednički nazivaju *humolitni*.

S obzirom na stupanj pougljenjenja (karbonizacije) i odgovarajuća petrografska, fizikalna i kemijska svojstva ugljena, razlikuju se dvije velike skupine: *smeđi ugljeni*, koji obuhvaćaju i lignit, te *kameni ugljeni*. Uz njih se obično svrstava i *treset*, iako se ne smatra pravim ugljenom (tabl. 1).

U klasifikaciji ugljena uzima se u obzir i njegova geološka starost, ali sam kronostratigrafski kriterij nije uvijek pouzdan, jer

i drugi geološki činitelji (tektonski pokreti, vulkanska aktivnost, povišeni tlak i povišena temperatura) mogu znatno utjecati na njegovu svojstva. Tako su u donjokarbonskim naslagama moskovskog bazena ustanovljeni ugljeni slojevi koji bi po svojoj starosti pripadali u kameni ugljen, a imaju tek svojstva smeđeg ugljena (gotovo lignita). Oni se nalaze u tektonski mirnom području goleme ruske ploče. Nasuprot tome, terciarni ugljen u Japanu pravi je kameni ugljen, jer je njegova prvotna drvena tvar bila podvrgnuta intenzivnom djelovanju metamorfnih procesa u tektonski vrlo živim područjima.

Tablica 1

SASTAV I OGRJEVNA MOĆ POJEDINIH VEĆIH SKUPINA UGLJENA*

Ugljen	Vlaga %	Pepeo %	Ugljik %	Vodik %	Kisik %	Dužik %	Sumpor %	Ogrjevnost MJ/kg
Treset	25	8	40	4	22	1	—	8...16
Lignit	13,5	55	41	3,5	18	1	1	13...17
Smeđi (bez lignita)	6...20	13...25	43...53	3,5	11...17	0,5...1,5	0,5...2	16...23
Kameni (bez antracita)	2...3	6...10	75...84	2,5...4,5	3...8	0,5...1	0,7	23...33
Antracit	1	8	85,5	1,8	2	1	0,7	31

*prosječne vrijednosti ugljena sušenog na zraku

Ugljen se može razlikovati i po primjeni: energetski ugljen upotrebljava se kao gorivo, a tehnološki je ugljen sirovina za mnoge važne kemijske poluproizvode ili gotove proizvode (katrian, koks, tehnički plinovi).

POSTANAK UGLJENA

Postanak ugljena od znanstvenog je i praktičnog značenja, osobito za identifikaciju, kvalitetu i korelaciju ugljenih slojeva u nekom ugljenom bazenu, zatim pri razlikovanju dijelova istoga bazena i pri usporedbi dvaju ili više bazena.

Ugljen je organskog podrijetla, uglavnom biljnog, a u manjoj su mjeri u njegovu nastajanju sudjelovali i životinjski ostaci. Biljne tvari u ugljenu potječu od nekadašnjih šuma s bujnim raslinjem koje se razvijalo pod povoljnim okolnostima davnih geoloških razdoblja (tabl. 2). To je raslinje nakon uginjanja stvaralo bogate naslage organskih tvari, koje su zatim bile podvrgnute potresećivanju (stvaranju treseta) i konačno pougljenjivanju.

Tablica 2

GEOLOŠKA STAROST UGLJENA

Razdoblje	Vrsta ugljena
Kenozoik { aluvij diluvij pliocen mioocen oligocen eocen paleocen	} treset } smeđi ugljen
Paleozoik { perm karbon devon silur ordovicij kambrij	} antracit

Među prvim jasnim i znanstvenim pogledima na postanak ugljena navodi se mišljenje F. Beroldingena (1778) o povezanosti ležišta ugljena s tresetištima. U vezi s tim on je postavio temelje *autohtonoj teoriji* podrijetla ugljena, prema kojoj je ugljen nastao od bilja koje je raslo na mjestu na kojem je ugljen i pronađen. Kao najvažnije dokaze za autohtoniju Beroldingen (i potom njegovi pobornici) spominje škrljave neslojevite gline s korijenjem drveća, koje se u nekim rudnicima nalaze u podini ugljenog sloja, pa se on može smatrati močvarnim tlom nekadašnjeg raslinstva. Zatim je postavljena *alohtona teorija*, prema kojoj je ugljen postao od biljnog materijala koji se naplavljivao i nakupljao u riječnim deltamama. H.

Fayol u svom djelu o ugljenom bazenu Commeny u Francuskoj (1886) navodi sljedeće dokaze za alohtoniju: postupni prijelaz ugljena u ugljevit škrljavec, kosu i ukrštenu slojevitost, čestu izmjenu naslaga u krovini te položena okremenjena i ovapnjena stabla. Osim izravnih zapažanja tih pojava u ugljenom bazenu, Fayol je iznio i rezultate brojnih pokusa. Puštajući u umjetne kanale pijesak, glinu i razdrobljeni biljni materijal ili ugljen, uočio je stvaranje kosih slojeva, istanjivanje i podebljavanje te grananje slojeva uklapanjem jalovine te zaključio da je ugljen u bazenu Commeny nastao vodenim prijenosom i odlaganjem biljnog materijala u delti. Zanimljivo je da J. J. Stevenson (1910), nakon istraživanja istoga bazena, nije osporavao prijenos materijala rijekama, ali je tvrdio da je glavna masa ugljena ipak proizašla iz tresetišta.

U novije doba težište je istraživanja postanka ugljena u točnom utvrđivanju karakterističnih okolnosti za autohtonu ili alohtonu predodžbu. Unutar pojedinih bazena često ima elemenata za potvrdu i jednog i drugog mišljenja. Autohtonisti danas razlikuju *autohtoniju* i *hipautohtoniju*. Prva označuje pojavu organskih ostataka, odnosno ugljena, na istom mjestu gdje su biljke rasle, a druga pokazuje na organske ostatke iz predjela bliže tresetne močvare uz pretpostavku prijenosa na maloj udaljenosti. I alohtonisti luče dvije vrste alohtonije: *primarnu*, koja pretpostavlja da su se na udaljena mjesta prenijeli organski ostaci, i *sekundarnu*, koja se odnosi na prijenos već nastalog treseta ili ugljena. Danas autohtona teorija ima više pristaša.

Mjesta na kojima su se razvila *tresetišta* bila su različita, već prema tipu pretežno stagnirajućih voda, močvara, riječnih dolina, jezera, delta i morskih zaljeva. Razvitak tresetišta ovisio je o načinu na koji su biljke dobivale vodu i crpile potrebne mineralne sastojke. Normalnom se evolucijom smatra najprije stvaranje sapropela, zatim plitkog, te na kraju visokog tresetišta. Za takav razvitak nužno je postojanje vodonepropusnog sloja u podlozi i dovoljna vlažnost. U plitkim i niskim tresetištima tresetni sloj leži ispod razine vode ili pliva na njezinoj površini, odnosno nalazi se na sapropelu. Izdizanjem tresetnog sloja nastaju visoka tresetišta s izbočenom površinom visoko iznad vode. U njima je razina podzemne vode nešto snižena i biljke dobivaju vodu djelomice i od padalina.

Prva faza nastanka ugljena (potresećivanje, humifikacija) obuhvaća prekrivanje nakupljene organske tvari stagnirajućim vodama ili drugim pokrovom i izolacijom od zraka, nadalje truljenje organskih ostataka djelovanjem ograničene količine kisika i aerobnih bakterija, te zatim gnjiljenje i raspadanje djelovanjem anaerobnih bakterija. Tako su organski ostaci postupno prelazili u humusne tvari i treset.

Druga faza (pougljenjivanje) zbivala se, nakon slijeganja tla i prekrivanja treseta nanosima pijeska i gline, pod utjecajem fizikalnih i kemijskih činitelja, najviše povišenog tlaka i povišene temperature, katalitičkog djelovanja mineralnih primjesa i kemijskog učinka plinova nastalih u tresetu (ugljičnog dioksida, sumporovodika, metana). To je proces redukcije i kompakcije ili dijagenese, u kojem se i dalje istiskuje voda i treset se pretvara u lignit i zatim u druge vrste smeđeg ugljena. Daljim se mogućim metamorfnim procesima (nastavak dehidracije, smanjenje udjela hlapljivih sastojaka) stvara kameni ugljen i antracit. Konačno može nastati grafit u posebnim geološkim okolnostima: pri povišenoj temperaturi i povišenom tlaku te uz pokrete stijenskih masa.

Detaljnije zbivanje opisanih procesa i mehanizam kemijskih promjena nisu ni do danas dovoljno poznati. Smatra se da se glavni sastojci biljnih tvari, celuloza i lignin, prvo prevode u *huminske kiseline*, spojeve smeđe boje i topljive u alkalijskim otopinama. U kasnijoj fazi huminske kiseline prvo gube metoksilne skupine, a zatim i vodu i prelaze u *humine*. To su smeđe ili crne, teško topljive tvari koje se otapaju tek u jakim alkalijama. Konačno se molekule humina kondenziraju uz otpuštanje molekula vode, metana, ugljičnog dioksida i sl. Tako nastaju *humiti*, tamnosmeđe ili crne i praktički netopljive tvari.

Bazeni i ležišta. Ugljenonosna područja u paleogeografskom pogledu odgovaraju depresijama ili uleknućima u Zemljinoj kori. Ako je u njima bilo dugotrajnih spuštanja i taloženja debelih naslaga, nazivaju se *bazenima*. Građa bazena najčešće je karakterizirana manje ili više poremećenim sinklinalama, sinklinorijama i tektonskim grabama. Ona je u velikoj mjeri predodređena, jer su bazeni nastali unutar geosinklinala, po rubovima geosinklinala prema platformama ili u uleknućima platformi, pa se tako i nazivaju: *geosinklinalni*, *prijelazni* i *platformni bazeni*. U depresijama područja izgrađenih pretežito od vapnenaca i dolomita nastali su krški ugljenonosni bazeni.

Katkad je na velikim površinama bilo zamašnih ritmičkih spuštanja tla, pa je more često prodiralo u prostor bazena. Tako je

nastajala ugljenonosna formacija, koju čini polifacijsni kompleks naizmjeničnih kopnenih, jezerskih i marinskih sedimenata. To su *paraličke* formacije i bazeni (prema *paralos* blizu mora). Među njima se razlikuje *donjecki tip* (Donbas, Illinois i dr.) s pravilnim i brojnim ponavljanjem marinskih slojeva, te *vestfalski tip* (ruhrske bazen, Karaganda i dr.) s rijetkim marinskim slojevima unutar ugljenonosnih naslaga.

I unutar relativno izdignutih i jače naboranih područja bilo je predjela koji su se spuštali, npr. u međulančanim i međugorskim kotlinama do kojih more nije moglo doprijeti. Njihovi ugljeni slojevi nastali su u jezerskim i močvarnim tresetištima. To su *limnički bazeni* (prema *limnos* jezero). Oni ne sadrže marinske horizonte i ne dosežu prostranost paraličkih bazena, ali su brojniji, a među tipične se ubrajaju saarski, donjošleski i češki bazen te bazeni središnje Francuske.

U novije se doba iznose zapažanja o postojanju i treće skupine ugljenonosnih naslaga, povezane samo s riječnim taložinama, pa se nazivaju *potamičkim bazenima* (prema *potamos* rijeka). Bolje proučeni primjeri, samo sa znakovima fluvijalnog (riječnog) podrijetla ugljenonosnih naslaga (grubi riječni pješčenjaci, kosa slojevitost), postoje u nekoliko predjela bivšeg SSSR. Bolje su poznati primjeri samo djelomične prisutnosti riječnih naslaga u paraličkim i osobito limničkim ugljenonosnim bazenima.

Prema stupnju pokrivenosti ugljenonosne formacije bazeni mogu biti otkriveni, poluotkriveni i pokriveni. Zbog ekonomičnosti primjene površinskog ili jamskog otkopavanja važni su omjeri debljina i dubina pokrovnih (jalovinskih) naslaga i ugljenih slojeva. *Koeficijent ugljenonosnosti formacije* predstavlja omjer debljine svih ugljenih slojeva prema ukupnoj debljini ugljenonosne formacije, iskazan u postocima.

Unutar bazena može se nalaziti jedno ili više ležišta, tj. jedan ili više ugljenih slojeva rentabilnih za eksploataciju. Dijelovi ili sektori ležišta koji su istraženi, ograničeni i određeni za otkopavanje označuju se kao *polja*. Granice polja ponegdje su uvjetovane istanjenjem ili pojavljivanjem, rasjedima, zaštitom vanjskih objekata i dr. *Stupanj ugljenonosnosti polja* iskazuje se masom ugljena u tonama na 1 m², a *stupanj ugljenonosnosti bazena* u tonama na 1 km².

Debljine ugljenonosnih formacija pojedinih bazena dosta se međusobno razlikuju. Tako su, npr., paraličke ugljenonosne formacije dinantskog, namirskog i ruhrskog bazena debele ~3 000 m, a gornjošleskog i donječkog 7 000 m. U tipičnom limničkom bazenu u Saaru debljina je formacije ~4 000 m. U tim se bazenima nalazi i nekoliko stotina ugljenih slojeva i proslojaka, ali je gospodarski važno većinom samo nekoliko desetaka s debljinama 0,5...2,5 m, a rijetko i više, kao u gornjošleskom paraličkom bazenu, u kojem se od 434 sloja eksploatira 140 slojeva.

Općenito se može reći da su unutar mezozojskih i pogotovo mlađih tercijskih naslaga ugljeni slojevi veće pojedinačne debljine nego li u paleozojskim sedimentima. Tako je u karbonskim i permjskim slojevima kamenog ugljena debljina od 30 m velika rijetkost, dok u kasnije nastalom smeđem ugljenu i osobito lignitu debljine ponekad premašuju i 100 m. U mnogo mlađim bazenima nalazi se samo nekoliko ili tek jedan sloj ugljena, ali velike debljine, što je posljedica usporenog spuštanja tla, uglavnom ravnomjerno sa stvaranjem tresetišta. Tako je, npr., u kölnskom bazenu u Njemačkoj ugljeni sloj debeo više od 100 m, a u Velenju u Sloveniji sloj lignita u dubokim sektorima sinklinale doseže debljine od nekoliko desetaka do više od 100 m. Debeli ugljeni slojevi podzemno se otkopavaju različitim metodama, već prema tektonskim i drugim prilikama. Velenjska otkopna metoda šire je poznata u nas i u svijetu (v. *Rudarstvo*, TE 11, str. 647).

Uklopci i pojavljivanje. U ugljenim se slojevima nalaze raznovrsni uklopci u obliku mineralnih agregata, nakupina kristala, kongregacija, ovalnih ili okruglih tijela, leća i proslojaka. Ponegdje ih bliže podini ili krovini ima toliko da je ugljen u tim dijelovima neprikladan za eksploataciju.

Dolomitni gomolji ili tzv. *ugljene lopte* najpoznatije su tvorbe uklopaka unutar slojeva kamenog ugljena, obično na mjestima gdje u krovini ima marinskih naslaga. U smeđem su ugljenu češća *silificirana* ili *okremenjena tijela* razvijena poput gomolja ili u obliku fosilnih okremenjenih stabala. *Sferosideriti* ili željezovite nakupine također su kuglasta, elipsoidna ili nepravilna oblika i

različite veličine. Brojnije su takve pojave u krovini ugljenih slojeva paraličkih bazena.

U zonama poremećaja i pukotinama ugljenih slojeva skoro redovito se zapažaju nakupine s više izlučenih minerala. Među karbonatima najviše je *kalcita* (CaCO₃). Od sulfida je najčešći željezni sulfid (FeS₂), razvijen u kamenom ugljenu kao *pirit*, a u smeđem kao *markazit*, zatim *halkopirit* (CuFeS₂), *galenit* (PbS), *sfalerit* (ZnS) i drugi. Pri izlučivanju minerala mjestimice su obuhvaćene i biljke u vrlo ranom stadiju stvaranja tresetišta. Tako su nastali *intuskrustati*, izraziti fosilni nastoci, osobito važni za poznavanje građe i načina života nekadašnjih biljaka. Od samorodnih se elemenata najčešće nađe *sumpor*, a od sulfatnih minerala *gips*.

Konačno, u ugljenim se slojevima od stranih uklopaka i mineralnih primjesa najviše *silikata* i *alumosilikata*. Raspršeni su po slojnim ploham ili se nalaze kao leće i proslojci, pogotovo tinjci i minerali glina iz skupine kaolinita. U slojevima ima mjestimice mnogo čestica magmatskih, metamorfni i sedimentnih stijena, koje su vjerojatno bile naplavljene ili unesene u tresetište s otrgnutim stablima. Nađe ih se npr. u bazalnom ugljenom sloju koji leži izravno preko paleoreljefta izgrađenog od starijih stijena, zatim u slojevima na krajnjim obodima bazena, gdje slojevi vrlo često isklinjavaju ili pojalovljuju. Isklinjavanje je moglo nastati i u primarnom stadiju i zbog erozije tresetne mase vodenim tokovima. Neki drugi prekidni slojeva posljedica su sekundarne erozije (nakon postanka ugljena), zatim fleksurnih istezanja i rasjedanja.

Plinovi u ugljenu (plinonosnost). Plinovi su se razvijali već u stadiju nastajanja treseta i zatim pougljenjivanja, a ponegdje su podrijetlom iz popratnih stijena krovine i podine ili iz starijih stijena u dubljoj podlozi bazena. Najčešće se nakupljaju u zonama poremećaja. Mogu se nakupiti i u jamskim prostorijama, ako nema kontrole i djelotvornog vjetrenja. Iz ugljenih se slojeva mogu izdvajati jedan ili više plinova, a najčešći su metan, ugljični dioksid, ugljični monoksid, dušikovi oksidi i sumporovodik (v. *Eksplorzije u rudnicima*, TE 3, str. 520; v. *Rudarstvo, vjetrenje rudnika*, TE 11, str. 686).

SASTAV, STRUKTURA I SVOJSTVA UGLJENA

Kemijski sastav ugljena. Fosilni je ugljen složena smjesa tvari koja se sastoji od različitih ugljikovih i drugih spojeva. Organski spojevi čine *čistu gorivu tvar* ili gorivi dio, a mineralne primjese i voda (vlaga) negorivi dio ugljena ili balast, koji je nepoželjan jer mu smanjuje toplinsku vrijednost. Za kemijsku karakterizaciju ugljena najčešće se obavljaju elementarna, tehnička (imediata) i racionalna analiza. Međutim, iskazivanje i tumačenje rezultata analize nije uvijek jednoznačno, pa mnogi spojevi, za koje se vjeruje da se nalaze u ugljenu, nisu zasada sa sigurnošću identificirani ni izolirani. Neki spojevi nisu stalnog sastava, a na višoj temperaturi prelaze u druge spojeve, a za druge opet nije dokazano da se izvorno nalaze u ugljenu ili nastaju tek pri ispitivanju, npr. termičkom razgradnjom i sl.

Elementarnom analizom određuje se kemijski sastav čiste gorive tvari, tj. udio ugljika, vodika, kisika, dušika i sumpora u ugljenoj tvari bez vlage i mineralnih sastojaka (tabl. 3). Takvim proračunavanjem samo na čistu gorivu tvar mogu se mnogo bolje vidjeti razlike među pojedinim vrstama ugljena, jer su isključene varijacije s obzirom na udio vlage ili mineralnih sastojaka.

Ugljik je glavni sastavni element i osnovni nosilac toplinske vrijednosti ugljena. Maseni se udio ugljika u humusnom ugljenu povećava sa starošću, dakle počevši od treseta, preko lignita, smeđeg i kamenog ugljena, pa do antracita, dok u sapropelnom ugljenu varira od 65...80%. Zapravo, količine se ugljika, vodika i kisika tijekom pougljenjivanja stalno smanjuju, ali se količine vodika i kisika smanjuju mnogo brže, pa je tako ugljen relativno sve bogatiji ugljikom.

Vodik je također važan za toplinsku vrijednost ugljena, ali samo onaj dio koji je vezan s ugljikom u ugljikovodicima. To je tzv. slobodni vodik jer može gorjeti uz razvijanje topline. Vezanim se vodikom u ugljenu naziva onaj koji je kao vlaga vezan u vodu, pa ne sudjeluje u izgaranju i ne daje toplinu. U humusnom je ugljenu udio vodika utoliko manji što je veći stupanj pougljenjivanja. Sapropelni i liptobiolitni ugljen sadrži više vodika (6...12%). Vodik u ugljenu omogućuje izdvajanje smolastih i

hlapljivih tvari. Zato se izgaranje ugljena s većim udjelom vodika očituje duljim plamenom s više dima, dok npr. koks, koji je praktički bez vodika, izgara bez plamena.

Tablica 3

ELEMENTARNA ANALIZA I OGRJEVNA MOĆ ČISTE GORIVE TVARI POJEDINIH VRSTA UGLJENA

	Ugljen	Ugljik %	Vodik %	Kisik %	Dušik %	Sumpor %	Ogrjevna moć MJ/kg
	Treset	55...60	6	30...40	1...3,5	0,5	22
Smeđi ugljen	Lignit	60...65	5...6	25...35	1...3	0,5...2	24
	Zemljasti smeđi	65...68	5	26	1	2...3	25...29
	Obični smeđi	68...72	5,5	21	1,2	1	
	Sjajni smeđi	72...75	5,5...7	12...18	1,8	1...2	
Kameni ugljen	Plameni	75...83	5...6	10...15	0,6...1,5	0,5...1,5	29
	Plinski	80...87	5...5,8	5...14	1...1,7	0,6...1,7	32
	Kovački	84...88	5...5,5	6...11			36
	Koksn	87...89	4,5...5,5	4...7			37
	Polumasni	89...91	4...5,5	2,8...4			37
	Mršavi	90...93	3...4,5	2,5...3,2			37
	Antracit	92...96	2...4	1,3...3			1...1,9

Kisik u ugljenu predstavlja balast, smanjuje toplinsku vrijednost ugljena i nepovoljno utječe na njegovu kemijsku preradbu.

Dušik također smanjuje toplinsku vrijednost ugljena, ali ga je obično vrlo malo, najviše ~3% u lignitu. Dušik poboljšava kvalitetu ugljena koji je namijenjen kemijskoj preradbi: ugljen s većim udjelom dušika daje i više amonijaka.

Sumpor potječe manjim dijelom od biljne protoplazme koja sadrži bjelančevine (tzv. organski sumpor), dok je veći dio tzv. anorganski sumpor (primjese pirita, markazita, gipsa i drugih sulfata). Udio sumpora rijetko prelazi 2%, ali ima ugljena sa 6%, pa čak i do 11% sumpora (npr. kameni ugljen iz Raše sadrži 9...11% sumpora), što otežava oplemenjivanje i upotrebu tog ugljena. Često su organskim sumporom bogati upravo oni slojevi ugljena koji se nalaze unutar naslaga vapnenca. Ugljen pokriven marnim krovinskim naslagama sadrži više sumpora, i to anorganskog (pirit). Prilikom izgaranja ugljena izgara i organski dio sumpora i jedan dio anorganskog (sulfidni sumpor). On se spaja s kisikom u plin sumporni dioksid. To su, dakle, štetni sastojci ugljena jer proizvod njihova izgaranja korodira metalna postrojenja, a u obliku dimnih plinova onečišćuju atmosferu i štetno djeluju na ljude i ostali živi svijet. Drugi se dio anorganskog sumpora (sulfatni sumpor) ne može oksidirati, nego prelazi u pepeo, pa je to negativni sumpor, štetan samo pri preradbi ugljena u koks, a ne i pri izravnom izgaranju u ložištima.

Fosfora je u ugljenu vrlo malo i pri njegovu izgaranju ostaje u pepelu. To je također štetna primjesa, osobito u ugljenu koji se upotrebljava za proizvodnju metalurškog koksa.

Tehnička (imediata, neposredna) analiza ugljena daje podatke o udjelu vlage, pepela, stalnog ugljika i hlapljivih sastojaka (što zajedno čini 100% mase ugljena), te o toplinskoj vrijednosti ugljena. Ukupni se hlapljivi sastojci određuju iz razlike masa ugljena i dobivenog koksa, a suhi hlapljivi sastojci preostaju nakon odbitka vlage. Stalni ugljik razlika je masa koksa i pripadnog pepela. Čista goriva tvar sastoji se od stalnog ugljika i suhih hlapljivih sastojaka. Svi ti pokazatelji i bolje od onih iz elementarne analize upućuju na praktične vrijednosti ugljena.

Vlaga se u tehničkoj analizi obično iskazuje kao *gruba (vanjska) i higroskopna (unutrašnja) vlaga* te *ukupna vlaga*. Sirovi ili rovni ugljen sadrži grubu i higroskopnu vlagu, na zraku sušeni ugljen ima samo higroskopnu vlagu, koja se može ukloniti sušenjem na 105°C, a apsolutno suhi ugljen uopće nema vlage. Osim grube i higroskopske vlage, u nekim vrstama ugljena postoji i *konstitucijska vlaga* u obliku kristalne vode koja je vezana uz pojedine mineralne sastojke. Udio ukupne vlage jako varira i ovisi o stupnju pougljenjenja, strukturi i usitnjenosti ugljena te o hidrogeološkim uvjetima na radilištu (u jamama i površinskim ko-

povima). Neke vrste lignita sadrže i 55% vlage, dok je u antracitu rijetko ima više od 2%.

Pepeo zaostaje poslije potpunog izgaranja ugljena. *Singeneski pepeo* sadrži primjese koje su ušle u ugljen za njegova nastajanja: jednim dijelom potječe iz sastava ishodišne biljne tvari (konstitucijski pepeo), a drugi je dio unesen vodom ili vjetrom i taložen u tresetištu istodobno s biljnom tvari (unutrašnji pepeo). *Epigenetski pepeo* daju mineralne primjese naknadno dospjele u ugljen infiltracijom ili cirkulacijom mineralnih voda uzduž pukotina i slojnih ploha u ugljenu, a također i one koje su ušle u ugljen prilikom njegove eksploatacije (dijelom iz krovine i podine te iz jalovinskih proslojaka). Te se posljednje primjese uklanjaju iz ugljena mehaničkim postupcima oplemenjivanja.

Talište i kemijski sastav pepela važni su pokazatelji prilikom planiranja procesa u kojima ugljen izgara, određivanja izmjera ložišta i sl.

U ugljenom se pepelu često nalaze vezani alkalijski i zemnoalkalijški elementi, čestice gline i kremenca, te oksidi, sulfidi i sulfati. Pepeo nekih vrsta ugljena sadrži i veće udjele teških, čak i plemenitih metala: zlata, srebra, platine, olova, cinka, nikla, kobalta i drugih. U posljednje su vrijeme u ugljenom pepelu nađeni i spojevi vanadija i urana; osobito zanimanje vlada za dobivanje urana (u nas za uran iz pepela raškog ugljena). Maseni udio pepela u humusnom ugljenu može iznositi i do 50%; ako je taj udio u kamenom ugljenu veći od 50% ili u smeđem ugljenu veći od 40%, radi se o *ugljevitim škriljavcima* (škriljavim ugljevitim laporima, škriljavim ugljevitim glinama i sl.). Saproelni ugljen može imati i 70% pepela, a da još bude rentabilan. Iskorištavanje ugljevitih škriljavaca pogotovo se isplati ako se pepeo upotrebljava u proizvodnji cementa.

Hlapljivi sastojci izdvajaju se prilikom suhe destilacije, tj. zagrijavanja ugljena na dosta visokoj temperaturi bez prisutnosti zraka. Prvo se pojavljuje vodena para, zatim počinju kondenzacijske pretvorbe ugljene tvari s izdvajanjem molekula vode, te ugljičnog monoksida, ugljičnog dioksida i metana, a pri temperaturi višoj od 500°C izdvajaju se složeni ugljikovodici i kisikovi spojevi. Dijelom se izdvaja i sumpor u obliku sumporovodika. Količina i značajke hlapljivih sastojaka, osobito maseni omjer s bespepelelim koksnim ostatkom, služe u tehničkoj klasifikaciji ugljena i za uspoređivanje različitih vrsta ugljena. Udio hlapljivih sastojaka računa se na masu suhog ugljena bez mineralnih sastojaka (čista goriva tvar). Prema tome, zbroj masa hlapljivih sastojaka i koksa bez mineralnih sastojaka čini ukupnu masu čiste gorive tvari u ugljenu. Ugljen nižeg stupnja pougljenjenja ima više hlapljivih sastojaka. Iznimka su pojedini saproelni ugljeni i liptobioliti vrlo bogati hlapljivim sastojcima (čak do 90%).

Koks je čvrsti ostatak nakon suhe destilacije, a sadrži uglavnom ugljik, mineralne tvari i vrlo malo hlapljivih tvari. U tehničkoj se analizi iz koksa s pepelom izračuna koks bez pepela, koji se posebno iskazuje kao *vezani ugljik* (čvrsti, nepromjenljivi, tzv. fiksni ugljik).

Toplinska vrijednost ugljena može se odrediti na više načina: eksperimentalno u kalorimetru ili računski na temelju podataka elementarne i tehničke analize. Razlikuje se *gornja* i *donja* toplinska vrijednost, a nazivaju se *sagorjevna toplina* i *ogrjevna moć*. Gornja se odnosi na ukupnu toplinu koja se oslobađa potpunim izgaranjem mase od 1 kg ugljena uz normalne okolnosti (tj. 0°C, 1013,25 mbar), s tim da sagorjevna voda (voda nastala izgaranjem ugljena) ostaje u kapljevitom stanju. Donja toplinska vrijednost dobiva se iz gornje oduzimanjem topline utrošene na isparivanje sagorjevne vode, pa se, dakle, pretpostavlja da sagorjevna voda ostaje u obliku vodene pare, kao što se to prilikom izgaranja i događa. Zbog toga je za praksu važnije poznavati donju toplinsku vrijednost goriva. Razlike između njih manje su, dakako, za kameni ugljen (~3%), a veće za smeđi ugljen i lignit (5...15%).

Švelnom analizom određuju se proizvodi niskotemperaturne razgradnje ugljena bez prisutnosti zraka. To su primarni katran, pirogenetska voda (nastala tijekom suhe destilacije razgradnjom hlapljivih tvari), plin i polukoks.

Racionalna analiza, za razliku od elementarne, usmjerena je na određivanje skupina tvari u ugljenu. Obavlja se ekstrakcijom, odnosno otapanjem organskih tvari ugljena u raznim otapalima (piridin, kloroform, eter, aceton, benzen), po potrebi pri povišenoj temperaturi i tlaku. Tako se mogu izdvojiti sastavni dijelovi

kao što su voskovi, smole, humusne tvari, otporni biljni ostaci (spore, kutikule) i skupna biljna tkiva (karboidi).

Struktura ugljena. U strukturno-petrološkom pogledu ugljen nije jednostavna i homogena masa, nego manje ili više složena i heterogena tvorevina. Za ocjenu kvalitete ugljena određuju se njegova fizikalna svojstva, a pod mikroskopom i građa te međusobni odnosi glavnih sastojaka, što je područje *petrografije ugljena*. Glavni sastojci ugljena, zapravo veće petrografске jedinice ili litotipovi, jesu durit, fuzit, klarit i vitrit. Imena im potječu od latinskih riječi *durus* tvrd, *fusus* istegnut, *clarus* svijetao i *vitreus* staklast. Fuzit i vitrit su jednostavni (homogeni), a durit i klarit složeni (heterogeni) sastojci.

Durit je tamni sastojak ugljena, tvori tamne pruge (trake) s neprozirnom osnovnom masom ili djelomično neprozirnim područjima. Na uglačanoj je površini mutan, tvrd je i ne raspada se. Nastao je od lupina spora (mjestimice čak 75%), epiderme lišća, peluda, tvrdih kapljica smole i amorfno veziva. Pojavljuje se u samostalnim slojevima ili u proslojcima u svijetlom ugljenu. Obično je zrnate građe, a pod mikroskopom se vidi nejednolična slika agregata, jer se sastoji od temeljne mase bez strukture i uklopaka od biljnih ostataka.

Fuzit je crn poput čađe, prlja prste pri pipu, pri gorenju jako čađi. Mekan je i mehanički s djelovanjem lako raspada. To je tipičan vlaknasti ugljen, vrlo sličan drvenom ugljenu, pa ga često zovu fosilni drveni ugljen. Susreće se u izobilju između pojedinih ugljenih slojnih ploha u obliku leća i drugih uklopaka. To je makroskopski i mikroskopski tako karakterističan dio ugljena da nema nedoumice pri njegovu određivanju. Pod mikroskopom u prolaznoj svjetlosti obično pokazuje jednoličnu strukturu komora (klijetaka), s neprozirnim crnim stijenjkama i slobodnim prozračnim otvorima. U reflektiranoj svjetlosti na nabrsku polirana površina također pokazuje vlaknastu građu, no, s obzirom na sliku izbruska, ovdje je obrnuto: stijenke komora su sjajnobijele ili jedva žućkaste, a otvori su crni ili tamnosivi.

Klarit je polusjajni sastojak ugljena, pojavljuje se u proslojcima ili čak debelim slojevima (tzv. svijetli ugljen). Takvi slojevi mogu sadržavati leće fuzita i vitrita te proslojke durita. Klarit se od njih razlikuje po velikoj količini amorfno veziva, kojeg je udio često i do 50%. Pod mikroskopom pokazuje kutikule i spore u temeljnoj masi, što je dosta nalik duritu.

Vitrit je sasvim svijetao, sjajan sastojak, porozan i krhak, prikrivene drvene strukture i školjkasta prijeloma. Pojavljuje se u obliku duljih ili kraćih leća debljine 1–3 cm, koje su uvijek pravilne kalavosti, i to okomito na slojevitost, pa se vitrit kida u poliedarske komadiće. U vitritu, još više negoli u klaritu, prevladava amorfno vezivo. Promatranjem vitrita u reflektiranoj svjetlosti vide se homogene jednolične zone ili sjajne trake i tijela nepravilne strukture, što bi odgovaralo humusnom gelu dobivenom homogenim taloženjem. Vitrit nepravilne strukture zove se *kolinit* ili *euvitrit*, a ako se u njemu zapazi drvena tvar, radi se o *telinitu*.

Uz spomenute glavne sastojke česti su prijelazni oblici, npr. duroklarit (sličniji klaritu), klarodurit, vitrofurit, fuzoksilit itd.

Fizikalna svojstva ugljena. Na fizikalna svojstva pojedinih vrsta ugljena utječe njihov petrografski sastav, stupanj pougljenjenja, udio i vrste anorganskih primjesa te stupanj oksidacije. Neka su svojstva već navedena pri klasifikaciji pojedinih ugljena jer izravno služe za njihovo razlikovanje: *boja i sjajnost, crt* (trag, ogreb), *prijelom i struktura*. Od ostalih su svojstava važni i gustoća, električna otpornost i električna vodljivost.

Prava gustoća odnosi se na gustoću čiste gorive tvari pri 0 °C, dakle, na ugljen bez mineralnih primjesa i vlage, pa ovisi samo o petrografskom sastavu i stupnju pougljenjenja. Od nje se razlikuje *praktična gustoća*, koja pokazuje gustoću ugljena kakav dolazi izravno iz rudnika. Ona ovisi o više činitelja, posebno o udjelu i vrsti mineralnih primjesa. Najmanju pravu gustoću imaju treseti (do 0,7 g/cm³), a zatim se ona povećava od lignita i smeđeg ugljena (najčešće 0,8–1,35 g/cm³) do kamenog ugljena (1,25–1,45 g/cm³) i antracita (> 1,5 g/cm³). Strukturni se sastojci kamenog ugljena također razlikuju po pravoj gustoći: fuzit 1,37–1,52 g/cm³, vitrit 1,28–1,30 g/cm³, klarit 1,27–1,29 g/cm³ i durit 1,20–1,36 g/cm³. Praktična je gustoća skoro redovito veća, jer su anorganske primjese veće gustoće od organskih ugljenih tvari.

Električna otpornost ugljena često se ispituje prilikom geofizičkih istraživanja ugljenih ležišta (v. *Geofizika*, TE 6, str. 88). Ona je najmanja u antracitu (najviše 1 Ω m), najveća u mršavom (10–500 Ω m) i masnom kamenom ugljenu (200–10 000 Ω m) zbog većeg udjela bitumena, a nešto manja u smeđem ugljenu (10–200 Ω m) zbog većeg udjela vlage i mineralnih primjesa.

GLAVNE VRSTE UGLJENA

Na osnovi stupnja pougljenjenja ugljen se svrstava na treset, smeđi ugljen i kameni ugljen, a ta razdioba, uz iznimke, uglavnom odgovara i razlikama u geološkoj starosti.

Treset. S ugljenom se opisuje i treset, iako se ne smatra pravim ugljenom. To je geološki najmlađe fosilno gorivo. Njegova su ležišta mjesta na kojima se nakupilo i gdje bez prisutnosti zraka humificira uginulo bilje iz najbliže pliocenske i kvartarne prošlosti. Suvremena se tresetišta obično nalaze pod ustaljalim vodama kao što su močvarišta i slične zavodnjene površine.

Treset je laka, šupljikava, kompresibilna i elastična masa biljnih ostataka, pretežno od mnogostruko isprepletenih vlakana. Mekan je dok je vlažan, tvrdi i lako drobljiv kad je suh, smeđe, žućkaste i crne boje.

Unutar debljih naslaga treseta razlikuju se slojevi prema starosti i vrstama bilja. Obično je najmlađi treset vlaknast, lisnat ili mahovinast, a nešto stariji je gust, amorfan, smolinast ili jetrenast. Može se rezati i vaditi lopatom. Izvađeni treset, koji treba služiti kao gorivo u kućanstvu, prvo se gnječi i reže u komade poput opeka te suši na zraku. U svježem je tresetu maseni udio vode do 90%, a udio ugljika obično raste s dubinom sloja, odnosno u zavisnosti od stupnja pretvorbe (tabl. 3).

S obzirom na malu ogrjevnu moć treset nije rentabilno prevoziti, a najbolje se iskorišćuje izravno u termoelektranama izgrađenim uz velika nalazišta. Treset služi i za proizvodnju fenola, voskova, amonijaka, alkohola, nekih kiselina itd.

Najviše treseta imaju zemlje bivšeg SSSR i Sjeverne Amerike, zatim Finska, Švedska, Norveška, Nizozemska, Njemačka, Češka i Slovačka. U Hrvatskoj ga mjestimice ima u i uz rijeku Zrmanju te u šumama Slavonije.

Smeđi ugljen. Podjela i nomenklatura smeđeg ugljena nije jedinstvena. U nekim europskim zemljama ne luče lignit od ostalih vrsta smeđih ugljena i sve ih nazivaju smeđim ugljenima, dok u drugima sve smeđe ugljene zovu lignitom. U pojedinim pak zemljama i u nas udomaćen je naziv lignit za slabije vrste smeđeg ugljena s drvenastom strukturom.

Većina smeđih ugljena pripada humusnom ugljenu, a samo su neki liptobioliti i sapropeliti. Smeđi su ugljeni čvrste do zemljastohle strukture, svijetlosmeđe, smeđe do potpuno crne boje. Njihov je crt ili trag na nepocakljenoj porculanskoj ploči ponajviše smeđ. Za razliku od kamenog ugljena, pokazuju jasnu ligninsku (metoksilnu) reakciju, tj. pri zagrijavanju u kalijevoj lužini daju joj izrazito tamnu boju, a u razrijeđenoj nitratnoj (dušičnoj) kiselini svijetlocrvenu boju.

Vrlo bogatim ležištima raznovrsnog smeđeg ugljena raspolažu SAD, neke zemlje bivšeg SSSR, Kanada, Njemačka, Meksiko, Češka i Slovačka.

Smeđi se ugljen dijeli na ugljen s uklopcima drvenog sastava ili mekani smeđi ugljen, odnosno lignit, i na ugljen bez uklopaka drvenog sastava ili tvrdi smeđi ugljen. Lignit se dalje dijeli na zemljasti i škrljasti lignit, a tvrdi smeđi ugljen na obični, sjajni i zemljasti smeđi ugljen (tabl. 3).

Zemljasti lignit zemljaste je strukture, neravna i tupa prijeloma. Stajanjem na otvorenom gubi žutu ili smeđu boju, a gubitkom vlage mrvlji se i raspada. Pri otkopavanju daje dosta sitneži i prašine, a može se oplemeniti briketiranjem. Njegovi su karakteristični sastavni dijelovi uklopljeni fosilni komadi drva (*ksiliti*), koji se mogu lako izvaditi iz temeljne ugljene mase. U njima je drveno tkivo neznatno izmijenjeno. Ako nije žilavo, razmjerno se lako kida i lomi, a ponekad na prijelomu pokazuje svijetli sjaj. Dosta se takvih dijelova nalazi u lignitu iz Konjščine u Hrvatskom zagorju.

Škrljasti lignit ima škrljast prijelom, ne gubi boju i vrlo se rijetko raspada u prašinu. To je *tresetasti ugljen* u koji se svrstavaju neki naši najmlađi pliocenski ligniti iz gornjopontskih

i paludinskih naslaga u Posavini i Podravini. Pojedini slojevi sadrže i više od 50% treseta.

Obični (tamni) smeđi ugljen je kompaktna, smeđ ili crn, s tamnim sjajem na poprečnom vertikalnom prijelomu, dok su plohe na horizontalnom prijelomu često još tamnije. Ne raspada se u prah i ne gubi boju. Prijelom mu je četvrtast, rjeđe škrljast ili školjkast.

Sjajni (svijetli) smeđi ugljen najtvrdi je i najkompaktniji među smeđim ugljenima. Crn je i vanjskim izgledom nalikuje kamenom ugljenu. Ima svijetao kockast, četvrtast ili školjkast prijelom. U nas je takav ugljen u Krapini, Golubovcu i Zajezdi iz oligocena Hrvatskog zagorja te u Siveriću, Velušiću i Dubravicama iz gornjeg eocena i donjeg oligocena Dalmacije.

Zemljasti smeđi ugljen (švelni ugljen) vrsta je smeđeg ugljena podudarna s disodilom i piropisitom i bogata bitumenom. Amorfan je i prašinst, lako se drobi, žute je do smeđe boje. Često sadrži fosilne smole pa je prikladan za preradbu švelanjem.

Osim navedenih, ima i posebnih vrsta smeđeg ugljena. *Disodil* je kutikulski liptobiolit, papirni ili listasti ugljen bogat pepelom i bitumenom (uljnim škrljancima). *Piropisit* je smolni liptobiolit, mekan, zemljasta izgleda, svijetložute ili crvenožute do smeđe boje, s mnogo bituminoznih tvari, pojavljuje se u proslojcima između slojeva smeđeg ugljena. Gori bez vidljiva plamena, gustoća mu je malena ($0,8 \dots 1,1 \text{ g/cm}^3$), a važan je pri oplemenjivanju briketiranjem te za dobivanje parafina i nekih ulja. *Rabdopisit* je pepelom bogat varijetet piropisita. *Marahunit* je sapropelit smeđeg ugljena, zemljasta izgleda, žute boje i male gustoće ($0,92 \text{ g/cm}^3$). *Smolinasti ugljen* najkvalitetniji je smeđi ugljen, blizak kamenom, crn, sjajnih površina i ljušturasta loma. *Gagat* je također vrlo sjajan, a pod mikroskopom pokazuje podrijetlo drva (daskast ugljen) kojemu je staničje jako stisnuto. Dalja je značajka gagata velik udio bitumena (do 90%), velika tvrdoća i žilavost, zbog čega se vrlo lijepo obrađuje. Obično je uklopljen u bituminozne vapnence. Najpoznatija su nalazišta u Yorkshireu u Engleskoj, gdje on odavno služi za izradbu ukrasnih predmeta i nakita (crni jantar), a bogata su nalazišta i u Španjolskoj i zemljama bivšeg SSSR.

Kameni ugljen. Od smeđeg se ugljena kameni ugljen razlikuje po vanjskom izgledu, čvrstoj strukturi, obično crnoj ili rjeđe sivocrnoj i smeđesivoj boji, a posebno po crtu koji je crn. Kameni ugljen može biti sjajan, mutan ili vlaknat i često kockasta ili sitnoprizmatična prijeloma. Prema ishodišnoj tvari pripada pretežno humusnim ugljenima, a u manjoj mjeri sapropelitima i mješovitim tipovima. Prilikom zagrijavanja s kalijevom lužinom ili s razrijeđenom nitratnom kiselinom otopine ne mijenjaju boju, tj. ne pokazuju ligninsku reakciju. Destilat kamenih ugljena reagira alkalno, a smeđih ugljena kiselo. Za razliku od ekstrakta smeđeg ugljena, ekstrakt kamenog ugljena s vrućim benzenom ne fluorescira. Ti se ugljeni razlikuju i na temelju svoga sastava (tabl. 3). Maseni je udio vlage u kamenom ugljenu rijetko veći od 7%, u smeđem 15%, a u lignitu i veći od 40%. Tako, npr., kameni ugljen iz Raše sadrži 2...4% vlage, a lignit iz Konjščine više od 50%.

Najviše kamenog ugljena ima na teritoriju bivšeg SSSR (Donjeck, Kuznjeck), u SAD (appalachianski bazeni), Kini, Kanadi (Saskatchewan, Alberta), Njemačkoj (Ruhr, Saar), Velikoj Britaniji (Newcastle, Yorkshire, Južni Wales) i Poljskoj (Gornja Šleska), dok je u Hrvatskoj poznat rudnik Raša u Istri.

Pojedine se vrste kamenog ugljena razlikuju prema udjelu bitumena i hlapljivih sastojaka koji se dobivaju pri suhoj destilaciji. Prema tim se udjelima mogu prosuđivati i ostala svojstva ugljena kao što su tip plamena pri izgaranju, stvaranje dima i čađe, a s tim je u neposrednoj vezi i sposobnost ugljena za koksiranje i kvaliteta dobivenog koksa (tabl. 4). *Masni ugljen* (bogati bitumenom), u koji se ubraja koksni i kovački ugljen, daje kvalitetan metalurški koks. Od *plinskog ugljena* može se dobiti kvalitetan plin, pa se prije mnogo upotrebljavao u te svrhe. *Plameni ugljen* najmlađi je kameni ugljen, sadrži najviše hlapljivih sastojaka i gori dugim plamenom, pa je dobro gorivo za plamene peći. *Mršavi ugljen* (siromašan bitumenom) najstariji je kameni ugljen, sadrži manje ili sasvim malo hlapljivih sastojaka, gori kratkim, ali vrlo vrućim plamenom i ne čađi; prikladan je kao gorivo za kotlovnne uređaje i centralno loženje.

Tablica 4

KARAKTERISTIKE RAZLIČITIH VRSTA KAMENOG UGLJENA

Kameni ugljen	Plamen	Stvaranje dima i čađe	Hlapljivi sastojci %	Iscrpak koksa %	Izgled koksa
Plameni	dug	jako do srednje	37...45	50...60	sitan, sinteriran
Plinski	dug	jako do srednje	33...37	60...80	slabo pečen
Masni kovački	srednji	jako	26...33	68...74	dobro pečen
Masni koksni	kratak	jako	19...26	74...82	dobro pečen
Polumasni	kratak	srednje	15...19		slabo pečen
Mršavi	vrlo kratak	slabo	10...15	82...92	sitan, nepečen
Antracit	nema	nema	5...10	95	sitan, nepečen

Kameni ugljen iz Raše sadrži vrlo velik udio hlapljivih sastojaka (45...47%), što ga uz velik udio sumpora (~10%) čini neprikladnim za koksiranje, ali se iznimno može u tu svrhu upotrebljavati u smjesi s drugim vrstama ugljena.

Antracit se ubraja u mršave ugljene, sivocrme do crvenkaste je boje, metalnog sjaja i školjkasta prijeloma. Kompaktan je i amorfan, najveće gustoće među ugljenima ($1,4 \dots 1,7 \text{ g/cm}^3$), a gori dugo i teško (tabl. 3 i 4).

Antracit se nalazi na vrhu niza koji tvore još i poluantracit, mršavi, masni, plinski i plameni ugljen, što su viši stupnjevi poguljenjenja ili stupnjevi tzv. zrelosti ugljena. Ima ugljenonosnih bazena u kojima su prisutni svi članovi toga niza, npr. ruhrski bazen. Pojava da se u najdubljim dijelovima istoga bazena nalaze ugljeni koji su u procesu poguljenjenja dostigli najviši stupanj naziva se *Hiltovim pravilom* (prema belgijskom rudarskom inženjeru C. Hiltu).

Uz druge vrste kamenog ugljena u Engleskoj, Škotskoj, Francuskoj, Njemačkoj, Belgiji, Kanadi i SAD čest je i ugljen *kenel* (prema Cannel coal) ili *kandelit* (prema engl. candle svijeća), a zovu ga i lučni ili bakljeni ugljen jer se lako pali šibicom i gori sjajnim plamenom. To je zagasitotaman, mutan, sivocrm ili crn, vrlo kompaktna, čvrsta i žilav humitsko-sapropelni bituminozni ugljen, izvanredno bogat ugljikovodicima. Pogodan je za proizvodnju plina i raznih bitumenskih proizvoda. Dade se obrađivati rezanjem, glačanjem i poliranjem, što se primjenjuje u izradbi ukrasnih predmeta i nakita.

Ugljen *bogheda* (nazvan prema Bogheadu, mjestu u Škotskoj) crn je, smeđ ili siv, katkad i žut, vrlo tvrd i srodan kenelu; razlikuje se mikroskopskom strukturom, građen je od alga i ubraja se među sapropelite. Bogat je plinovima, destilacijom daje teške ugljikovodike i ulja, a lako se zapali. U podmoskovskom bazenu nalazi se u proslojcima i lećama unutar smeđih humusnih ugljena. Vrste bogate mineralnim sastojcima svrstavaju se u uljne (bituminozne) škrljavce, npr. kerozinski škrljavci u Australiji.

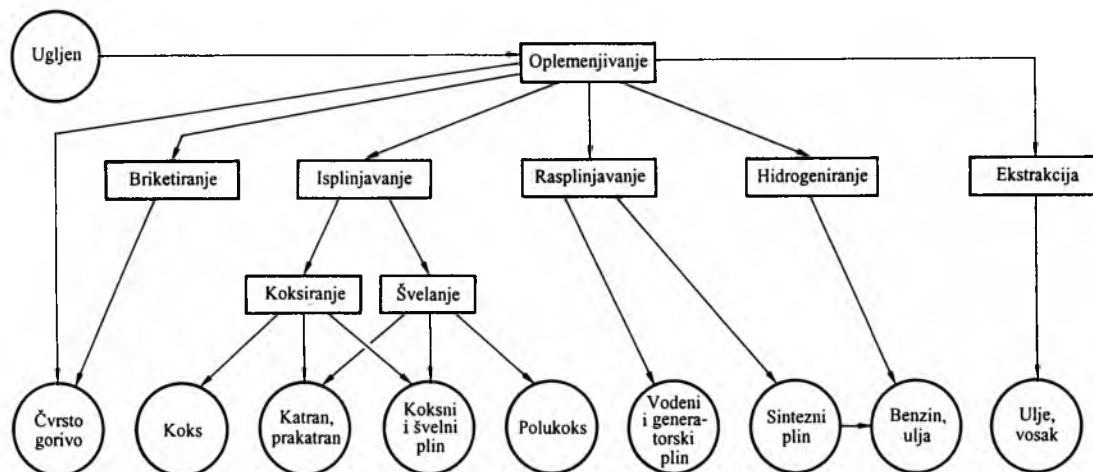
V. Kranjec

PRERADBA I UPOTREBA UGLJENA

Dva su glavna područja upotrebe ugljena: on se izravno (nakon oplemenjivanja, a katkada i briketiranja) upotrebljava kao gorivo ili se preraduje u mnoge korisne kemijske spojeve i industrijske proizvode (sl. 1).

Mehanička preradba ugljena obuhvaća njegovo *oplemenjivanje* (odvajanje korisnih od nekorisnih sastojaka), promjenu granulacije i klasiranje (v. *Oplemenjivanje mineralnih sirovina*, TE 9, str. 613) te *briketiranje*, okrupnjavanje sitnozrnatog ili prašinstanog ugljena primjenom tlaka, katkad i uz vezivo (v. *Briketiranje*, TE 2, str. 153).

Kemijska preradba ugljena obuhvaća rasplinjavanje, hidrogenaciju, ekstrakciju i isplinjavanje. *Rasplinjavanje* je kemijski proces u kojem se užareni ugljen dovodi u dodir sa zrakom, vodenom parom, smjesom zraka i vodene pare ili smjesom kisika i vodene pare, a kao glavni proizvodi reakcije nastaju različiti tehnički plinovi (v. *Plinski generatori*, TE 10, str. 387). *Hidrogenacijom* ugljena vodikom pri višoj temperaturi i pri tlaku i do 100 MPa uz katalizator dobivaju se tekući ugljikovodici, uglavnom benzin i srednje ulje (v. *Hidrogenacija*, TE 6, str. 392). *Ekstrakcijom*



Sl. 1. Shema preradbe ugljena

ugljena naziva se blaga neizravna hidrogenacija pomoću otapala koja otpuštaju vodik, a dobivaju se ekološki vrijedna tekuća pogonska goriva bez sumpora i mineralnih tvari koje ostavljaju pepeo. Bituminozne tvari iz ugljena ekstrahiraju se benzenom, a među proizvodima je i montan-vosak (v. *Voskovi*).

Isplinjavanje je suha destilacija, zagrijavanje bez pristupa zraka (v. *Plinski generatori*, TE 10, str. 387). Pritom ugljen ne može izgorjeti, nego se pirolitički razgrađuje i otpušta hlapljive sastojke, od kojih se dobiju gorivi plin i tekući destilacijski proizvodi, u prvom redu katran, a kao čvrsti proizvod ostaje koks ili polukoks. Već prema temperaturi isplinjavanja razlikuje se švelanje i koksiranje.

Švelanje je niskotemperaturno isplinjavanje ugljena (pri 500...600 °C). To je suha destilacija koja se zaustavlja pri temperaturi pri kojoj nastale katranske pare još sadrže spojeve u njihovom nepromijenjenom obliku, tj. kao alifatske ugljikovodike. Zbog toga se takav švelni katran naziva primarnim katranom (prakatranom). Za razliku od njega, katran koji se dobiva isplinjavanjem ugljena na višoj temperaturi sadrži pretežno aromatske spojeve (v. *Katran*, TE 6, str. 733).

Za švelanje se u prvom redu uzima smeđi ugljen, i to onaj koji daje najmanje 12% katrana, a ostavlja najviše do 20% pepela. Švelanje kamenog ugljena mnogo je manje važno te se provodi rijetko i samo s onim vrstama koje nisu prikladne za koksiranje. Ugljen za švelanje mora biti prije toga briketiran, a u švelnim se pećima može različito zagrijavati: toplina se ili prenosi neizravno kroz ogrjevnu plohu ili se ugljen dovodi u dodir s nosiocem topline, što može biti neki vrući plin (sl. 2) ili fini vrući koks u kružnom toku. Glavni proizvodi švelanja jesu polukoks i švelni katran.

polukoks kamenog ugljena. Polukoks je premale čvrstoće i nije prikladan za primjenu u metalurgiji.

Švelni katran kamenog ugljena mekana je i tamna masa tališta 25...35 °C i gustoće 0,85...0,91 g/cm³. Sadrži uglavnom alifatske ugljikovodike, uz nešto dušikovih i sumpornih spojeva, a pregrađuje se frakcijskom destilacijom (v. *Katran*, TE 6, str. 739).

Švelni plin različitog je sastava, već prema odabranom postupku švelanja. Obično sadrži 10...15% metana, 5...10% ugljičnog monoksida, 15...20% ugljičnog dioksida, ~10% vodika i do 50% dušika. Zbog male toplinske vrijednosti uglavnom se upotrebljava za loženje švelnih peći. Iz *švelne vode*, koja nastaje kao nepoželjan proizvod švelanja, mogu se izdvojiti fenol, krezoli i ksilenoli.

Koksiranje je visokotemperaturno isplinjavanje ugljena, suha destilacija pri temperaturi 900...1200 °C. Kao sirovina u prvom redu služi masni kameni ugljen, a glavni je proizvod koks, dok su sporedni proizvodi katran, koksni plin i destilacijska voda. Od 1000 kg ugljena dobiva se 720...780 kg koksa i 280...325 m³ hlapljivih tvari, iz kojih se može izdvojiti 30...35 kg katrana i do 10 kg amonijaka, benzena i naftalena, a preostaje čisti koksni plin.

Katran kamenog ugljena bogat je izvor različitih vrlo vrijednih organskih spojeva, koji se iz njega dobivaju destilacijom (v. *Katran*, TE 6, str. 733). Upravo je kemija katrana bila temelj za silan razvoj organske kemije u drugoj polovici XIX. stoljeća.

Koksni plin (kokerijski, jaki, daljinski plin) sadrži pretežno vodik i metan uz manje količine drugih plinovitih ugljikovodika, dušika i ugljikovih oksida. Iz njega se izdvajaju uglavnom metan, etan i etilen, a ostatak se upotrebljava kao gorivi plin (v. *Plinski generatori*, TE 10, str. 388).

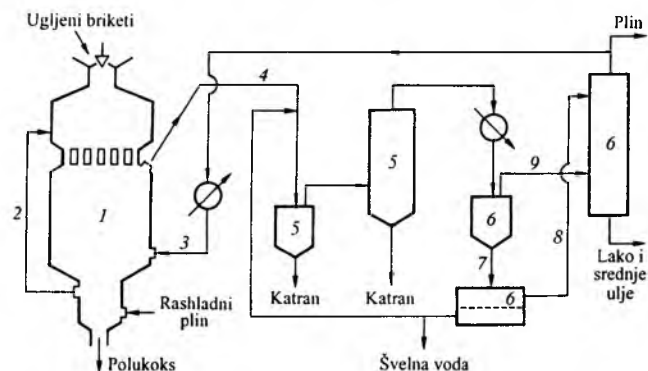
Destilacijska voda otopina je različitih amonijevih soli, iz koje se zagrijavanjem i djelovanjem vapna može dobiti amonijak.

Koks

Koks je čvrsti ostatak visokotemperaturnog isplinjavanja ugljena. Razlikuje se *metalurški* i *ljevaonički koks*. Oba se dobivaju od istih sirovina (masni kameni ugljen), proizvode se u koksarama i u jednakim postrojenjima. Razlika je, međutim, u temperaturi i trajanju koksiranja (metalurški koks pri 900...1000 °C, ljevaonički koks dulje vremena pri 1000...1200 °C), što utječe i na njihova svojstva. Metalurški je koks porozniji i reaktivniji, što je potrebno za proizvodnju željeza u visokim pećima, dok je ljevaonički koks kompaktniji, vrlo tvrd i slabije se isplinjuje, što su svojstva koja mu daju prednost u ljevaonicama.

Čini se da je koks poznat čovjeku više od 2000 godina, ali do XVI. stoljeća nema mnogo podataka o njegovoj proizvodnji. Zamjena drvenog ugljena koksom smatra se prijelomnim događajem u razviku proizvodnje željeza. Pouzdano se zna da je A. Darby, Jr. proizveo željezo u visokoj peći upotrebom koksa već 1753. godine.

U početku se ugljen koksirao u gomilama pokrivenim blatom, a dobivena količina koksa iznosila je do 1/3 ukupno utrošenog ugljena. S vremenom se oko takvih gomila počeo graditi zid i praviti kanali za dovod zraka i odvod dimnih plinova, a količina dobivenog koksa povećala se i do 50% od ukupno utrošenog ugljena. Tako se razvila peć oblika košnice izgrađena od vatrostalnog materijala. Nešto poslije razvijaju se vertikalne i horizontalne zatvorene komore, najčešće pravokutna oblika, u kojima se za dobivanje topline više ne upotrebljava ugljen, nego se zagrijavaju izvana izgaranjem plinova koji izlaze iz komore. Više takvih komora



Sl. 2. Švelanje uz prijenos topline vrućim plinom. 1 švelna peć, 2 plin za sušenje, 3 vrući plin (700 °C), 4 plinoviti proizvodi, 5 odjeljivači katrana, 6 odjeljivači ulja, 7 srednje ulje i švelna voda, 8 srednje ulje, 9 lako ulje i plin

Polukoks (švelni koks) je čvrsti ostatak nakon švelanja smeđeg ugljena. To je zagasitocrn i porozan zrnati proizvod sklon samozapaljenju, izgara bez dima i čađe. Upotrebljava se za pripremu sinteznog plina te kao gorivo za toplane i za kućanstva u tzv. trajnožarećim pećima (*grudekoks*). Slična svojstva i upotrebu ima i

poredanih paralelno i međusobno povezanih činilo je bateriju. U prvo se vrijeme između susjednih koksnih komora ugrađivala tzv. zagrijevna komora, u kojoj je izgarao koksni plin. H. Koppers razvija 1911. konstrukciju zagrijevne komore koja se može zagrijavati koksničkim plinom ili kojim drugim plinom manje ogrjevne moći.

U Hrvatskoj je u okviru Željezare Sisak izgrađena 1978. koksara u Bakru s godišnjim proizvodnim kapacitetom od 850 000 t koks. Odlukom vlade koksara je kao veliki zagađivač okoliša prestala s radom 1994. godine.

Koks je glavni izvor topline i najvažnija je pomoćna sirovina za proizvodnju željeza u visokoj peći (v. *Gvožđe*, TE 6, str. 309). Koks se ulaže (zasipa) na vrhu visoke peći i spušta se, zajedno s ostalim sastojcima smjese za proizvodnju željeza – rudom i taliteljem, nepromijenjen sve do područja sagorijevanja u razini sapnica gnijezda (pećice) visoke peći. Na tom mjestu ugljik iz kokska vrlo intenzivno izgara u kisiku iz zraka, koji se zagrijan upuhuje u peć, oslobađajući velike količine topline dostatne za taljenje. Temperatura u području izgaranja dostiže i 2200 °C. Izgaranjem nastaje velika količina plina, u prvom redu ugljičnog monoksida, koji sudjeluje u daljoj redukciji rude. Jedan dio ugljika iz kokska služi za izravnu redukciju metala na temperaturama višim od 1000 °C.

Koks u visokoj peći ima, zahvaljujući svojoj zrnatosti i poroznosti, i ulogu rešetke koja omogućuje strujanje plinova iz donjih prema gornjim dijelovima visoke peći. To je posebice izrazeno u tzv. sedlu, u kojem je temperatura već viša od 1000 °C, a smjesa je u polurastaljenom (plastičnom) stanju.

Osim u metalurgiji, koks se upotrebljava kao sirovina u kemijskim sintezama (npr. u proizvodnji kalcijeva karbida), u proizvodnji ugljičnih materijala (opeke i elektrode), kao gorivo u industriji cementa i vapna, kao punilo apsorpcijskih tornjeva, kao gorivo za loženje itd. Prije se u plinarama prilikom proizvodnje plina od plinskog ugljena dobivao i *plinarski koks* kao sporedni proizvod, a služio je kao gorivo za centralno loženje i za rasplinjavanje.

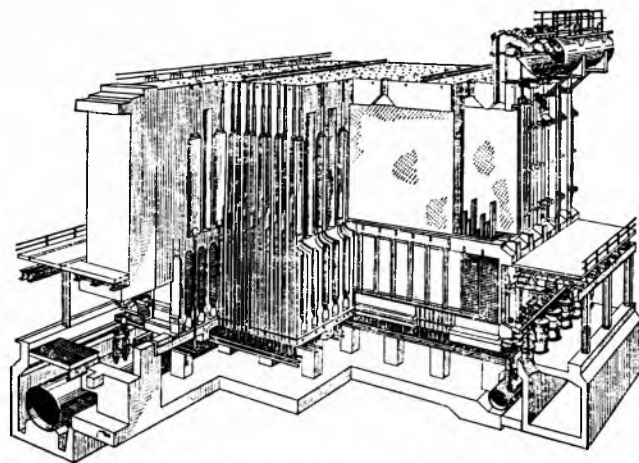
Ugljen za koksiranje. Kvaliteta kokska izravno ovisi o svojstvima ugljena od kojeg je dobiven. Da bi neki ugljen bio prikladan za koksiranje, u prvom je redu potrebno da se pri termičkom raspadu, uz oslobađanje plinova i katranskih para, može smekšati u masu plastičnih svojstava, a nakon hlađenja dati dovoljno porozne čvrste tvari s mnogo ugljika. Suprotno tome, koks dobre kvalitete ne može se dobiti ako velik dio bitumena pri taljenju ispari ili se raspadne još prije taljenja. Osim toga, važna su i neka druga svojstva. Tako udio sumpora treba biti što manji jer on vrlo negativno djeluje na svojstva i kvalitetu kokska. Jedan se dio sumpora uklanja iz ugljena tijekom koksiranja, ali u koksu ipak zaostaje 75–80% prvobitnog sumpora. Udio vlage u ugljenu ne smije biti manji od 5%, jer previše suh ugljen ne leži u peći dovoljno zbijeno pa daje koks manje čvrstoće, a ni veći od 12%, jer se tada smanjuje produktivnost koksne peći. Dobro je da nema ni mnogo mineralnih sastojaka kako nakon izgaranja ne bi ostajalo mnogo pepela, pa ugljen treba stoga sadržavati 75–90% ugljika, 5–6% vodika i 5–10% kisika. Konačno, povoljno je da je udio hlapljivih tvari 20–35%.

Za proizvodnju kokska najprikladniji je masni kameni ugljen, posebno koksni (kokerijski), a donekle i kovački, koji daju dobro

pečeni koks optimalne poroznosti (tabl. 3 i 4). Prije koksiranja ugljen se mora usitniti do veličine zrna manje od 10 mm (većinom 2–3 mm).

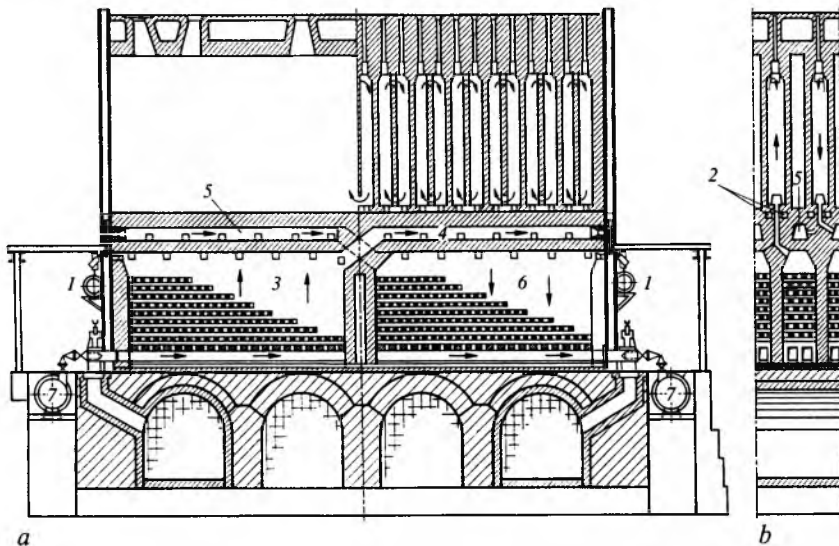
Ostale vrste kamenog ugljena daju koks slabije kvalitete. Koks plinskog ugljena slabo je pečen, plameni ugljen daje sitan i sintiran koks, dok se koksiranjem mršavog ugljena i antracita dobije sitan, nepečeni koks. Međutim, pokazalo se da se dovoljno kvalitetan koks može dobiti ako se uz one najbolje upotrijebe i druge vrste kamenog ugljena, koje se prije koksiranja dobro usitne i smiješaju u prikladnom omjeru.

Koksná peć. Koks se proizvodi u koksari, a savremena peć za koksiranje (*koksná, kokerijska peć*) sastoji se od više komora karakterističnih izmjera (sl. 3): duljina je komora 10–12 m, visina 2–4 m, ali su vrlo uske, samo 35–50 cm. Obujam im je 20–55 m³, obložene su silikatnim opekama i pune se ugljenom odozgo. Duljina i visina ovisе o potrebnom kapacitetu, a širina je uvjetovana vrstom ugljena, njegovom granulacijom i trajanjem koksiranja. Između pojedinih se komora, uz njihovu dulju stranu, nalaze međuprostori u kojima izgaraju plinovi i zagrijavaju stijenke komora. Takvu bateriju od 40–80 komora poslužuju i uređaji za usip ugljena, istiskivanje gotovog kokska i njegovo hlađenje.



Sl. 3. Presjek koksné peći u različitim ravninama

Prije su se koksne peći zagrijavale toplinom od izgaranja destilacijskih plinova koji su se dobivali iz ugljena pri samom koksiranju. Tako se, međutim, gubio plin koji se može i korisnije upotrijebiti. Danas za koksiranje služe *regenerativne koksne peći* u kojima se vrijedan destilacijski plin ne spaljuje nego samo služi za predgrijavanje zraka i goriva (sl. 4), a kao gorivo uzima se manje kaloričan i jeftiniji generatorski plin. Zrak i gorivo prolaze prije spaljivanja kroz komoru s vatrostalnim opekama koje su u prethodnoj radnoj fazi bile zagrijane, pa se pritom i oni zagri-



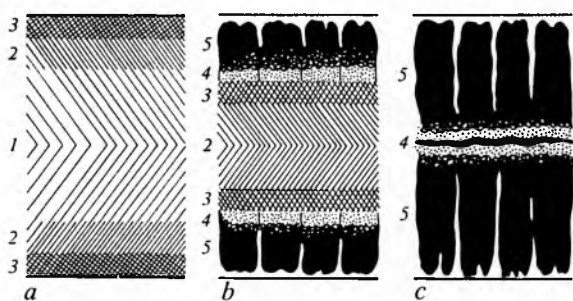
Sl. 4. Uzdužni (a) i poprečni presjek (b) regenerativne koksné peći s cirkulacijom (tvrta Koppers). 1 plinovod koksnog plina za loženje, 2 horizontalni kanali iznad regeneratora, 3 lijevi regeneratori, 4 i 5 kanali za (vrući) zrak, 6 desni regeneratori, 7 cijev za loživi plin

javaju. Istodobno se vrući destilacijski plinovi vode kroz drugu komoru i svoju toplinu prenose na opeke u njoj. Nakon određenog se vremena smjer strujanja ulaznih i izlaznih plinova obrne, tako da ulazni plinovi uvijek struje preko vrućih opeka.

Proizvodnja koksa. Pri suhoj destilaciji ugljena prikladnog za koksiranj postupno se zbivaju ovi procesi: do 200 °C isparuje vlaga i izlazi uklopljeni (okludirani) zrak, na temperaturi višoj od 200 °C ugljen se počinje razgrađivati; sumpor se izdvaja u obliku sumporovodika, dio se kisika spaja s ugljikom u ugljični dioksid, manji dio vodene pare reagira s užarenim koksom i daje vodeni plin, a drugi dio reagira s dušikom i spaja se u amonijak. Iz isparljivih dušikovih spojeva nastaje piridin i druge dušične baze, a dio amonijaka prelazi u dicijan, C_2N_2 . Na 300 °C izdvajaju se plinoviti ugljikovodici i ugljični monoksid, a zatim se prvobitno nastali ugljikovodici raspadaju na metan, etilen i benzen. Na 350 °C počinju izlaziti katranske pare (pare teških ugljikovodika), što se završava na ~480 °C. Na 500 °C i višoj temperaturi izlaze još samo plinovi, u kojima je sve više vodika. Pri ~600 °C prvobitno nastali alifatski ugljikovodici počinju se konvertirati u aromatske. Prema tome, koksnii plin sadrži mnogo metana i vodika, manje ugljičnog monoksida, malo teških ugljikovodika, dušika, ugljičnog dioksida, amonijaka i cijanovodika, a uz njih i vodenu paru i pare benzena te katrana, koji se pretežno sastoji od aromatskih ugljikovodika.

Istodobno s razgrađnjom, bitumen pri temperaturi 350·400 °C omekšava i postaje plastičan (sl. 5). Porastom temperature nastala plastična zona putuje prema sredini ugljene mase, a na rubovima pri temperaturi 400·430 °C opet počinje očvršćivanje, pa prvo nastaje polukoks, a na još višim temperaturama i koks kao konačni proizvod. Pojedini se petrografski sastavni dijelovi ugljena pri tim pretvorbama različito ponašaju, pa se, npr., vitrit lako tali, durit slabo, dok se fuzit uopće ne tali.

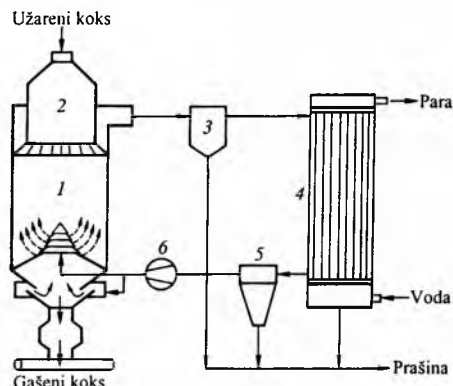
Stvaranje previše sitnog, prašinstog koksa može se spriječiti ako je početno zagrijavanje u peći dovoljno brzo. Zbog toga se ugljen puni izravno u već užarenu peć, pa se brzo zagrije do 300 °C, čime se sprečava oksidacija. Od 300·500 °C zagrijava se polaganije, a zatim opet brzo, kako bi se onemogućilo da svi hlapljivi sastojci izađu i kako bi se dobilo što više koksa. Za metalurški je koks vrijeme zagrijavanja 14·20 sati, dok je za ljevaonički koks, gdje je poželjna крупnija granulacija, vrijeme zagrijavanja nešto dulje, 22 sata, a i konačne su temperature više, do 1 200 °C. Nakon završenog procesa užareni se koks, koksnii kolač, istisne iz peći i pritom se obično raspadne po sredini, po tzv. koksnom šavu, koji tijekom koksiranj nastaje difuzijom vlage i katrana prema hladnijoj unutrašnjosti.



Sl. 5. Shematski prikaz koksiranj prema T. Dammu. a početni, b srednji, c konačni stadij. 1 vlažan i hladan ugljen (20 °C), 2 suhi ugljen (do 200 °C), 3 plastična, omekšala masa, 4 polukoks, 5 koks

Hlađenje koksa. Kad se užareni koks istisne iz komore, mora se odmah ohladiti (ugasiti), jer bi inače u dodiru s kisikom iz zraka izgorio. Zato se ubacuje u kola i vozi ispod tornja s tuševima, gdje se zatim gasi štrcanjem rashladne vode (2,8·4,0 m³ po toni koksa). Postupak je termodinamički i ekološki nepovoljan i povećava se udio vlage u koksu, što mu smanjuje vrijednost, a povećavaju se i troškovi pri njegovoj upotrebi. Potkraj 1970-ih godina pojavljuju se prijedlozi za tzv. suho gašenje plinom: koks u komori tipa jamne peći hladi se protustrujno nekim prikladnim plinom bez kisika, npr. plinom iz visoke peći, kao u postupku Didier Otto. U postupku Giprokoks uvedena je pretkomora, čime je postignut ravnomjeran

hod cijelog postrojenja (sl. 6), a postupak Mitsubishi razlikuje se od ostalih hlađenjem koksa na rotirajućoj platformi u protustruji plina.



Sl. 6. Postupak Giprokoks za hlađenje koksa. 1 bunker za hlađenje, 2 pretkomora, 3 grubi ciklon, 4 izmjenjivač topline, 5 fini ciklon, 6 kompresor

Nakon hlađenja koks se klasira u 4 klase: a) klasa s promjerom pojedinih komada >40 mm metalurški je koks za visoke i kupolne peći, b) s promjerom 20·40 mm, tzv. orah, za metalurgiju obojenih metala, proizvodnju elektroda i vatrostalnih materijala, c) s promjerom 10·20 mm sitni koks za elektroredukcijske peći u proizvodnji željeza, d) s promjerom do 10 mm koks za sinteriranje.

Porast proizvodnje čelika, a time i potrošnje koksa, energetska kriza i nastojanja nerazvijenih zemalja da izgrade vlastitu proizvodnju čelika uzroci su promjena u mogućnostima i uvjetima nabave kvalitetnog koksirajućeg ugljena. Zbog toga su povećani napor za prilagođivanje klasičnog postupka koksiranj slabokoksirajućim vrstama ugljena te za pronalaženje novih postupaka za primjenu takvih vrsta ugljena za proizvodnju metalurškog koksa ili metalurškog goriva u kojem drugom obliku.

Samo su neki od tih postupaka dosada našli industrijsku primjenu, ali su i oni zanimljivi samo kao specifična rješenja za uvjete pojedinih zemalja ili regija. Tako se u jednom stupnju niskotemperaturno koksiraju visokohlapljivi slabokoksirajući ugljen, a dobiva se sitan, mehanički slab koks, prikladan za sinteriranje ili za upotrebu u kemijskoj industriji. Ako se radi u dva stupnja, onda se u prvom slabokoksirajući kameni ugljen u smjesi s koksirajućim ugljenom prvo briketira, a u drugom se stupnju briketi podvrgavaju srednjetermaturnom (650·850 °C) ili visokotemperaturnom koksiranj (japanski postupak Sumicoal). Poznat je i trostupanski postupak: u prvom se stupnju ugljen podvrgava švelanju, u drugom se švelni koks briketira uz dodatak organskih veziva, a u trećem se proizvod srednjetermaturno koksirajućeg ugljena.

Ispituje se i mogućnost dodavanja manjeg dijela smeđeg ugljena u smjesu koksirajućih ugljena te primjena trostupanskog postupka za dobivanje oblikovanog koksa uz upotrebu smeđeg ugljena.

Sastav koksa. Za upotrebu koksa važan je udio ugljika, mineralnih tvari koje daju pepeo, hlapljivih sastojaka, sumpora i vlage, što se u praksi naziva tehničkim sastavom koksa. Od ugljika je važan tzv. stalni ugljik, tj. onaj dio koji ostaje na raspolaganju za reakciju u visokoj peći. Što je takvog ugljika više, vrijednost je koksa veća, a obično ga ima 84·89%, odnosno 96·97% ako se računa samo sa čistom gorivom tvari.

Maseni udio mineralnih sastojaka (pepela) u koksu iznosi 9·12% i uvijek je za 3·3,5% veći nego u ishodišnom ugljenu zbog izdvajanja hlapljivih sastojaka tijekom koksiranj. Povećanjem udjela pepela u koksu za 1% povećava se njegova potrošnja u visokoj peći za 1,5·2%. Isto vrijedi i za sumpor koji je važan za metaluršku i ekonomsku vrijednost koksa. Više sumpora u koksu, a najviše ga smije biti do 1%, traži i veću potrošnju koksa u visokoj peći. Povećanjem udjela sumpora u koksu za 0,1% povećava se potrošnja koksa za 1,5·1,8%.

Ukupni je udio hlapljivih sastojaka u koksu 0,5·1,2%, a od toga je približno 50% ugljičnog monoksida, 30% vodika, 10% ugljičnog dioksida, 3% dušika i 2% metana. Na temelju udjela

hlapljivih sastojaka procjenjuje se stupanj pečenosti koksa. Veći udio tih tvari pokazuje na nedovoljno koksiranje, zbog čega su mehanička svojstva koksa lošija, dok manji udio pokazuje na prepečenost koksa, čime mu se zbog većeg broja pukotina smanjuje čvrstoća.

Koks nije higroskopan pa udio vlage ovisi o načinu njegova hlađenja i iznosi 2...5% nakon mokrog, a 0,2...0,4% nakon suhog gašenja. Jednolična vlažnost važnija je od apsolutne vrijednosti, jer se u visoku peć obično dozira uvijek jednaka masa koksa, pa svaka neujednačenost u udjelu vlage uzrokuje promjenu mase suhog koksa, te promjenu tehnološkog procesa i sastava željeza kao proizvoda tog procesa.

Kemijska svojstva. Pod reaktivnosti koksa smatra se njegova sposobnost da u užarenom stanju reagira s ugljičnim dioksidom. Za dobro iskorištenje koksa nije poželjno da je on previše reaktivan. Što je reaktivnost veća, ugljični dioksid će pri temperaturi nižoj od 900...1000°C lakše stupiti u reakciju s koksom, zbog čega se smanjuje iskorištenje ugljičnog monoksida i povećava potrošnja koksa. Za dobar rad visoke peći potreban je slabije reaktivan i krupan koks. On je u trupu visoke peći kemijski stabilniji i omogućuje visok stupanj iskorištenja ugljičnog monoksida, dok u gnijezdu visoke peći osigurava širu zonu izgaranja i ravnomjernu raspodjelu protoka plina.

Fizikalna i mehanička svojstva. Mnoga su fizikalna i mehanička svojstva koksa važna za ocjenu njegove kvalitete i prikladnosti za upotrebu. Metalurški koks mora zadržati svoja dobra mehanička svojstva i na temperaturama višim od 1500°C, posebno u donjem dijelu visoke peći, gdje mora postojati dobra propusnost za plinove. Dobro pečeni koks je komadast, srebrenosive boje s metalnim sjajem. Na udarac se čuje jasan zvuk.

Temperatura paljenja koksa ovisi o njegovoj reaktivnosti i o udjelu hlapljivih tvari, a obično je 650...700°C.

Ogrjevna moć ovisi o udjelu pojedinih elemenata, pepela i vlage, a iznosi 29...33,5 MJ/kg.

Čvrstoća i otpornost na habanje utvrđuje se standardnom metodom rotiranja koksa određene granulacije u čeličnom bubnju. Udio koksa koji je zadržao istu granulaciju nakon određenog broja okretaja pokazatelj je čvrstoće, dok se na temelju količine nastale sitneži ocjenjuje otpornost na habanje. Koks za visoku peć ne smije se drobiti pod pritiskom punjenja peći, pa tlačna čvrstoća mora biti 12...20 MPa.

Granulometrijski sastav. Poželjno je da koks ima određeni i što ravnomjerniji granulometrijski sastav. Posebno je to važno s obzirom na propusnost za plinove, na koju nepovoljno utječu sitne frakcije koksa (< 20 mm). U novije se doba u visokoj peći najčešće radi s granulacijom 20...60 mm.

Poroznost koksa utječe na mehaničku otpornost i na reaktivnost, a izražava se obujamnim udjelom pora manjih od 0,4 mm. Za koks dobre kvalitete poroznost je 54...55%. Za metalurški su koks, naime, važne vrlo sitne šupljine koje mu omogućuju da apsorbira plinove i da s njima reagira, a ne smanjuju njegovu mehaničku čvrstoću. Takav je koks reaktivniji prema ugljičnom dioksidu i lakše stvara ugljični monoksid, što je važno za njegovu upotrebu u visokoj peći. Međutim, gust i zbijen koks lakše izgara, što odgovara potrebama ljevaonica.

Nasipna masa parametar je propusnosti plinova i ocjena stupnja pečenosti koksa. Ovisi o granulometrijskom sastavu, poroznosti i udjelu hlapljivih sastojaka. Nasipna je masa koksa dobre kvalitete 450...470 kg/m³.

Često se za ocjenu kvalitete koksa primjenjuju i složeniji pokazatelji kojima je istodobno obuhvaćeno više pojedinačnih svojstava i koji mnogo bolje karakteriziraju koks. To su, npr., Grafov i Ilsederov vrijednosni broj koksa, pokazatelji propusnosti po Siskovu itd.

B. Kozelj A. Markotić

ZALIHE I PROIZVODNJA UGLJENA U SVIJETU

S obzirom na stratigrafsku pripadnost slojeva, najveće zalihe (rezerve) ugljena sadrže tercijarne naslage, zatim karbonske i permske, dok s mnogo manjim udjelima slijede ostale naslage (tabl. 5). Kako pokazuju samo relativne količine, ti podaci ne mogu služiti ni za kakvu drugu usporedbu, jer se npr. karbonski

ugljeni mogu s tercijarnim ugljenima, po energetskim i drugim svojstvima, samo iznimno usporediti i ustanoviti jednakovrijednima. U nekim su područjima ugljenonosne čak i najstarije (prekambrijske) naslage, ali većinom s toliko metamorfoziranom ugljenom tvari da ona nije goriva.

Ugljene se zalihe u pojedinim zemljama donekle različito računavaju i stoga njihovo iskazivanje nije sasvim ujednačeno. One se najčešće dijele po kategorijama ili stupnjevima istraživosti (v. *Rudarstvo, istražni radovi*, TE 11, str. 593). Sve se zalihe obično ne mogu rentabilno otkopati, što ovisi o primijenjenim rudarskotehničkim postupcima, gubicima pri površinskim i osobito jamskim radovima, ograničenom dosegu u dubinu (jednom se zalihe računaju do 700 m, drugi put do 1000 m ili dublje od 1000 m), mogućoj primjeni podzemne plinifikacije i o još nekim elementima.

Tablica 5

SVJETSKE ZALIHE UGLJENA PREMA GEOLOŠKOJ STAROSTI PROIZVODNIH NASLAGA

Proizvodne naslage	Udio zaliha %
Tercijarne	54,5
Karbonske	23,5
Permske	17,0
Jurske	4,0
Trijaskne	0,5
Kredne	0,4
Starije paleozojske	0,1
<i>Ukupno</i>	100,0

Detaljnije se zalihe iskazuju po pojedinim vrstama ugljena ili se iz praktičnih razloga sve vrste svode na zajedničku mjeru, tzv. *ekvivalentni ili uvjetni ugljen*. Jedna tona ekvivalentnog ugljena odgovara količini energije koju ima jedna tona ugljena s ogrjevnom moći 29,3 MJ/kg. Pritom također postoje razlike, jer se npr. lignit u nekim zemljama deklarira s koeficijentom ogrjevne moći kamenog ugljena 0,3, a u drugim i do 0,6. Ipak, iznos se ukupnih zaliha dosad povećavao, jer su novootkrivene količine bile veće od proizvedenih.

U 1970. godini procijenjeno je (v. *Energija i energetika*, TE 5, str. 325) da su *ukupne svjetske zalihe* iznosile $(16 \cdot 10^{12} \text{ t})$ (16 000...16 500 milijardi tona), a 1985. da premašuju $20 \cdot 10^{12}$ t ugljena svih kategorija i vrsta. Dakako, dokazane su zalihe manje. Od ukupnih se svjetskih zaliha na bivši SSSR odnosi ~43% ($8,669 \cdot 10^{12}$ t), SAD 19% ($3,839 \cdot 10^{12}$ t), Kinu 10%, Kanadu 7,5%, Njemačku 2,5%, Veliku Britaniju 1,2% itd. Podatci iz Kine za 1985. godinu navode silno povećanje zaliha te zemlje (čak $9 \cdot 10^{12}$ t), što znači i dalje povećanje ukupnih svjetskih rezervi na više od $27 \cdot 10^{12}$ t i prvo mjesto Kine na svjetskoj listi. Važna je i *struktura zaliha*. Tako se, npr., gotovo sve zalihe Velike Britanije ($\sim 0,2 \cdot 10^{12}$ t) sastoje od kamenog ugljena i antracita karbonske starosti, dok u ostalim zemljama s velikim zalihama tek 60...75% otpada na takve vrste ugljena.

Svjetska je proizvodnja svih vrsta ugljena u 1970. godini bila dvostruko veća, a 1985. oko dva i pol puta veća od one u 1930. godini. Prije se proizvodio pretežno kameni ugljen (80%), a tek od 1955. udio proizvodnje smeđeg ugljena premašuje 30%. Računa se da je do 1990. u cijelom svijetu otkopano $\sim 195 \cdot 10^9$ t ugljena.

Najveći su proizvođači u svijetu 1980-ih godina bili Kina, SSSR, SAD, SR Njemačka, Poljska i Njemačka DR. To su ujedno bili i glavni izvoznici ugljena. U pojedinim je vodećim i drugim zemljama od 1960. do 1977., pa i nekoliko sljedećih godina, proizvodnja prilično varirala ili stagnirala. Bilo je to doba dominacije i sve veće potrošnje nafte. Tako se 1980-ih godina u SSSR godišnje stalno proizvodilo $(500 \cdot 600) \cdot 10^6$ t svih vrsta ugljena, iako je za te godine planiran porast proizvodnje na $1200 \cdot 10^6$ t. U Kini se također godišnje proizvodilo do $800 \cdot 10^6$ t, a u SAD $700 \cdot 10^6$ t, iako se u Kini predviđao porast na $1000 \cdot 10^6$ t, a u SAD $800 \cdot 10^6$ t. Dakle, te su tri zemlje davale više od polovice svjetske proizvodnje. U Velikoj Britaniji se čak nastavio pad godišnje proizvodnje i poslije 1980. na manje od $200 \cdot 10^6$ t, iako je ona taj iznos

dostigla već 1947. godine. U SSSR, Kini i Velikoj Britaniji najizrazitije se opazio utjecaj otkrivanja velikih zaliha i povećanja vlastite proizvodnje nafte i plina. Osim toga, SSSR se posebno usmjerio i na proizvodnju energije iz nuklearnih elektrana.

U Hrvatskoj je u razdoblju od 1975–1990. provedena valorizacija ugljenih rezervi uz dopunska istraživanja za potvrdu već poznatih i pronalazjenja novih rezervi (sl. 7). Time se pokazalo da rezerve lignita u Hrvatskoj iznose $225 \cdot 10^6$ t, a nalaze se u konjščinskom bazenu (lokaliteti Poljanica-Sušobreg, Vrbovo, Batina), ivanečko-ladanjskom bazenu, Vukomeričkim goricama, u koprivničko-križevačko-bilogorskom bazenu (lokaliteti Petrov Dol, Vojakovački Kloštar), posavskom bazenu, na području Koruna i Banije (lokalitet Pješćanica) te u Dalmaciji (lokaliteti Košute-Turjaci, Sinj). Rezerve smeđeg ugljena (bez lignita) iznose $37 \cdot 10^6$ t (Bukovica i Siverić u prominskom bazenu, Murško Središće), a kamenog ugljena $4 \cdot 10^6$ t (Pićan-Tupljak u Istri).



Sl. 7. Ugljeni bazeni u Hrvatskoj. 1 istarski, 2 primorski, 3 Krapina-Golubovec, 4 ivanečko-ladanjski, 5 konjščinski, 6 Vukomeričke gorice, 7 koprivničko-križevačko-bilogorski, 8 posavski

Udio ugljena u energetske bilanci Hrvatske smanjio se od 36% u 1961. na 1,12% u 1992. Najveća je proizvodnja ugljena u Hrvatskoj bila krajem 1950-ih godina. Tako je lignita najviše proizvedeno 1960. godine (1 190 000 t), smeđeg ugljena (bez lignita) 1957. godine (596 000 t), a kamenog ugljena 1959. godine (860 000 t). Otada započinje stalni pad proizvodnje po prosječnoj godišnjoj stopi od 8,16%, da bi proizvodnja smeđeg ugljena potpuno prestala 1973. godine (obnovljena u malom obujmu 1989–1991), a lignita 1976. godine (obnovljena 1986–1989). Danas se u Hrvatskoj proizvodi samo kameni ugljen u količini od ~ 120 000 t (Tupljak u Istri) te manje količine lignita na novom površinskom kopu Vrbovo u Hrvatskom zagorju.

O budućnosti ugljena. Teško je ocijeniti hoće li ugljen uspješno konkurirati energiji novih nuklearnih procesa. S obzirom na naftu i plin bit će zanimljiv dulje vremena, jer su zalihe ugljena mnogo veće od onih nafte i plina. Geološko-tektonske prilike često uvjetuju da se danas eksploatacija boljih ugljena obavlja jamskim radovima. No u nizu velikih bazena izvanredno su povoljne okolnosti za površinsku proizvodnju. Tako, npr., u brojnim sektorima appalachianskog bazena (SAD) slojevi visokokvalitetnog kamenog ugljena karbonske starosti leže vodoravno i na maloj dubini, što omogućuje jeftino površinsko otkopavanje s najvećom produktivnošću.

U novije se doba jamska eksploatacija nastoji zamijeniti *podzemnom plinifikacijom*, koja se sastoji od dobivanja plinovitog goriva tipa generatorskog plina djelomičnim izgaranjem ugljena u dubini. Tim i moguće još nekim postupcima, uz pomoć dubokih bušenja i destrukcija, mogle bi se iskoristiti zalihe u dubinama većim od 1000 m, koje su teško dostupne zbog previsokih

temperatura, te otežanog provjetravanja i odvođenja podzemnih voda.

Golema se sredstva ulažu ne samo u unapređenje pridobivanja nego i u oplemenjivanje te istraživanje novih ugljenonosnih područja i pronalazjenje još šire upotrebe ugljena. Najveća je važnost ugljena u industriji i širokoj potrošnji, manja u prometu. Nakon energetske krize 1980-ih godina sve više se ugljena troši u elektroprivredi. Iste su tendencije u crnoj metalurgiji i kemijskoj industriji, a slične se naziru u građevinskoj (proizvodnja cementa) i tekstilnoj industriji. Ugljeni se katalitičkim hidrogeniranjem mogu prevesti u tekuće ugljikovodike, u prvom redu u benzin (v. *Hidrogenacija*, TE 6, str. 392). Zanimljivi su i rezultati proizvodnje umjetnog kaučuka, nekih polimernih materijala i raznih lijekova na bazi ugljena, kao i urana iz pepela pojedinih ugljena (u nas su obavljani takvi pokusi s pepelom ugljena iz Raše). Istražuje se i mogućnost upotrebe ugljena u proizvodnji hrane, što bi bio put da se i kompleksni prehrambeni proizvodi (ugljikohidrati, masti, ulja) proizvedu u industrijskim količinama. Neki dijelom već prije poznati procesi, npr. za proizvodnju tekućih goriva iz ugljena, te neki noviji postupci i dalje se usavršavaju.

V. Kranjec

LIT.: D. V. van Krevelen, J. Schuyer, *Coal Science*. Elsevier Publ. Co., Amsterdam, London, New York, Princeton 1957. – Ю. А. Жемчужников, Основы петрологии углей. А. И. СССР, Москва 1960. – V. Kranjec, *Geologija ugljena*. Izdanje Studentskog centra, Zagreb 1962. – А. Г. Иванов, Угленосные формации. Наука, Ленинград 1967. – М. Herak, V. Kochansky-Devidé, V. Kranjec, B. Šinkovec, *Zemlja, evolucija, struktura, dinamika, izvor sirovina*. Izdanje Instituta za filozofiju znanosti i mir JAZU, Zagreb 1976. – J. Falbe (ed.), *Chemierohstoffe aus Kohle*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1977. – *Gmelin-Durrer, Metallurgy of Iron*, Vol. 1–4. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York-London-Paris 1992.

B. Koželj V. Kranjec A. Markotić

UGLJIK (Carboneum, C), kemijski element s atomnim brojem 6 i relativnom atomnom masom 12,011. Nalazi se u IV. B podskupini periodnog sustava elemenata. Poznati su izotopi ugljika s masenim brojevima 9–16, ali su stabilni samo izotopi ^{12}C i ^{13}C . Elektronska konfiguracija ugljikova atoma jest $1s^2 2s^2 2p^2$.

Među kemijskim elementima ugljik zauzima posebno mjesto. Jedinstvena elektronska struktura omogućuje ugljikovim atomima da se vežu s atomima različitih elemenata, ali na mnoge načine i među sobom, stvarajući molekule od nekoliko atoma do više tisuća atoma ugljika međusobno povezanih u lančaste, prstenaste i umrežene strukture. Zbog toga ugljik tvori više spojeva nego, s iznimkom vodika, svi ostali kemijski elementi zajedno. Gotovo svi ti spojevi ubrajaju se u organske spojeve, jer je ugljik temeljni element žive tvari, čitava biljnog i životinjskog svijeta. Osim svoje uloge u živom organskom svijetu, ugljik je od goleme važnosti kao glavni kemijski sastojak goriva te kao temelj za dobivanje mnogih industrijskih proizvoda bez kojih je nezamisliva suvremena civilizacija.

Ugljik, kao drveni ugljen i čada nastali pri izgaranju drveta, poznat je od prapovijesnih vremena. Dijamant se kao izuzetno tvrd mineral spominje u religijskim zapisima ~ 700. godine. Njegovo je ime vjerojatno kovanca od grčke riječi *diamantes* proziran i *adamas* nesvladiv, postojan. Grafit je također poznat od prapovijesnih vremena, ali je često zamjenjivan s drugim mineralima. Tek 1779. godine C. W. Scheele dokazao je da je grafit modifikacija kemijskog elementa. Spajanjem s kisikom i mjerenjem mase oksida, S. Tennant je pokazao da je i dijamant modifikacija kemijskog elementa ugljika. Ime grafit potječe od grčke riječi *grafein* pisati.

Prirodna izotopna smjesa sadrži pretežito izotop ^{12}C , dok udio izotopa ^{13}C varira u granicama $1,01 \dots 1,14\%$, već prema podrijetlu elementa. Najčešća vrijednost udjela izotopa ^{13}C iznosi 1,11%.

Izotop ugljika ^{12}C izabran je 1961. međunarodnim dogovorom u okviru Unije za čistu i primijenjenu kemiju (IUPAC) kao standard kojemu je relativna atomna masa točno 12 i prema kojemu se izražavaju relativne atomske mase svih ostalih kemijskih elemenata.