

UDK 539.4:621.181.65

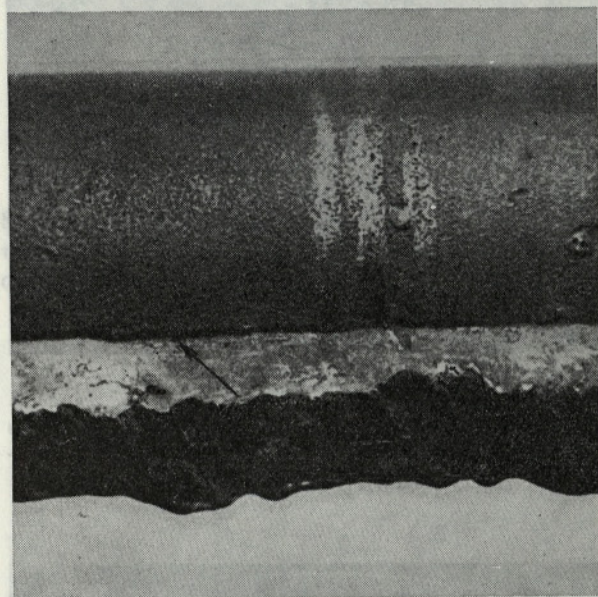
Trdnostna in metalurška analiza poškodb na membranskih cevnih stenah visokotlačnega parnega kotla

II. DEL — METALURŠKA ANALIZA

F. VODOPIVEC, L. KOSEC

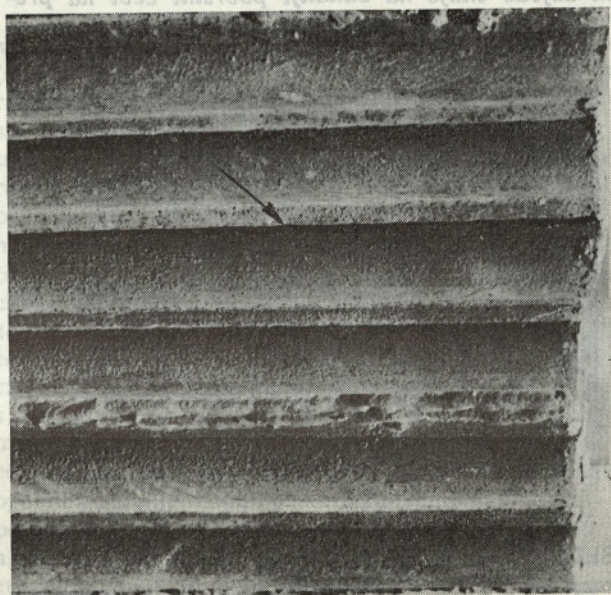
A. VZORCI

Opravili smo številne metalurške raziskave iz rezkov iz cevnih sten, na katerih je prišlo do netesnosti, da bi dognali vzrok za njihov nastanek. Poškodbe cevnih sten so imele obliko dolgih razpok (reda velikosti 1 metra) in so pretrgale steno cevi na mestu, kjer je bila z zvarom povezana s spojno lamelo v cevno steno. Primere netesnosti vidimo na slikah 1 in 2 v ravnini cevne stene. Slika 3 prikazuje pretrgano steno cevi, sliki 4 in 5 pa stanje širjenja razpoke od zunanje proti notranji površini cevi. Na vseh posnetkih se lepo vidi, da razpoka oz. netesnost leži v cevni steni tik ob mestu, kjer je v jeklu še opaziti prekrystalizacijo mikrostrukture jekla zaradi varjenja. Na številnih prerezi smo opazili, da je proti sredini cevi pomaknjena ustnica razpoke, na kateri je bila privarjena spojna lamela, kar je razvidno tudi na sliki 3. To in škarjasto razširjene razpoke (če jih gledamo v ravnini cevne stene) povedo, da je po pretrgu prišlo do nadaljevanja relaksacije napetosti v dveh smereh, do škarjastega odpiranja pravokotno na os cevi v ravnini cevne stene in upogiba ene ustnice navznoter. Ta dvojna deformacija je znak kompleksnosti sile, ki je povzročila netesnost.



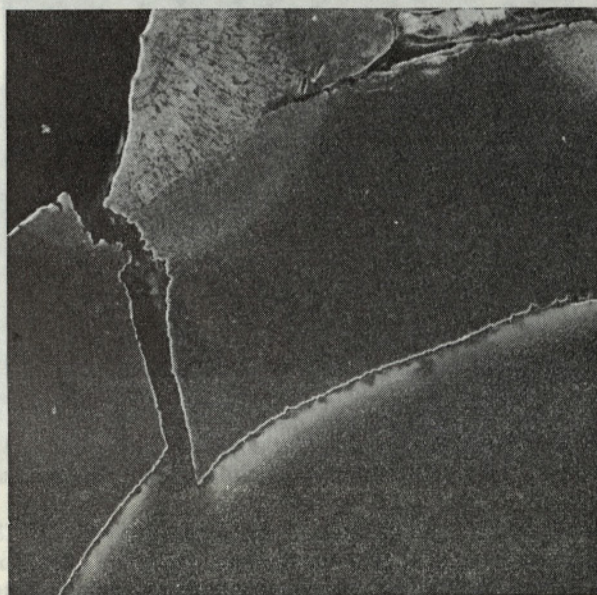
1,7:1

Sl. 2. Izrez iz cevne stene
Razpoka na prehodu med cevjo in spojno lamelo
je označena s puščico



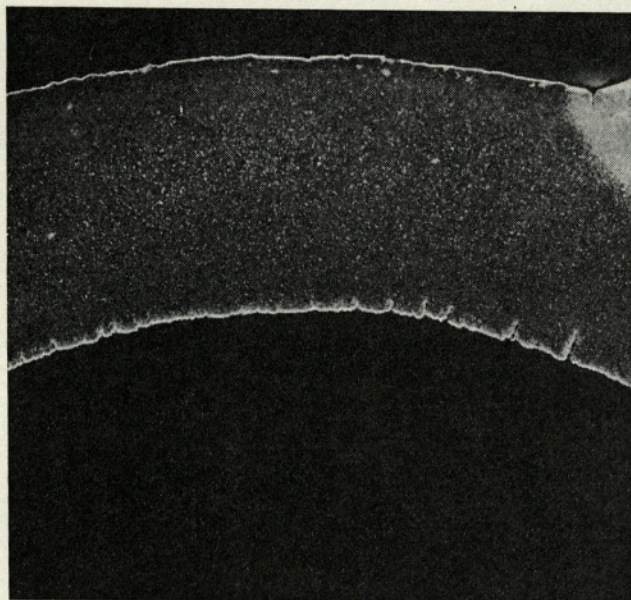
1:3,3

Sl. 1. Cevna stena. Razpoka je označena s puščico



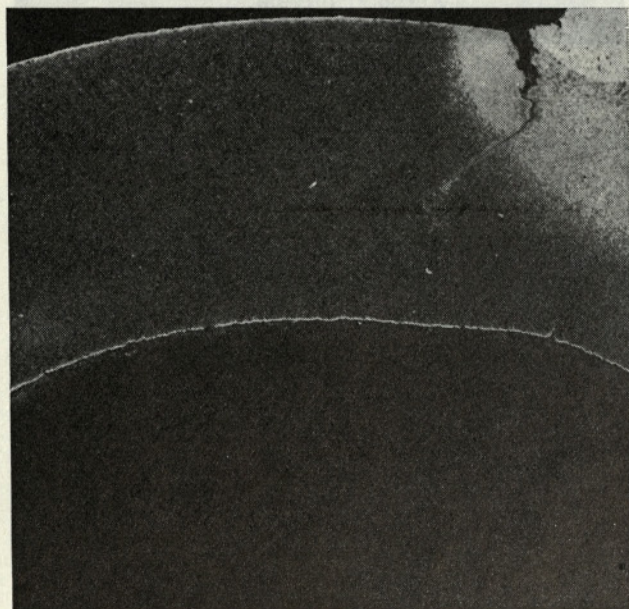
7:1

Sl. 3. Jedkan prečni prerez cevi z netesnostjo



7:1

Sl. 4. Jedkan prečni presek cevi z majhno razpoko na prehodu med lamelo in cevjo ter zajede na notranji površini cevi



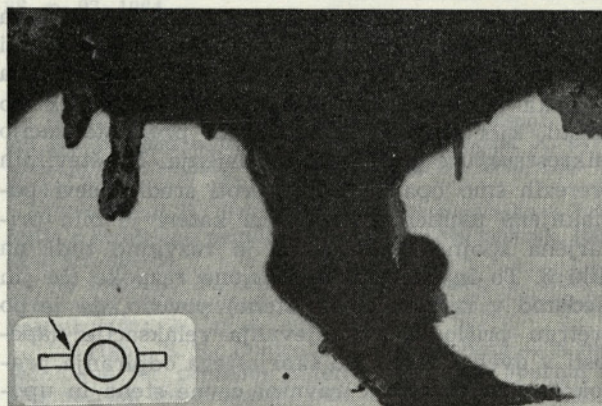
7:1

Sl. 5. Jedkan prečni presek cevi. Razpoka je od zunaj prodrla več kakor do polovice debeline stene cevi

Poleg netesnosti so na ceveh tudi napake na notranji površini, ki imajo mestoma nesprejemljivo velikost in obliko. Oglejmo si natančneje ene in druge.

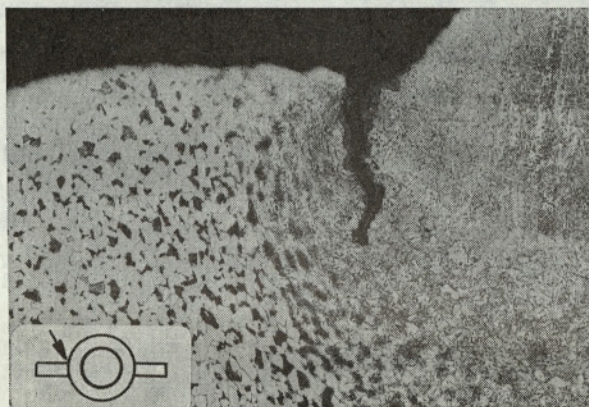
B. NAPAKE NA ZUNANJI POVRŠINI CEVI

Ob razpoki se je na zunanji površini škaja često zajedala v obliki bolj ali manj ostrih klinov v steno cevi (sl. 6). Podobne poškodbe v steni cevi smo opazili na enakih mestih tudi tam, kjer razpoke ali netesnosti ni bilo. Takih ali podobnih poškodb drugod na zunanji površini stene cevi ni bilo. Torej smemo sklepati, da napetosti, ki so privedle do netesnosti, vplivajo tudi na hitrost škajanja jekla na zunanji površini in ga pospešujejo v črtah, vzporednih z razpokami. Na slikah 7, 8 in 9 so mikroposnetki nekaterih razpok, ki se zajedajo različno globoko v steno cevi. Poleg lege je značilno, da je ob razpoki na delu stene cevi, kjer ni spojne lamele, eliptično področje močno hladno deformiranega jekla. Tako področje je tudi tam,



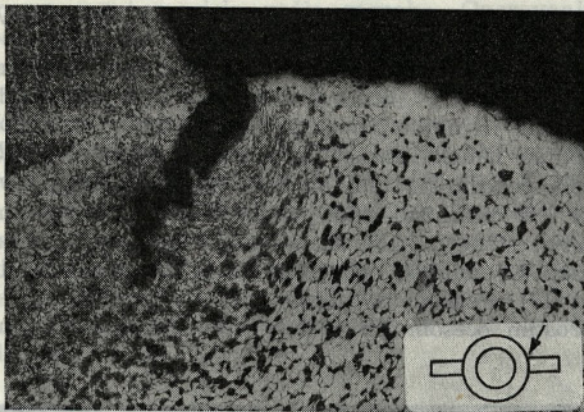
50:1

Sl. 6. Poliran obrusek. Prečni presek cevi. Razpoka in zajedje škaje na zunanji površini cevi na prehodu med lamelo in cevjo



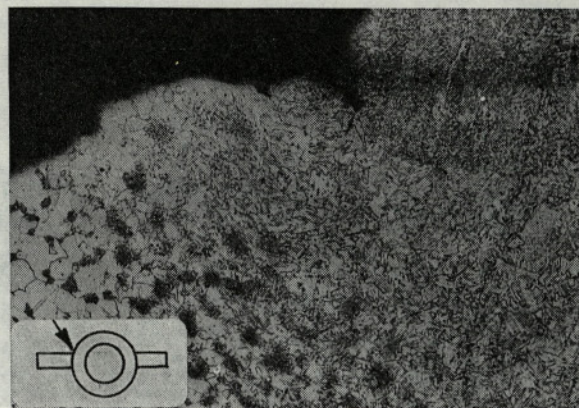
70:1

Sl. 7. Jedkan obrusek. Prečni presek cevi. Plitva razpoka na prehodu med lamelo in cevjo s področjem deformiranega jekla. Levo je feritno perlitna mikrostruktura jekla, desno pa mikrostruktura zvara



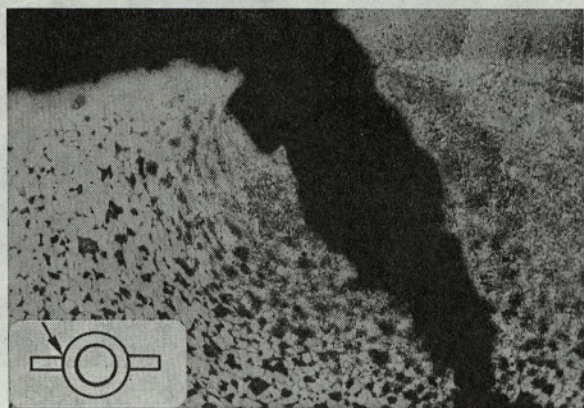
Sl. 8. Podobno kakor na sliki 7

70:1



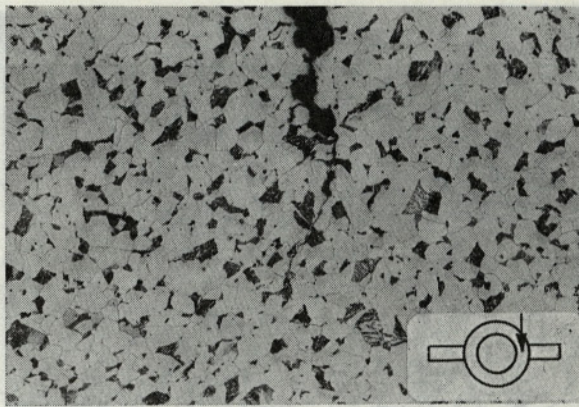
Sl. 10. Jedkan obrusek. Prečni prerez cevi. Mikro-raspoka na prehodu med lamelo in zvarom. Levo od nje je področje hladno deformiranega jekla. Na posnetku se vidi mikrostruktura cevi in zvara

70:1



Sl. 9. Podobno kakor na sliki 7

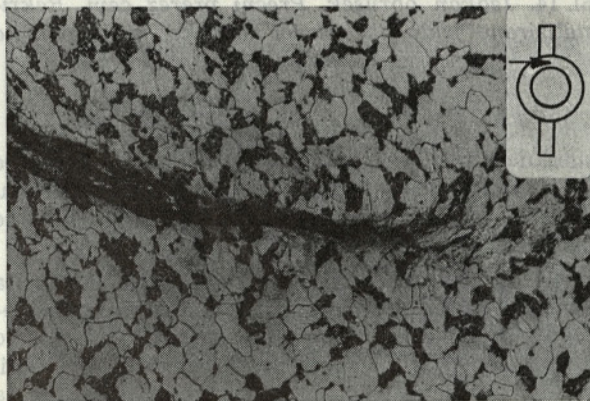
70:1



Sl. 11. Jedkan obrusek. Prečni prerez cevi. Čelo raspoke v notranjosti stene cevi. Oblika je značilna za postopno širjenje raspoke

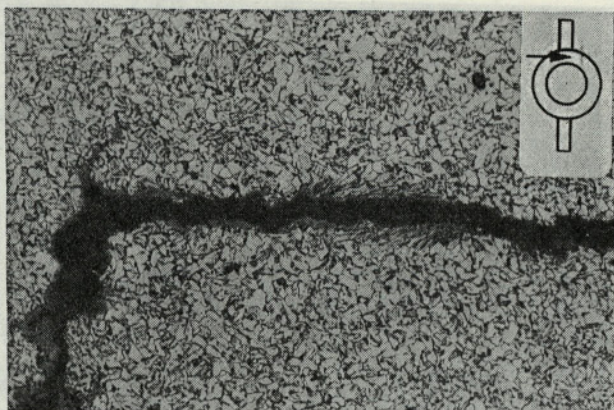
140:1

kjer je razpoka komaj zaznavna na mikroposnetku (sl. 10). Na posnetkih 7 do 9 je praktično nemogoče razločiti, ali je razpoka interkristalna ali intrakristalna. Slika 11 prikazuje, da je potek raspoke intrakristalen in jo lahko v konici tvori zaporedje razširjenih in nitastih odsekov. Na koncu te raspoke ni opaziti mikroskopsko zaznavnih znakov hladne deformacije jekla. V drugih primerih pa je bilo ob konici področje izredno močne deformacije jekla v hladnem (sl. 12). Ta ni samo znak za zelo močne napetosti, ki spremljajo prodiranje čela raspoke v notranjost stene cevi, ampak tudi znak za dobre deformacijske sposobnosti jekla in s tem dokaz njegove kakovosti, kar so potrdile mehanske in tehnološke preiskave cevi, izrezanih iz cevne stene kotla [1]. Na nekaterih vzorcih smo opazili področje močno deformiranega jekla ob raspoki v notranjosti stene cevi, neodvisno od tega ali so bile ustnice raspoke razširjene ali pa zelo blizu skupaj (sl. 13). Našli smo tudi primer, ko je bila površina raspoke pokrita s škajo, kristalna zrna ob njej pa so bila mnogo drobnejša kakor globlje v jeklu (sl. 14). Oboje je znak, da se je cev po na-



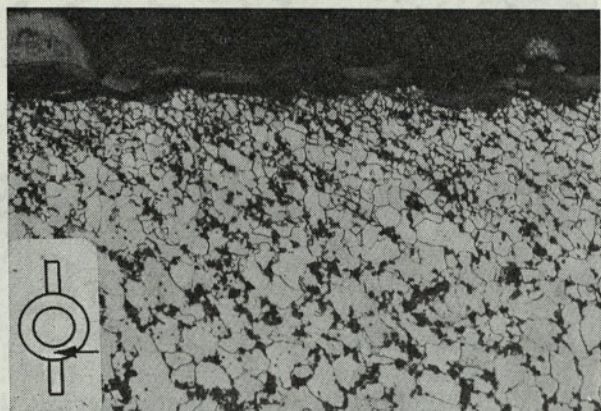
Sl. 12. Jedkan obrusek. Prečni prerez cevi. Čelo raspoke, ki se je razširila zaradi plastične nestabilnosti pri strižni obremenitvi. Ob konici je področje močno deformiranega jekla. Raspoka leži v področju, kjer je ogrevanje pri varjenju spremenilo mikrostrukturo jekla

200:1



200:1

Sl. 13. Jedkan obrusek. Prečni prerez cevi. Ozko in majhno področje močno deformirane mikrostrukture na obeh straneh razpoke



200:1

Sl. 14. Jedkan obrusek. Prečni prerez cevi. Rekristalizirano jeklo ob ustnici razpoke, ki je pokrita s škajo

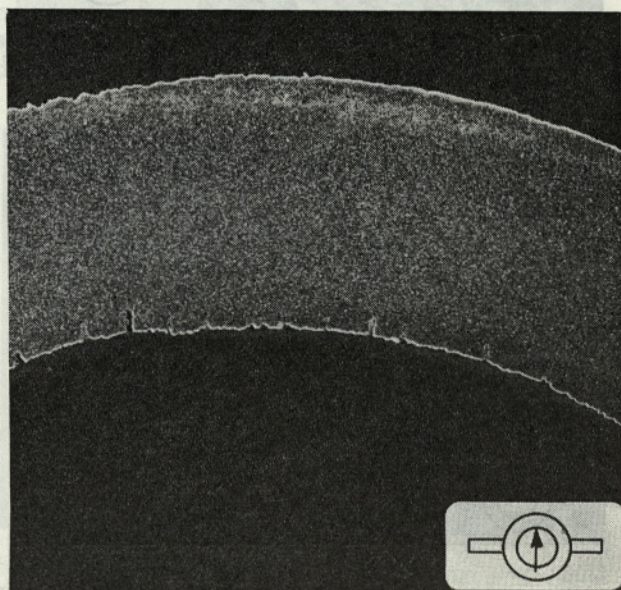
stanku razpoke ogrevala, kar je omogočilo škajanje in rekristalizacijo jekla tam, kjer je ob nastanku razpoke ali ob njenem širjenju prišlo do lokalne deformacije jekla v hladnem.

Mikrostruktura jekla je bila iz ferita in perlita ter razmeroma drobno zrnata, kar se vidi na številnih posnetkih. Jeklo je bilo večinoma nekoliko razogljčeno ob notranji in ob zunanji površini, vendar globina z ogljikom osiromašenega sloja jekla ni presegala normalne globine, ki jo povzročajo različna ogrevanja jekla pri izdelavi in toplotni obdelavi cevi.

Često smo našli razpoke na cevni steni diametralno nasproti netesnosti. Te razpoke so bile praviloma morfološko enake tistim, ki smo jih že opisali, vendar razmeroma plitve.

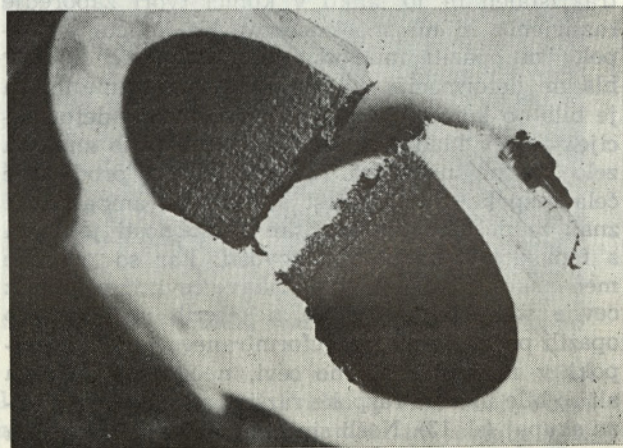
C. POŠKODBE NA NOTRANJI POVRŠINI CEVI

Te poškodbe so bile dvojne narave. Nekatere so bile ostre intrakristalne zajede, globoke do 0,7 mm in najbolj pogoste in globoke v steni pod spojno lamelo, kar se lepo vidi na slikah 4 in 5, zelo pogosto pa tudi na delu površine stene cevi, ki leži približno pod pravim kotom na ravnino cevne stene (sl. 15). Aksialna dolžina teh zajed oz. razpok je bila od nekaj mm do 10 in več cm (sl. 16 in 17). Pogosto so ležale ena blizu druge in s prostim očesom jih je bilo videti kot prekinjene



7:1

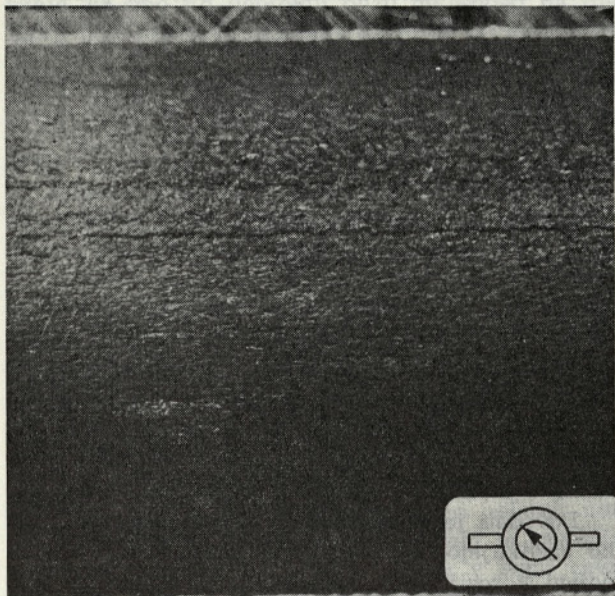
Sl. 15. Jedkan prečni prerez stene cevi. Zajede na notranji površini na delu stene cevi, približno pod pravim kotom glede na ravnino cevne stene



2:1

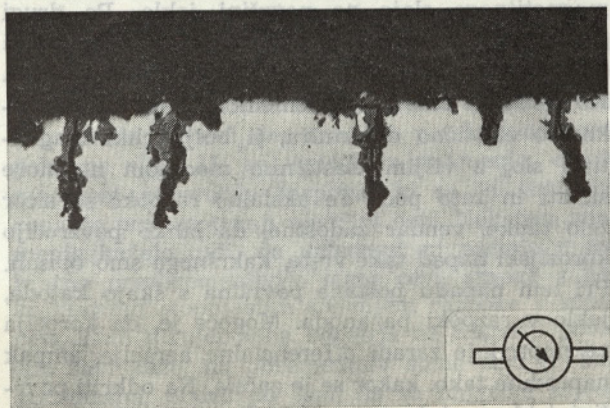
Sl. 16. Zajede na notranji površini cevi

in prepognjene dele večje razpoke. Opazovanje pod mikroskopom je pokazalo, da zajede izhajajo iz navidez ravne površine (sl. 18) ali iz zaobljenih jamic (sl. 19). Številne med njimi so imele v sredini tanko razpoko (kapilaro). Navadno je bil korozijski produkt v srednjem delu zajed ob kapilari zelo porozen, ob stiku z jeklom pa gost. Zajede niso povzročile nobenega dodatnega razogljichenja jekla. Opazili smo namreč, da je bil pogosto korozijski produkt v neposrednem stiku s perlitom (sl. 20). Iz tega smemo zanesljivo sklepati, da zajede niso nastale pri procesu izdelave in toplotne obdelave cevi.



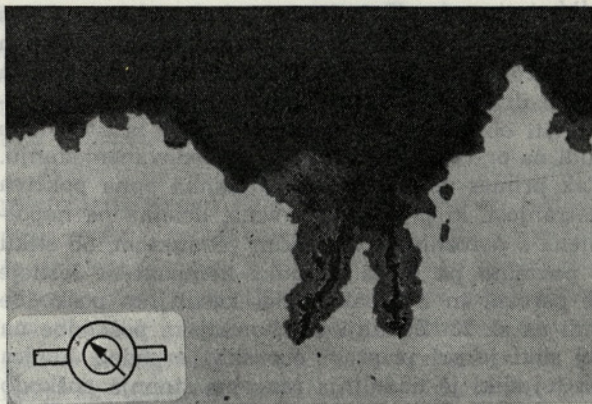
3,2:1

Sl. 17. Aksialni prerez cevi. Vz dolžne zajede na notranji površini cevi



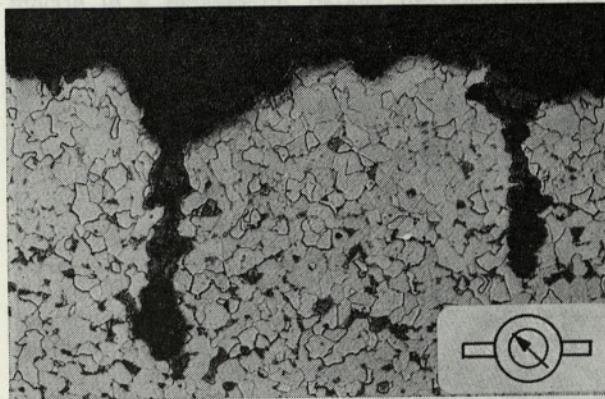
50:1

Sl. 18. Poliran obrusek prečnega prereza cevi. Zajede na notranji površini



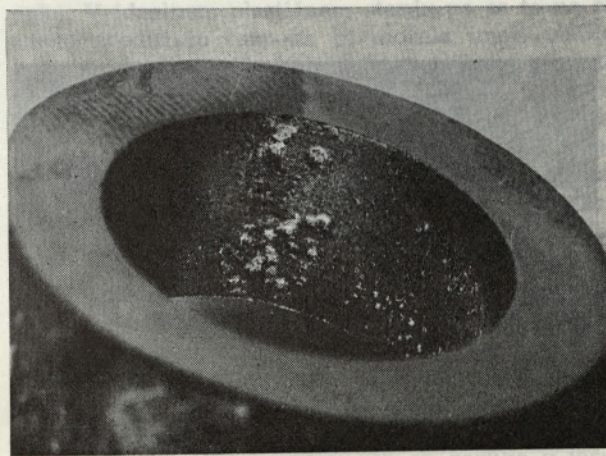
100:1

Sl. 19. Poliran prečni prerez cevi. Zajeda na dnu zaobljene jamice



100:1

Sl. 20. Jedkan prečni prerez stene cevi. Zajede segajo do perlitnih zrn

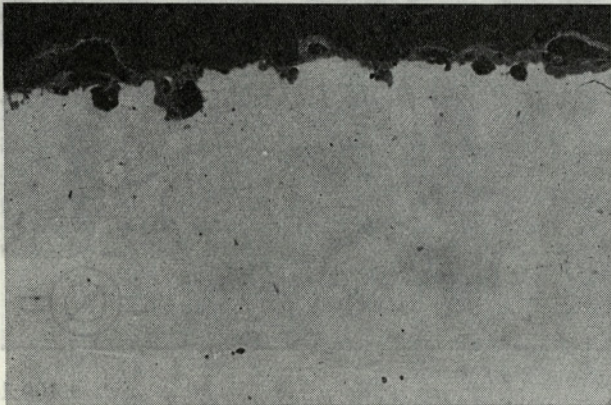


3,3:1

Sl. 21. Bradavičaste korozijske tvorbe na notranji površini cevi

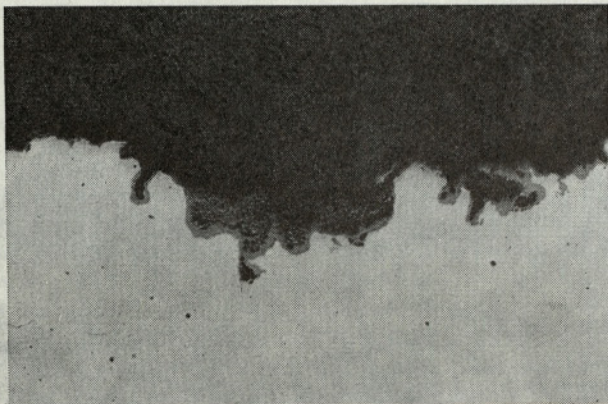
Druga vrsta poškodb na notranji površini cevi so bile bradavičaste tvorbe, ki so se že ob rahlem dotiku sesedle (sl. 21). Bile so bolj pogoste na enem delu površine. Le izjemoma smo uspeli pripraviti obruske tako, da so ostale te kraste vidne tudi na prečnem prerezu v nepoškodovanem stanju. Tak primer vidimo na sl. 22: tanka opna pokriva notranjost, ki je deloma prazna, deloma pa napolnjena s poroznim korozijskim produktom, ob stiku s površino pa je ta produkt kompakten. Jasneje se porozni in kompaktni del korozijske poškodbe vidi na sl. 23. Zunanji del korozijske poškodbe na tej sliki je pri pripravi obruska razpadel. Jamica na tej sliki je nadaljnja razvojna stopnja poškodb na sl. 22. Iz njenega dna prodirajo zajede dalje v notranjost cevi, v začetnem stanju pa je gladka.

Globina razogljivenja ni večja pod temi poškodbami. To dejstvo ter struktura in poroznost korozijskega produkta so dokaz, da poškodbe ne izvirajo iz procesov izdelave in toplotne obdelave cevi.



50:1

Sl. 22. Poliran prečni prerez stene cevi. Sestava in oblika majhnih bradavic



50:1

Sl. 23. Poliran prečni prerez stene cevi. Iz jamic se začneja rast zajed

Oblikovne značilnosti poškodb na notranji površini cevi omogočajo, da jih zanesljivo označimo kot produkt koroziije zaradi prisotnosti kisika v kotlovski vodi in ceveh. Ta vrsta elektrokemične koroziije se začne ob naključni površinski napaki, spremembi profila površine, najbolj pogosto pa na mestu, kjer je magnetitna plast, ki pokriva notranjo površino kotlovskih cevi, iz kakršnega koli razloga pretrgana. V tem primeru je gola površina jekla anoda, z magnetitom pokrita okolica pa katoda. Velika katoda in njej primerna količina kisika, ki se nanjo adsorbira, pospešuje korozijski napad jekla na anodnem mestu. Taka vrsta koroziije je v strokovni literaturi znana kot koroziija zaradi diferencialne aeracije. Navadno so poškodbe zaradi te koroziije plitve vdolbine z razmeroma gladkim dnom, torej take, kakršne smo ugotovili tudi mi. Po podatkih iz literature [2] ostaja oblika korozijske poškodbe nespremenjena tudi, če je korodirana površina obremenjena s statično natezno napetostjo. V primeru, da se ta obremenitev spreminja v razmeroma dolgih časovnih intervalih, se pojavljajo na dnu jamičastih poškodb še ostre zajede ali razpoke, ki prodirajo v globino mnogo hitreje kakor jamičasta koroziija in potekajo v glavnem intrakristalno. Hitrost rasti teh razpok je odvisna od sprememb napetostnega stanja v jeklu, to je podobno kakor pri razpokah zaradi utrujenosti, zato pojav imenujemo korozijska utrujenost. Na ta način pride do nastanka poškodb, ki smo jih prej označili kot zajede in imajo v aksialni smeri različno dolžino in različno globino.

Povedati je treba, da se literaturni viri nekoliko razlikujejo v razlagi, kaj je potrebno, da se pojavi korozijska utrujenost. Po eni razlagi zadostuje hkraten učinek kisika in izmeničnih napetosti na korodirani površini jekla. Po tej razlagi nastajajo vzdolž napetostnih linij anodni pasovi, kjer prihaja do pospešenega korozijskega napada jekla. Za začetek koroziije torej ni potrebna prisotnost magnetitnega sloja na površini jekla. Po drugi razlagi je vzrok za koroziijo razlika v plastičnosti med magnetitno plastjo in spodaj ležečim jeklom. Ko se stena cevi pri spremembi napetosti malenkostno elastično deformira, ji bolj krhki magnetitni sloj z višjim elastičnim modulom ne more slediti in zato počí. Te aksialne razpoke so sicer zelo tanke, vendar zadostne, da lahko povzročijo korozijski napad take vrste, kakršnega smo opisali. Pri tem napadu postane površina s škajo katoda, jeklo v razpoki pa anoda. Mogoče je, da koroziija ne napreduje zaradi diferencialne aeracije, ampak napreduje tako, kakor se je začela. Na odkriti površini jekla nastaja nova plast magnetita, ki ob naslednji spremembi napetosti ponovno počí, in proces se nadaljuje, dokler je površina stene cevi izpostavljena izmeničnim obremenitvam.

Iz naših opazovanj je razvidno, da so zajede večinoma napolnjene s poroznim korozijskim produktom, vsaj v srednjem delu. Tako sestavo korozijskega produkta v zajedi lahko razloži le diferencialna aeracija. Res je, da smo opazili tudi zajede, ki so bile napolnjene s kompaktnim korozijskim produktom. Take zajede so bile večinoma zelo ozke in je zato mogoče, da v njih še ni začel nastajati porozni srednji del. Verjetneje je, da so v preiskanih ceveh nastale aksialne zajede zaradi učinka izmeničnih napetosti in diferencialne aeracije.

Ta nekoliko bolj podrobna razprava nam hkrati pomaga, da razložimo vzrok za nastanek zajed škaje, ki smo jih ugotovili blizu netesnosti na zunanji površini cevi. Mislimo, da pride do lokalnega globljega škajanja zaradi pokanja škaje pri izmenični obremenitvi površine cevi. Statična obremenitev in različna mikrostruktura namreč ne povzročata razlike v hitrosti škajanja jekla.

D. ANALIZA REZULTATOV IN VZROK ZA NASTANEK NETESNOSTI

Iz zapisanega smemo sklepati, da sta jasna vzrok in mehanizem za nastanek aksialnih poškodb na notranji površini cevi. Priti pa moramo do naslednje stopnje naše razprave in ugotoviti, zakaj so nastale netesnosti v cevni stenah. Notranje poškodbe so bile najbolj pogoste in najgloblje prav pod spojnimi lamelami, torej v neposredni bližini netesnosti. V vseh preiskanih vzorcih nismo našli niti na en primer, ko bi se razpoka, pa naj je privedla do netesnosti, ali pa se je ustavila v steni cevi, širila od notranje proti zunanji površini cevi, pač pa so bila številna znamenja za širjenje razpoke v nasprotni smeri. Smemo torej trditi, da je korozija povzročila na notranji površini cevi velike poškodbe, zaradi katerih se je zmanjšala uporabna vrednost cevi, niso pa te poškodbe neposreden vzrok za nastanek netesnosti.

Morfološke značilnosti razpoke in netesnosti, obstoj v hladnem deformiranih področjih ob začetku, v srednjem delu in na koncu razpok, ki so se ustavile v steni, ter značilen potek konca razpoke na sliki 11, so zanesljiva znamenja, da je netesnost povzročila razpoka, ki se je širila od zunanje proti notranji površini cevi. Nekatera znamenja kažejo tudi, da netesnost ni nastala z enkratno preobremenitvijo stene cevi, ampak z nekajkratnim stopnjastim širjenjem razpoke v steno cevi. Tudi utrujenostna korozija na notranji površini cevi kaže, da obremenitev stene cevi ni bila konstantna. Sodeč po tem, da so največje zajede v ravnini cevne stene pod spojnimi lamelami in približno pravokotno nanjo, je mogoče sklepati, da so bile tudi tu največje napetosti. Največja napetost na zunanji površini je bila dosežena na stiku

med spojno lamelo in steno cevi. Vzrok za to je bila geometrična oblika (spojna lamela je debelejša in mogoč je zarezni učinek), pa tudi notranje napetosti, nastale zaradi varjenja. To domnevo potrjuje tudi trdnostni izračun.

Jeklo, iz katerega so cevi, ima dobro plastičnost, morfologija razpok kaže, da je tudi prelom plastičnega značaja. Iz fenomenološkega vidika sta mogoča dva vzroka, zaradi katerih se lahko pojavi plastičen prelom jekla. Eden je nastanek in združevanje por (tak prelom dobimo pri nateznih in upogibnih preizkusih), drugi pa je prelom zaradi lokalizirane plastične nestabilnosti. Značilnosti prelomnih površin in razpok, ki segajo od zunanje stene v notranjost stene cevi, prvi način preloma izključujejo. To kaže, da se je pretrgala stena cevi zaradi lokalizirane plastične nestabilnosti. Pri tem načinu preloma pride do plastične strižne deformacije le v neposredni okolici dekohezijske ravnine, kjer so največje tangencialne napetosti. Za nastanek take vrste dekohezije morajo biti po Spretnaku [3] izpolnjeni trije osnovni pogoji: material se mora v območju dekohezije obnašati kot plastično telo, dekohezija se lahko začne le ob prosti površini in prisoten mora biti gradient napetosti.

Prvi pogoj terja, da se spremeni reološko stanje jekla, tako da se jeklo z nadaljevanjem deformacije v hladnem ne utrjuje več in zato napetost ne zraste čez mejo tečenja. Takega idealnega stanja jeklo sicer ne more doseči, vendar se mu dovolj približa pri močnih deformacijah. Znak, da to stanje ni popolnoma doseženo, je prelomljen potek razpoke, ki je dobro viden, še posebno, če gledamo razpoko pod mikroskopom. Iz tega je razvidno, da so komponente mikrostrukture, feritna in perlitna zrna in kristalne meje ter kristalografske smeri drsenja dislokacij ohranile vpliv na širjenje razpoke. V idealnem plastičnem stanju pa se to ne bi smelo zgoditi in razpoka bi morala imeti obliko položne hiperbole. V plastičnem stanju je po Spretnaku jeklo nagnjeno k nestabilnosti v ravnini največje strižne napetosti. Deformacija se približuje tej ravnini, ko pa jo prekorači, lahko geometrične razmere povzročijo, da njeni tangencialni komponenti v ravnini maksimalne strižne napetosti nista na obeh straneh te ravnine enaki. Razlika povzroči, da material na eni strani ravnine zdrsne proti drugi in nastane makroskopska dekohezija oz. razpoka. Smer te dekohezije se ravna po ravnini maksimalne strižne napetosti. Drugi pogoj — prosta površina — omogoča, da se razpoka odpre. Če te površine ni, ena stran dekohezijske ravnine ne more zdrsniti proti drugi. Zaradi tega drsenja nastane na površini rob oz. razlika v višini med stranjo, ki je zdrsnila proti površini, in stranjo, ki je ostala na mestu ali pa se je premaknila v nasprotni smeri.

Tretji pogoj — gradient napetosti — je bil v našem primeru gotovo izpolnjen. Dokaz za to je omejen obseg netesnosti in razpok. Po Spretnaku je za nastanek nestabilnosti potrebna tem manjša deformacija, čim večji je napetostni gradient.

Če značilnosti poškodb na ceveh presojamo z vidika značilnosti dekohezije zaradi plastične nestabilnosti pri strižni obremenitvi, ugotovimo naslednje: opazili smo zelo tanek sloj deformiranega jekla tik ob ustnicah razpoke (glej sliko 14). Usmeritev kristalnih zrn pove, da je deformacija na eni strani razpoke nastala v nasprotni smeri, kakor na drugi strani; deformirano področje je tudi ob konici razpoke (glej sl. 12). V mnogih primerih je bilo opaziti, da je bila stran netesnosti s spojno lamelo pomaknjena proti središču cevi. Lahko bi nas zavedla oblika razpoke na sliki 11, vendar je oblika konice razpoke na tej sliki zelo značilna za postopno napredovanje razpoke.

Torej zagotovo lahko sklepamo, da je do nastanka razpok in netesnosti prišlo zaradi plastične nestabilnosti pri strižni preobremenitvi.

Na slikah 7, 8 in 9 vidimo področje močno deformiranih zrn, ki ima prečno na prerezu stene cevi obliko polovice elipse. Začetek tega področja je tik ob površini, največja širina je dosežena na oddaljenosti pri 0,15 do 0,2 mm od površine cevi. Ta oddaljenost je praktično neodvisna od globine razpoke. Oblika zrn oziroma njihova stlačenost ustvarja vtis, da se je deformacija pojavila z neke vrste zasukom oziroma strigom v sferični ravnini, kjer je deformacija največja. Ne zdi se nam mogoče, da bi to deformirano področje nastalo potem, ko se je razpoka odprla, torej je do lokalne deformacije prišlo med rastjo razpoke ali — še verjetneje — pred njenim nastankom.

Povedati je treba, da teh polelipsastih področij nismo našli ob netesnostih, temveč le v nekaterih primerih, ko se je razpoka ustavila različno globoko v steni cevi. Torej nastanka tega področja ne moremo obravnavati kot nujnega pogoja za začetek razpoke, ki je privedla do netesnosti, temveč ga obravnavamo kot spremljevalen pojav.

Razpoka se začne tam, kjer dosega deformirani pas površino, nato pa temu ne sledi, ampak se od njega odmakne. Tu je torej navidezen odmik od pravila, da se razpoka širi v ravnini največjih strižnih napetosti. Iz tega lahko sklepamo dvojje: ali je deformacija nastala pred začetkom razpoke in je spremljajoča relaksacija premaknila ravnino največjih strižnih napetosti v ravnino razpoke (mogoče so pri tem imele določeno vlogo varilne napetosti), ali pa — kar se nam zdi verjetneje — je strižna deformacija povzročila le zelo majhen začetek razpoke ob površini, razpoka pa se je nato širila postopoma pri posameznih močnejših obremenitvah ali pri preobremenitvah cevne stene. Ta način nastanka razloži, zakaj jeklo ni hladno deformirano ob vsej razpoki, in je v skladu z drugimi opazovanji, ki kažejo, da je netesnost nastala

s postopnim napredovanjem razpoke v steno cevi. Pri takem širjenju se konica razpoke izogiba deformiranemu področju, ki je trše.

Ostane nam še, da določimo kakšen je izvir sile, ki je povzročila netesnosti takega obsega. Iz rezultatov preiskave izhaja, da se je velika obremenitev večkratno ponovila, preden se je pojavila netesnost. Obseg netesnosti pove, da je bila preobremenitev zelo velika, rezultati preiskave pa povedo, da preobremenitev ni bila v zvezi s tlakom v ceveh. Logičen je torej sklep, da so poškodbe, najprej razpoke in nato netesnosti, nastale zato, ker cevna stena ni mogla slediti dilatacijam, ki jih je povzročala sprememba njihove temperature. Oviranje temperaturne dilatacije povzroča zadostne sile, da lahko počni material tudi z največjimi prerezi. Dokaz za to so varilne razpoke in razpoke, ki nastajajo pri toplotni obdelavi jekla.

SKLEP

Metalurško smo preiskali odrezke zvarjenih cev-nih sten visokotlačnega parnega kotla. V ceveh, ki so sestavljale te stene, so nastale netesnosti. Preiskava je pokazala, da so na notranji površini cevi poškodbe zaradi navzočnosti kisika v ceveh, zato je zmanjšana uporabna vrednost cevi. Pokazala pa je tudi, da so netesnosti nastale tako, da se je razpoka širila postopoma od zunaj v steno cevi in jo končno predrila. Morfološke značilnosti jekla ob netesnosti in ob razpokah, ki so se ustavile različno globoko v cevi, kažejo, da je do začetka poškodb prišlo najverjetneje zaradi lokalizirane plastične nestabilnosti kot posledice čezmerne strižne napetosti v kritični točki cevne stene, v zarezi med cevno steno in nanjo privarjeno spojno lamelo, s katero je bila cev spojena v cevno steno.

Če enkratna preobremenitev ni zadostovala, da bi povzročila netesnost na ogroženi cevi, je nastala le razpoka, ki se je postopoma širila pri naslednjih obremenitvah in nazadnje povzročila netesnost cevi. Morfologija poškodbe in upoštevanje pogonskih razmer, katerim je bila izpostavljena cevna stena, vsilujeta sklep, da so ovirane temperaturne dilatacije najverjetnejši vzrok za nastanek preobremenitve, ki so privedle do netesnosti v stenah.

LITERATURA

- [1] J. Žvokelj: Poročilo o preiskavi cevi iz membranske stene parnega kotla. Poročilo Metalurškega inštituta v Ljubljani, marec 1973.
- [2] H. Uhlig: The Corrosion Handbook: J. Wiley, New York, 1966.
- [3] W. Spretnak: Faktorji, ki vplivajo na plastičnost ob zarezi pri kovinah in zlitinah. Rudarsko-metalurški zbornik, 1972, št. 1, str. 33 do 41.

Naslov avtorjev: dr. Franc Vodopivec,
Metalurški inštitut, Ljubljana,
dr. Ladislav Kosec,
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana