

UDK 621.182

Poškodbe na ceveh visokotlačnega parnega kotla zaradi kombiniranega vpliva mehanske in kemijske obremenitve

FRANC VODOPIVEC — BOŠKO RALIČ — BOGOMIR DOBOVIŠEK

1. UVOD

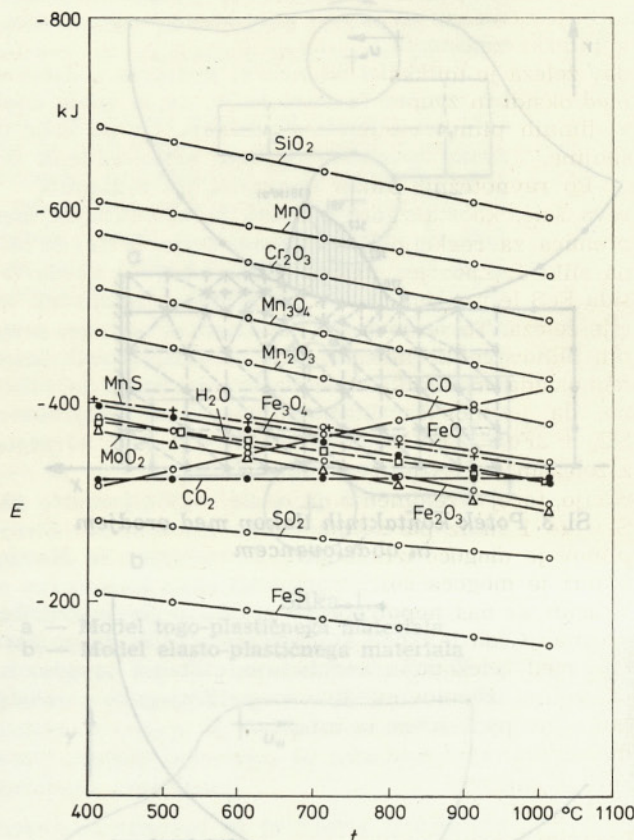
Zadnja leta obratujejo termoelektrarne na konicah projektirane moči, zato so tudi cevi v pregrevalnem sistemu pare močno mehansko in kemijsko obremenjene, zadnje tudi zaradi uporabe premogov, za katere kotli niso bili zgrajeni. V tem sestavku bomo razpravljali o netesnosti v steni cevi, ki je posledica kombinacije mehanske obremenitve, s katero želi tlak pare cev razširiti, in kemijske obremenitve zaradi prisotnosti žvepla v dimnih plinih v taki obliki, da lahko reagira s steno cevi.

2. RAVNOTEŽNE REAKCIJE TRDNE OKSIDACIJE JEKLA

V premogovih dimnih plinih najdemo različne sestavine: pline iz zraka: dušik, prosti kisik in CO_2 ; produkte zgorevanja in suhe destilacije premoga CO_2 , H_2O , CO , SO_2 , H_2S , žveplove pare in ogljikovodike. Temperatura cevi je v velikem delu kotla zadostna, da lahko ti plini reagirajo z jeklom, torej z železom, z legirnimi elementi in z nečistočami. Izčrpana analiza vseh reakcij, ki jih dopušča kemijsko ravnotežje, bi zahtevala mnogo prostora, zato bomo tu reakcije povzeli samo na kratko. Omejili se bomo na že omenjene glavne sestavine v dimnih plinih ter na glavne legirne elemente v jeklu: mangan, silicij, krom in molibden, ki jih najdemo v vseh, ali vsaj v boljših vrstah jekla za kotlovske cevi.

Za temperaturno področje med 300 in 1100 °C so na sliki 1 prikazane proste energije tvorbe oksidov oz. sulfidov s sestavnimi elementi jekla. Vse energije so izražene za mol kisika oz. žvepla (O_2 oz. S_2), da je mogoča neposredna primerjava odvisnosti. Večja negativna prosta energija tvorbe pomeni, da je oksid bolj stabilen. Elementi, ki imajo bolj negativno prosto energijo tvorbe, lahko reducirajo okside elementov z nižjo energijo tvorbe oksida in se sami oksidirajo, če so še drugi pogoji za reakcijo, ki jih bomo obravnavali v nadaljevanju. Absolutne vrednosti prostih energij na sliki veljajo za elemente, ki med seboj reagirajo v čistem stanju, na primer čisto železo s čistim kisikom, vodno paro ali žveplovimi parami. Upoštevanje realnih sestav dimnih plinov in jekla bi temperaturne odvisnosti nekoliko premaknilo, vendar ne toliko, da primerjava po sliki 1 ne bi bila realna.

Po vrstnem redu obstojnosti si sledijo oksidi silicija, mangana, kroma in železa. To pomeni, da zgorevajo teoretično pred, praktično pa hkrati z železom tudi silicij, krom in mangan, vendar le tedaj, ko je kisik v neposrednem stiku s kovino. Kakor



Sl. 1. Prosta energija tvorbe oksidov in sulfidov najpomembnejših legirnih elementov v jeklih za kotlovske cevi

hitro se površina jekla pokrije z zveznim slojem oksida, se razmere za reakcijo spremenijo in proces škajanja postane odvisen od prenosa snovi skozi sloj škaje. Oksid FeO (vustit) nastaja le nad temperaturo 560 °C [2], pri nižjih temperaturah sta obstojna oksida železa Fe_3O_4 (magnetit) in Fe_2O_3 (hematit). Vodna para oksidira vse prej našteje elemente iz jekla, oksidira tudi železo v vustit in v magnetit, vendar nastaja zadnji oksid v vodni pari le do temperature okoli 1000 °C. Pri reakciji z vodno paro ne more nastati hematit. Zato najdemo na notranji površini cevi, v primeru, ko skozi nje kroži le vodna para brez kisika, le magnetit. Ogljikov monoksid (CO) lahko oksidira železo v FeO do temperature okoli 730 °C, v magnetit do temperature okoli 700 °C in v hematit do temperature okoli 630 °C. Ogljikov dioksid CO_2 lahko oksidira železo v vse tri okside še nad temperaturo 1000 °C, je torej močan oksidant. Vodna para oksidira silicij, krom in mangan, ne oksidira pa molibdena. Pač pa vse te elemente oksidira ogljikov di-

oksid. Ogljikov monoksid oksidira silicij, krom in mangan, molibden pa samo pod temperaturo okoli 600 °C. Žveplov dioksid SO_2 lahko oksidira železo in vse legirne elemente v jeklu v vsem intervalu temperature, vendar imajo prednost reakcije s kisikom, vodno paro in obema ogljikovima oksidoma, torej je SO_2 oksidant le, če ni močnejših oksidantov v plinski zmesi. Termodinamična stabilnost oksidov železa je tolikšna, da ne more priti do reakcije med oksidi in žveplovimi parami ali žveplom, ki je v dimnih plinih vezano v druge žveplove hlapne spojine.

Po ravnotežnih zakonitostih lahko žveplo zgoriva šele, ko sta zgorela ves vodik in ogljik, saj premica za reakcijo $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$ leži pod vsemi na sliki 1. Zato je mogoča tvorba železovega sulfida FeS le v redukcijski atmosferi, kjer ni oksidacije železa. To se dogaja tedaj, ko je v zmesi dimnih plinov veliko neizgorelega ogljika, ogljikovega monoksida in vodika. Pač pa je s slike 1 razvidno, da je mogoča oksidacija železa po reakciji $\text{SO}_2 + 2\text{Fe} = 2\text{FeO} + \text{S}$. Nastalo žveplo reagira z železom v FeS le, če ni na voljo kisika za oksidacijo, torej v že omenjenih redukcijskih razmerah. S slike 1 in iz parcialnih tlakov sestavin dimnih plinov je mogoče izračunati sestavo atmosfere, pri kateri je mogoča sulfidizacija železa, vendar je ta izračun za nas nepotreben. Pomembno je osnovno spoznanje, da lahko nastane železov sulfid z reakcijo med železom in žveplovimi parami, ali z neizgorelimi žveplovimi spojinami v dimnih plinih kotla, ne pa z reakcijo med železom in žveplovim dioksidom, ker je ta spojina bolj stabilna od železovega sulfida.

Legirni elementi oksidirajo tako, da na mejni površini oksid kovina reducirajo železov oksid. Reakcija je torej $\text{FeO} + \text{Me} \rightarrow \text{MeO} + \text{Fe}$. Vsi oksidi železa so oksidanti za silicij, mangan in krom, nobeden pa ne oksidira molibdena.

3. KINETIČNE IN MORFOLOŠKE ZNAČILNOSTI NASTANKA SLOJA ŠKAJE

Ravnotežne zakonitosti določajo hitrost reakcij do trenutka, ko je zagotovljen neposreden stik kovine in kisika oz. žvepla, torej ko je kovinska površina cevi v stiku z atmosfero, tj. dokler plast ška je ni zvezna. Kakor hitro se površina jekla pokrije z neprekinjenim slojem ška je, postane za napredovanje reakcije odločujoč prenos atomov z difuzijo skozi nastali sloj, zato rast ška je določajo kinetične zakonitosti. Glavna sestavina jekla je železo, zato so tudi glavna sestavina ška je železovi oksidi vustit, magnetit in hematit. Poglejmo, kakšna je prepustnost teh oksidov za prenos atomov elementov, ki so v jeklu. Ko se segreva čisto železo na zraku pri temperaturi nad 560 °C, nastaja troslojna ška ja, ki jo od kovine proti atmosferi sestavljajo plasti vustita, magnetita in hematita. Najhitrejši je prenos atomov z difuzijo skozi vustit, ki je spojina z mnogimi kationskimi vrzelmi

v kristalni mreži. Te omogočajo hitro difuzijo železa. Zato je tudi rast vustitnega podsloja najhitrejša in je ta sloj najdebelejši. Prenos kisika od atmosfere do kovine je zanemarljiv, zato lahko legirni elementi oksidirajo praktično izključno le tako, da na površini kovine reducirajo železov oksid. Legirni elementi, ki oksidirajo na površini kovine, ostanejo ob tej površini, od nje jih odriva le nastanek novega oksida na tej površini ne pa nastanek vustita, kajti ta nastaja le na mejni površini z atmosfero. Če pa so oksidi legirnih elementov topljivi v trdnem vustitu, se lahko z difuzijo v trdnem porazdelijo po sloju tega oksida.

Podobne zakonitosti kakor za rast vustitnega sloja veljajo tudi za rast zveznega sloja magnetita, le da je hitrost rasti za red velikosti manjša, ker ima magnetit bolj popolno kristalno mrežo, zato je tudi difuzivnost v njem manjša. Še manjša je difuzivnost skozi hematit. Rezultat različne prepustnosti železovih oksidov za difuzijo v trdnem je tak, da so v skupnem sloju ška je debeline plasti z razmerji vustit : magnetit : hematit približno 95 : 4 : 1 [2]. To velja le, dokler hitrost procesa škanja regulira prenos z difuzijo skozi železove okside. Velja tudi za oksidacijo jekla na zraku, dokler se sloj ška je ne odlepi od kovine in se ne pojavi nezveznost, ki prekine difuzijski tok atomov.

Pri temperaturah pod 560 °C so reakcije škanja znatno počasnejše kakor nad to temperaturo zato, ker vustit ni obstojen. Ška jo sestavljata magnetit ob kovini in hematit ob atmosferi.

Če je proces oksidacije nemoten, nastaja na jeklu zvezen sloj ška je po počasni parabolični odvisnosti z obliko $d = k_1 t^{1/2}$, kjer pomenijo: d — debelino ška je, k_1 — parabolično konstanto oksidacije in t — čas segrevanja. Oksidacija je toplotno aktiviran proces, zato raste parabolična konstanta oksidacije s temperaturo po znani Arrheniusovi odvisnosti $k_1 = k_2 \exp(-Q/RT)$, kjer pomenijo: k_2 — konstanto, Q — aktivacijsko energijo procesa oksidacije železa, R — splošno plinsko konstanto in T — temperaturo v K. Parabolična konstanta oksidacije je povezana z difuzivnostjo po zapletenem izrazu.

Če so oksidi legirnih elementov netopljivi, se odlagajo v ška ji kot posebna faza. Če so topljivi v trdni ška ji, se porazdelijo kakor določajo difuzijske zakonitosti. Lahko pa reagirajo z oksidi železa v kompleksne spojine. Najbolj znane so spinelne in silikatne spojine, ki so še manj prepustne za difuzijo od ška je, zato jeklom z veliko kroma in silicija dajejo odpornost proti ognju. Četrta možnost je, da oksidi legirnih elementov reagirajo z oksidi železa in tvorijo tekoče evtektike. O tem primeru bo več razprave nekoliko pozneje.

Če se oksidi legirnih elementov raztopijo v vustitu, je njihov vpliv na hitrost škanja lahko različen. Če imajo enako število valenčnih elektronov, ne vplivajo na hitrost škanja, če je število valenčnih elektronov manjše kakor pri železu, se

hitrost oksidacije zmanjša, če pa je število valenčnih elektronov večje kakor pri železu, se hitrost oksidacije poveča. To pa zato, ker električna nevtralnost spojine terja večjo gostoto kationskih vrzeli, ta pa povečuje prenos skozi škajo z difuzijo. Oksidi elementov, ki jih najdemo v jeklu, v železovih oksidih niso topljivi. Izjema je mangan, ki ima enako valenco kakor železo, zato na hitrost oksidacije ne vpliva. V splošnem pa velja, da je pri obratovanju kotla vpliv legirnih elementov na škakanje stene cevi razmeroma majhen v primerjavi z vplivom na trdnost.

V jeklu imamo tudi elemente, ki imajo manjšo energijo tvorbe oksidov od železa, na primer baker. Taki elementi ne oksidirajo, temveč se kopičijo v kovini ob mejni površini z oksidom in ne vplivajo na proces škakanja [3]. V jeklu imamo še druge elemente, ki vplivajo na procese škakanja, na primer fosfor. Pri nizkih temperaturah se obnaša fosfor podobno kakor krom, pri visokih temperaturah pa nastali železov fosfat reagira z železovimi oksidi, tvori staljeni evtektik in pospeši proces škakanja. Mejna temperatura je okoli 975 °C [3], torej višja, kakor jo lahko doseže stena cevi v kotlu, pa tudi fosforja je v jeklu malo, zato ga omenjamo le kot zanimivost.

Vsa razprava je namenjena primeru, ko površina jekla pokriva gost sloj škaje in je zato stik med jeklom in atmosfero mogoč samo skozi ta sloj, ki pa je le redko zvezen. Oksidi imajo drugačno, po večini večjo specifično prostornino od kovine. Zato hkrati z rastjo sloja škaje nastajajo v njih napetosti, ki se sproščajo z lezenjem in napihovanjem sloja škaje, če je temperatura dovolj visoka, sicer pa z razpokami. Razpoke so lahko vzporedne s slojem škaje, ali pa pravokotne nanj. Pri temperaturah, ki jih dosega stena cevi med obratovanjem kotla, je škaja malo plastična, zato se napetosti sproščajo z razpokami. Škaja poka tudi zaradi sprememb v temperaturi kotla, ker ima drugačno razteznost kakor jeklo.

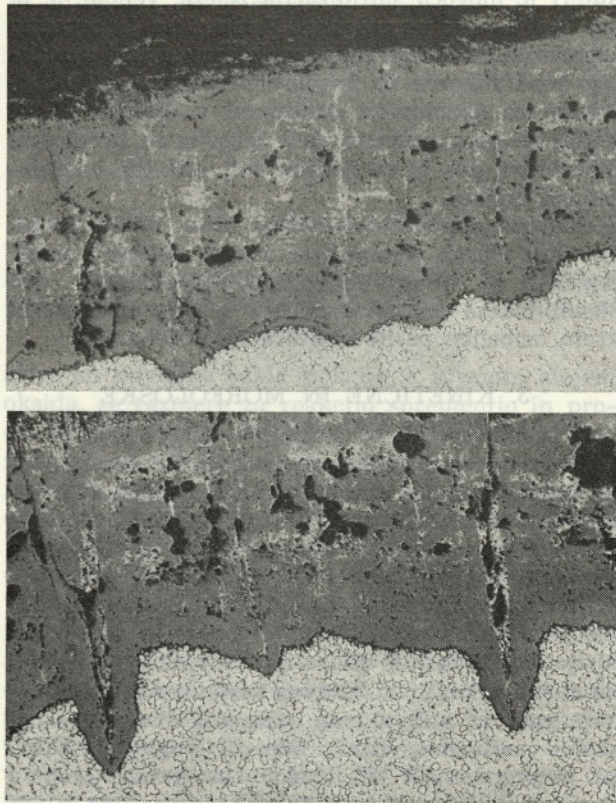
Oksidacijo legirnih elementov spremlja pogosto oblikovanje zelo razčlenjene mejne površine oksid — kovina, ali celo oksidacija legirnih elementov pred oksidno mejo. Zaradi spremenjene oblike je mejna plast škaje močno oprijeta na kovino, zato razpoke, ki so vzporedne s plastjo oksida ne nastajajo na mejni površini oksid — kovina, ampak v škaji na meji, kjer najdemo okside legirnih elementov. Škaja lahko počí tudi pri elastičnih deformacijah ocevja v kotlu, saj ima večji elastični modul od železa, zato je pri isti napetosti elastična deformacija manjša kakor pri jeklu.

4. NASTANEK NETESNOSTI

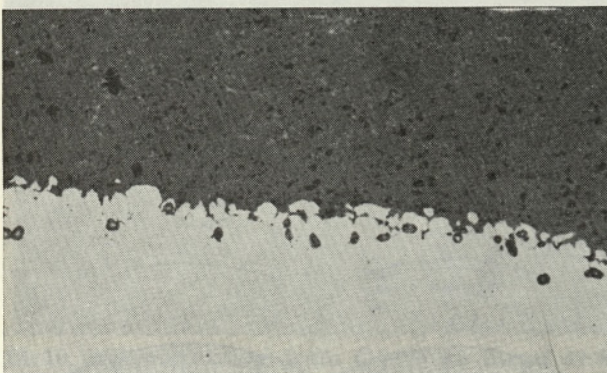
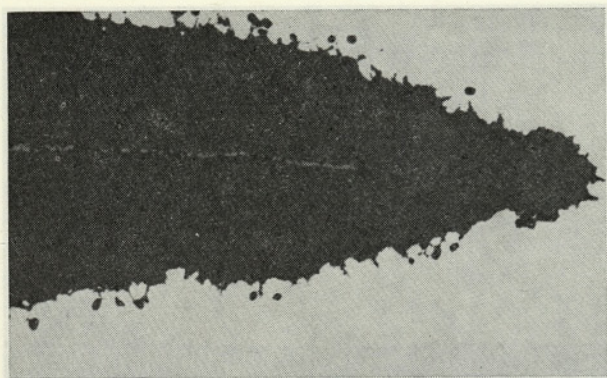
Ko škaja počí, pridejo dimni plini znova v stik z jeklom in proces škakanja se nadaljuje kakor na začetku. Če se zgodi, da škaja počí na mestu v kotlu, ali v trenutku, ko je sestava dimnih plinov

redukcijska in ima veliko neizgorelega žvepla, pride do pospešenega zgorevanja jekla v bližini mesta, kjer se radialna in aksialna razpoka dotikata stene cevi in se razvijejo poškodbe površine stene cevi, ki imajo na prečnem prerezu cevi obliko topih klinov. Dve stopnji razvoja poškodb, poimenovali smo jih klinaste zajede, vidimo na sliki 2. V aksialni smeri so seveda klini do nekaj cm dolgi kanali, razpoke nad njimi pa neke vrste zavese ali reže. Natančen pregled kaže, da je mikrostruktura škaje podobna tam, kjer je slojasta, in na dnu klinov. Slika 3 kaže na obeh mestih v škaji temnejšo osnovo in precej enakomerno porazdeljena svetlejša zrna, po videzu v mikroskopu podobna snovi v žili, ki jo najdemo nad zajedo (sl. 3 b). V škaji vidimo še številne majhne črne točke, mikropore. Ni še jasno, ali nastajajo med procesom škakanja ali pa med pripravo obruskov.

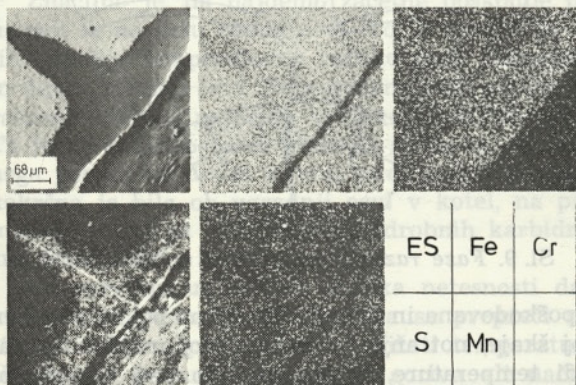
Analiza v elektronskem mikroanalizatorju je pokazala, da je škaja zmes vustita oz. magnetita in železovega sulfida. Iz te faze so svetlejša zrna in seveda žila nad zajedo (sl. 4). Enaka fazna in elementna sestava škaje na delih, kjer je slojasta, in v klinih je znak, da je proces škakanja (s tem smo poimenovali kombinacijo oksidacije in sulfidizacije železa) povsod enak in da je zajeda le po-



Sl. 2. Prečni prerez dveh kotlovskih cevi (50 : 1). Dve stopnji razvoja klinastih zajed v steni cevi. V sloju škaje se razločijo črne poškodbe, nastale pri pripravi obruska in pokončne žile, bogate z železovim sulfidom



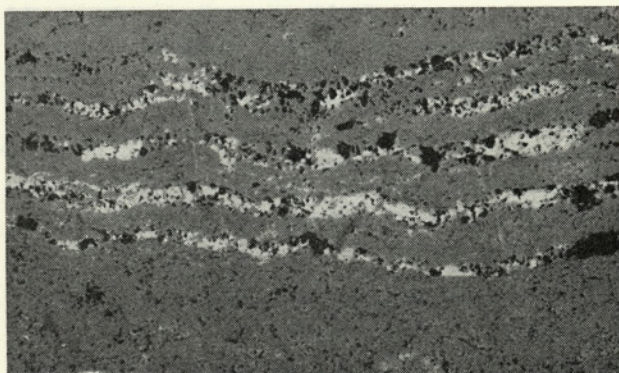
Sl. 3. Škaja ob jeklu na slojastem delu a) in v klinu b) (500 : 1)



Sl. 4. Prečni prerez stene cevi (300 : 1).

Klinasta zajeda, podobna tisti na sl. 2 b). Elektronski posnetek in specifični posnetki X za označene elemente. Večja zgostitev belih točk pomeni večjo lokalno koncentracijo elementa

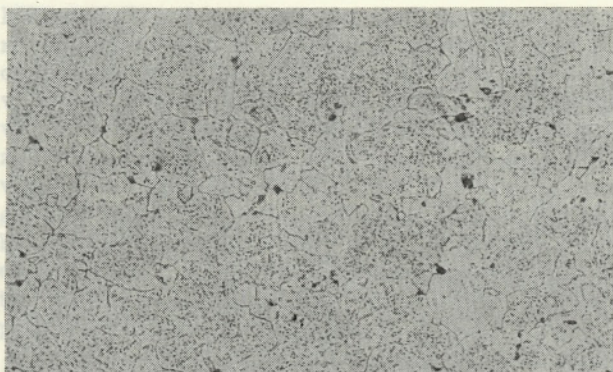
sledica lokalno pospešene reakcije. Pri enaki temperaturi je železov sulfid bolj prepusten za difuzijo kakor vustit, to se pokaže v različni aktivacijski energiji za proces difuzije, ki je za vustit okoli 125 000 J/mol, za železov sulfid pa 90 000 do 96 000 J/mol [2]. Logično je, da nastanek zajed razložimo s hitrejšim prenosom snovi skozi žilo. Mehanizem prenosa pa ni preprost, potreben je namreč povečan prenos kisika in žvepla. Kljub najskrbnejši pripravi ni bilo mogoče določiti, ali je žila popolnoma napolnjena s sulfidom ali ne. Po-



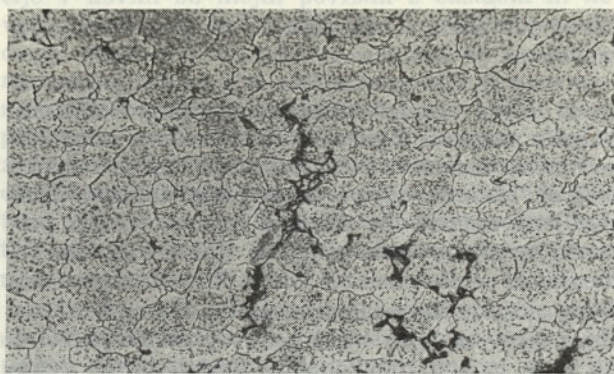
Sl. 5. Zaporedne plasti magnetita in železovega sulfida v škaji na površini kotlovske cevi (200 : 1)

nekod je videti v mikroskopu, da je polna, takoj zraven pa je del prazen (sl. 3 a). Ni mogoče ugotoviti, ali je bila prazna žila že med škajanjem ali pa je iz nje izpadel sulfid med pripravo obruska. Mogoče prispeva k pospešenemu prenosu skozi žilo več mehanizmov, ni izključeno tudi, da se razpoka v škaji občasno odpira in je jeklo občasno izpostavljeno neposredno dimnim plinom. V tem primeru bi zajed rasla podobno kakor razpoka pri menjajoči se obremenitvi kovin. Rast dvofazne sulfidno oksidne škaje lahko razložita dva mehanizma. Pri prvem nastaja sulfid na površini škaje tedaj, ko se v močno redukcijskih dimnih plinih reducira železov oksid, nastalo železo pa z neizgorelim žveplom reagira v železov sulfid. Ko se atmosfera sprevrže v oksidacijsko, del sulfida zgori, nad njim nastane plast oksida, ki zavaruje sulfidni ostanek. Ker škaja raste večinoma tako, da se oksid tvori in odlaga na mejni površini dimni plini — škaja, potaplja novo nastali oksid ostanke železovega sulfida v notranjost sloja škaje. Da je taka rast mogoča, kaže slika 5, kjer vidimo zaporedne sloje magnetita in železovega sulfida.

V drugem primeru se v redukcijskih razmerah nekoliko žvepla raztopi v železovem oksidu, difundira do stene in tam reagira v železov sulfid. Dvofazna sestava škaje z veliko faznimi mejami in mikroporoznostjo pospešita proces prenosa. Mikrostrukturne značilnosti škaje ne omogočajo, da bi lahko odločili, katera razlaga drži, zato bi bila potrebna sistematična raziskava. Na vsak način pa dvofazna škaja kaže, da je režim zgorevanja stene peči neenakomeren, obdobja oksidacije se menjajo z obdobji redukcijskih dimnih plinov, ki omogočajo sulfidizacijo stene cevi. Sulfidizacija je vzrok, da je proces zgorevanja stene cevi lokalno pospešen. Dokaz za to so klinaste zajed pod sulfidnimi zavesami, pa tudi to, da podolžnih kanalov ne najdemo na notranji površini cevi, ki je pokrita s slojem magnetita. Očitno se razpoke, ki so nastale hkrati z razpokami na zunanji površini cevi, na notranji površini zacelijo med nadaljnjo oksidacijo in tako je preprečeno lokalno močnejše zgorevanje stene cevi.



Sl. 6. Prečni prerez stene cevi (200 : 1).
Mikropore na stičiščih treh kristalnih zrn ferita

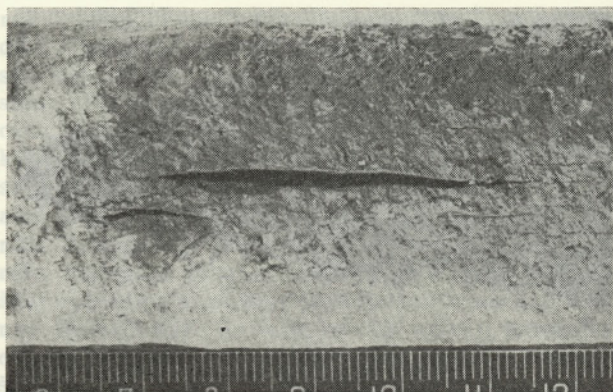


Sl. 7. Prečni prerez stene cevi (200 : 1).
Interkristalne razpoke v podaljšku klinaste zajede

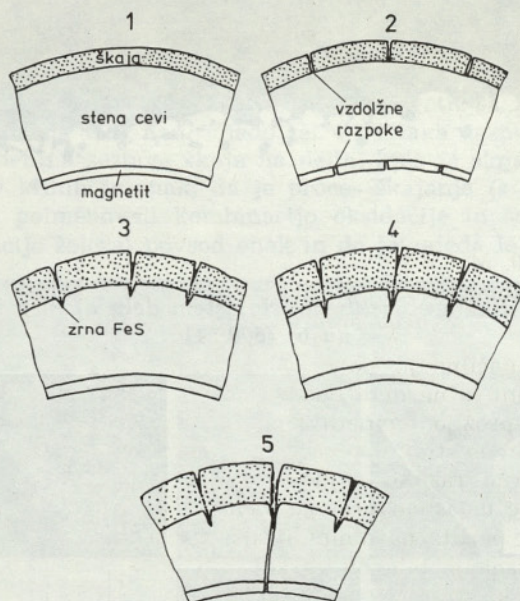
Podolžni žlebovi oslabijo steno cevi. Prvo znamenje, da je presežena trajna nosilnost jekla, so posamične mikropore na stičiščih treh feritnih zrn (sl. 6). Mikropore so znak trajne deformacije stene cevi z lezenjem, ki poteka z difuzijo vrzeli in njihovo kondenzacijo na mestih največjih napetosti, torej prav v stičiščih treh feritnih zrn. Lezenje se nadaljuje in je najmočnejše v korenu zajed, zato se tu vrzeli združujejo v razvejane interkristalne razpoke (sl. 7). Lokalizacija deformacije še močnejše oslabi steno in seveda pospeši rast interkristalne razpoke, dokler se ta ne razvije v netesnost (sl. 8). Poškodba je videti, kakor da se je razvila iz površinske napake na cevi ali, da je nastala zaradi čiste toplotne preobremenitve, ker je bilo hlajenje od znotraj premalo intenzivno. Videz poškodbe lahko pri razpoznavanju zavede in sproži ukrepe, ki nimajo pravega učinka. Za dobro vzdrževanje kotla je zato priporočljivo, da se vzrok vsake netesnosti strokovno pravilno ugotovi.

Poškodba cevi zaradi kombiniranega učinka neizgorelega žvepla v dimnih plinih kotla in zaradi velike notranje obremenitve nastaja razmeroma počasi. Zanj je namreč značilno, da je temperatura stene le zelo malo nad tisto, ki je trajno dopustna za uporabljeno vrsto jekla.

Na sliki 9 je shematično prikazano pet razvojnih stopenj netesnosti v cevni steni. Na začetku je cev

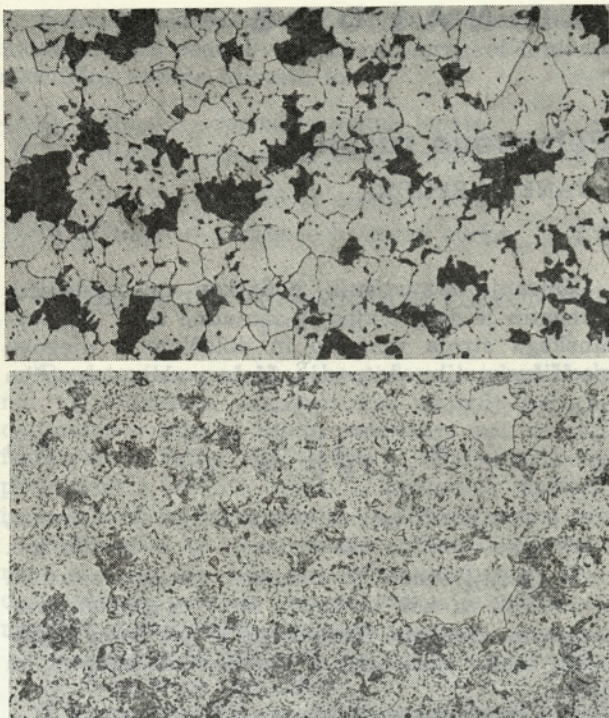


Sl. 8. Videz netesnosti na zunanji površini cevi (makroslika)



Sl. 9. Faze razvoja netesnosti v cevni steni

nepoškodovana in zunanjo površino pokriva zvezen sloj škaje, notranjo pa zvezen sloj magnetita. Zaradi temperature, ki je nekoliko nad trajno dopustno, se stena cevi deformira s počasnim lezenjem in cev se nekoliko napihne. Trda škaja in magnetit tej deformaciji ne sledita, temveč počita. Nastanejo številne radialne in podolžne mikrorazpoke. Če je atmosfera oksidacijska, se napolnijo s škajo, na notranji površini pa z magnetitom in proces je začasno ustavljen. Če je v atmosferi neizgorelo žveplo, nastane v razpokah železov sulfid. Pojavijo se že omenjene pokončne vzdolžne mikroreže, v katerih najdemo zvezne ali prekinjene zavese železovega sulfida. Pod temi režami je proces zgorevanja stene cevi pospešen in pojavljajo se klinaste zajed. Ko je stena cevi dovolj oslABLJENA, se na dnu zajed sproži močnejša deformacija in vrzeli se zbirajo v mikrorazpoke po mejah feritnih zrn. Te se združijo v makrorazpoko, ki se razvije do netesnosti.



Sl. 10. Mikrostruktura jekla Č.7400 na dimni a) in na plamenski strani b) na istem prerezu cevi vmesnega pregrevnika (200 : 1)

Značilno je, da najdemo začetne poškodbe ponavadi le na delu oboda cevi. To je znamenje, da jih sprožijo temperaturne razlike med plamensko in dimno stranjo cevi. Neposreden dokaz za temperaturno razliko najdemo v mikrostrukturi jekla. Ta je na istem prerezu stene iz ferita in lamelarnega perlitna na dimni strani, torej praktično taka, kakršna je bila ob vgradnji cevi v kotel, na plamenski strani pa je iz ferita in drobnih karbidnih zrn, torej mehko žarjena (sl. 10).

Le pravilna ugotovitev vzroka netesnosti daje možnost za primerne ukrepe. Da se prepreči nastanek mikrorazpok, je treba znižati temperaturo. Učinkovita je tudi sprememba goriva ali načina kurjenja. S tem se prepreči, da bi v redukcijskih razmerah prišle stene cevi v stik z neizgorelim žveplom v dimnih plinih.

Kotlarji se pogosto bojijo poškodb stene cevi zaradi suhe korozije. S tem je poimenovana reakcija, ki med železovimi oksidi in oksidi drugih elementov iz jekla ali iz pepela ustvarja evtektično fazo, ki se stali pri temperaturi stene cevi. Staljena faza povečuje hitrost zgorevanja stene cevi, ker je dobro prevodna za atome elementov, ki reagirajo. Zaradi tega stena cevi lahko hitro zgori.

Prava suha korozija se na kotlovskih ceveh pojavlja le izjemoma zaradi razmeroma nizke temperature stene cevi, ki je v stiku z dimnimi plini. Ta temperatura ne dosega 600 °C, saj nobeno od standardnih jekel ne prenese tako visoke delovne temperature. Celo na ceveh iz termoelektrarne Plomin,

ki uporablja premog z zelo veliko žvepla in ima škaja zato mnogo železovega sulfida, suhe korozije ni kljub visoki temperaturi stene cevi. Dokaz zato sta debelina škaje, ki je dosegala do 1,2 mm in debelina magnetitnega sloja, ki je na notranji površini dosegla do 0,5 mm, kar je nekajkrat preveč [4]. Od vseh elementov v jeklu tvori vanadijev oksid z oksidi železa evtektik z najnižjo temperaturo tališča 620 °C [5]. Nekatera tekoča goriva imajo pepel z veliko vanadija, ki se useda na ceveh. Kontrolne analize pepela neke naše termoelektrarne, ki uporablja za gorivo mazut, so pokazale v usedlini na ceveh do 66 % V_2O_5 . Na istih ceveh ni bilo nobenih znakov suhe korozije. Posebej velja poudariti, da je bilo v pepelu na ceveh tudi mnogo oksidov alkalij (11 % Na_2O in 2,1 % K_2O) [5]. Lahko torej sklepamo, da se suha korozija pojavlja le izjemoma in tedaj, ko je temperatura stene cevi tako visoka, da bi stena zgorela tudi brez pospeševalnega učinka staljenih evtektičnih faz.

Pač pa se je pojavil nekoliko drugačen proces suhe korozije v kotlu, ki je bil zgrajen za lignit, pa je bil kurjen z zmesjo lignita in rjavega premoga. Na vročo plamensko stran cevi so se usedale kapljice staljene žilindre in nažirale sloj škaje, zmanjševale tako njegov varovalni vpliv na steno cevi. V enem letu se je debelina stene cevi na plamenski strani zmanjšala na manj od 1/3 imenske [6]. O tej poškodbi kotlovskih cevi bomo poročali v posebni raziskavi.

5. SKLEP

V razpravi smo analizirali netesnost v steni kotlovске cevi, ki nastane zaradi kombiniranega učinka majhne predobremenitve cevi z notranjim tlakom in pospešene reakcije med jekleno steno in žveplom, ki v dimnih plinih ni vezano v oksidni obliki. Na kratko smo razložili mehanizem nastanka take netesnosti in njene morfološke značilnosti. Podobnost poškodbe cevi te vrste in drugih, ki jih na ceveh srečujemo, terja, da se vsak vzrok netesnosti skrbno nadzoruje, da bi se proti ponavljanju netesnosti lahko borili s strokovno utemeljenimi posegi pri obratovanju kotla.

VIRI

- [1] J. E. Elliott in M. Gleiser: Thermochemistry for Steelmaking, Addison Wesley, Reading USA, 1960.
- [2] J. Benard: L'Oxydation des Metaux, Gauthier Villars, Paris, 1962.
- [3] F. Vodopivec — L. Kosec: Radex Rundschau 9, 1969, št. 4, 639.
- [4] F. Vodopivec — B. Ralić: Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, 1982.
- [5] F. Vodopivec — B. Ralić: Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, 1982.
- [6] F. Vodopivec — B. Ralić: Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, 1984.

Naslovi avtorjev: prof. dr. inž. Franc Vodopivec, Boško Ralić, viš. teh., oba Metalurški inštitut Ljubljana, Lepi pot 11, prof. dr. inž. Bogomir Dobovišek, FNT VTO Montanistika, Ljubljana, Lepi pot 11