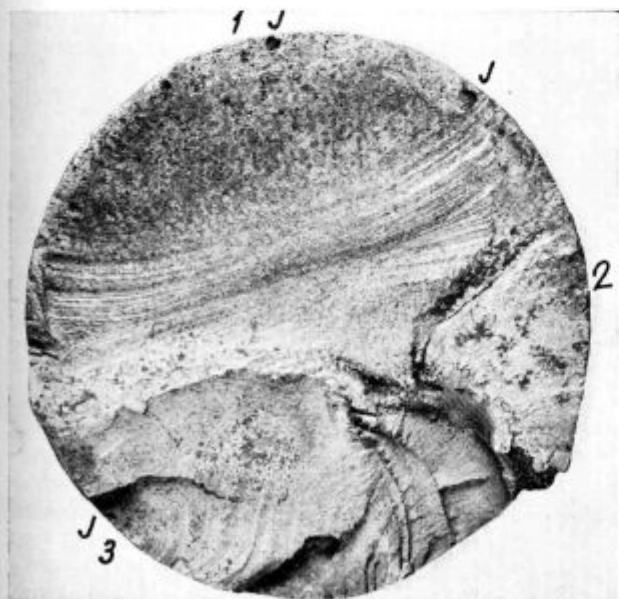


## Primeri iz dela metalografskega laboratorija

*Metalografski laboratorij je mesto, kjer se marsikdaj zberejo zelo zanimivi primeri konstrukcijskih elementov z najrazličnejšimi napakami v materialu. Na metalografu je potem, da najde ranljiva mesta v materialu in ugotovi zakaj nek konstrukcijski element ne more več opravljati svojega dela.*

Pod tem naslovom nameravamo opisati nekaj primerov iz naše laboratorijske prakse. Primeri so zbrani ali po funkcionalni sorodnosti konstrukcijskih elementov, ali po vrsti napak, ki se pokažejo pri več različnih delih. Najprej bomo navedli 4 primere porušitve gredi, do katerih je prišlo iz različnih vzrokov.

1. V prvem primeru smo morali dognati vzroke porušitve gredi motorne ladje. Gred je bila 3 leta v pogonu. V preiskavo smo dobili približno 30 cm dolg kos gredi ob prelomu. Prelomna ploskev je bila nekoliko zarjavela in mastna. S topili smo odstranili vse organske snovi. Že pred čiščenjem, še jasneje pa po njem, se je pokazala površina z značilnimi znaki utrujenostnega preloma (slika 1). Začel se je v treh lokalno in verjetno tudi časovno ločenih žariščih (1, 2, 3 na sl. 1) na površini gredi.

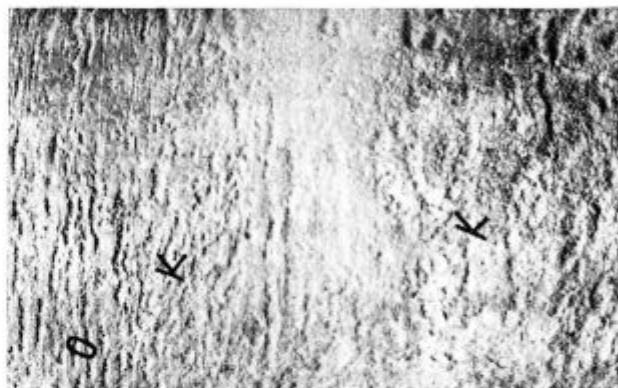


Slika 1

Makroskopski posnetek prelomne površine gredi. Vidi se tri žarišča (začetki) utrujenostnega preloma (1, 2, 3) in jamice (J)

Na utrujenostnem delu preloma je opaziti tudi posamezne jamice.

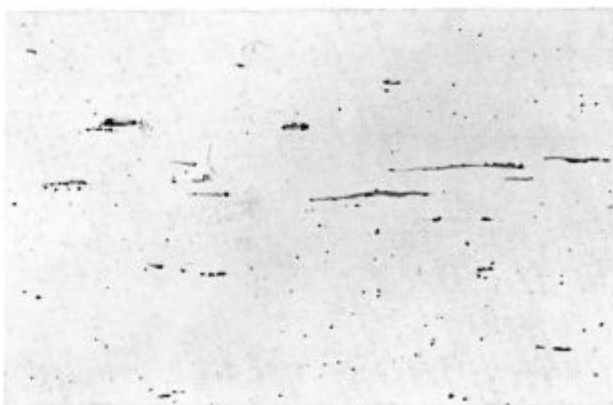
Površina gredi v neposredni okolici preloma kaže znake korozijskega napada (K), mesta označena z O, pa pričajo po vsej verjetnosti o grobi mehanski obdelavi gredi (slika 2). Mestoma so bile na površini tudi jamice nad 5 mm premera in do 2 mm globine.



Slika 2

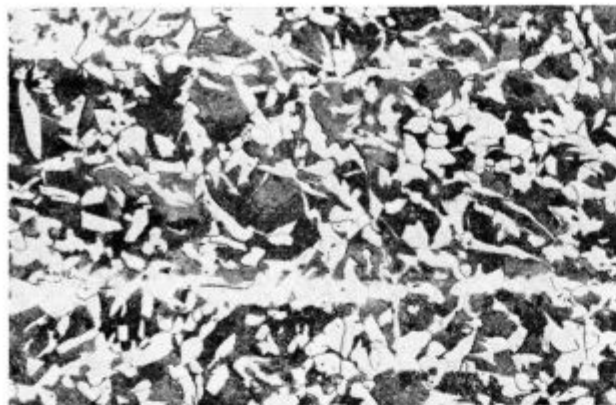
Površina gredi z mesti korozijskega napada (K) in grobe obdelave (O)

Iz gredi smo izrezali na več mestih vzorce za metalografsko preiskavo. Preiskava je pokazala, da vsebuje material sicer precejšnjo množino vključkov sulfidnega in oksidnega tipa. Vendar njihova množina in razporeditev (sl. 3) nista takšni, da bi ju lahko krivili za porušitev gredi. Nismo opazili sledov žilindre ali večjih notranjih napak, ki bi izzivale iz ingota.



Slika 3

Nekovinski vključki (sulfidi in oksidi), pollrano, pov. 100x



Slika 4

Mikrostruktura z značilnimi znaki trakaste strukture, ferit, perlit. Jedkano z nitalom (2%) pov. 100×

Mikrostruktura je bila sestavljena iz normalne kombinacije ferita in perlita, razporejenih v značilnem trakastem razporedu. Velikost sekundarnega zrna je bila 6...7, mestoma pa so se pojavljala večja zrna razreda 5 po lestvici ASTM. Deloma zrnati perlit je bil tudi znak, da je bila gred predhodno mehko žarjena na temperaturi pod 700° C (sl. 4).

Z metalografsko preiskavo torej nismo mogli ugotoviti v materialu nobene napake, o kateri bi lahko sklepali, da je povzročila prelom. Po drugi

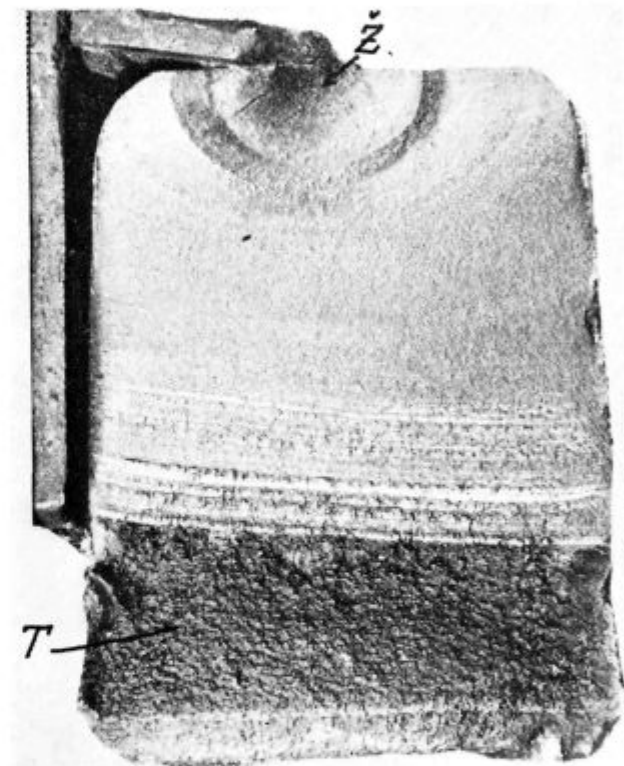


Slika 5

Posnetek gredi ob prelomu (spodaj). Vidita se tudi zvar (Z) in privarjeni element (levo). Pomanjšano pribl. 2×

strani pa smo opazili, da je bila kvaliteta površine gredi zelo slaba, poškodbe na njej so bile posledica neprimerne obdelave in močnega lokalnega korozijskega napada. Takšne poškodbe so najverjetneje sprožile začetek razpoke, ki se je pri trajni dinamični obremenitvi gredi čedalje bolj širila, dokler se ni gred zaradi zmanjšanja nosilnega preseka v trenutku prelomila. Za to govori tudi dejstvo, da so vsa tri žarišča utrujenostnega preloma na mestih, kjer je na površini gredi opaziti močan korozijski napad in zelo slabo obdelavo.

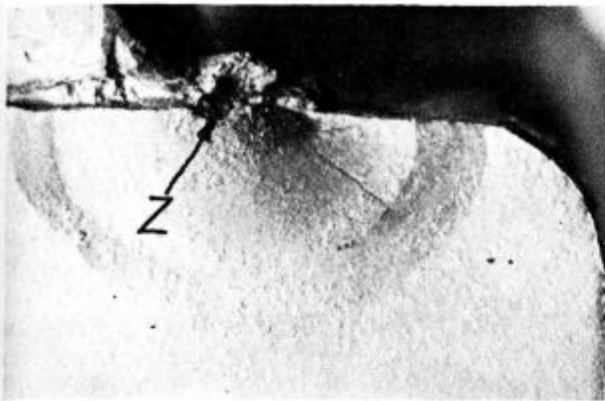
2. Drugi primer je gred avtomobilske prikolice, ki se je pri avtomobilski nesreči odtrgala od šasije in se popolnoma ukrivila. V servisni delavnici so jo zravnali in ponovno vgradili. Po nekaj tisoč kilometrih vožnje pa se je gred zlomila na istem mestu, kjer je bila preje upognjena oziroma na mestu, kjer je bila zravnanana.



Slika 6

Makroskopski posnetek prelomne površine gredi; zgoraj utrujenostni del preloma z žariščem (Z), spodaj del, ki se je prelomil trenutno (T). Pomanjšano pribl. 1,1×

V preiskavo smo dobili oba konca prelomljene preme (gredi), na katerih sta bili prelomni površini še nepoškodovani in dobro ohranjeni. Slika 5 prikazuje detajl gredi ob prelomu s privarjenim elementom. Oblika prelomne površine (sl. 6, 7) je tipična za utrujenostni prelom. V zgornjem delu preloma, ki je nastal zaradi utrujenosti, so vidne značilne črte — šrafe, katerih medsebojna razdalja predstavlja postopno napredovanje razpoke med izmenično obremenitvijo. Spodnji del preloma (T) je nastal tedaj, ko se je nosilni presek gredi

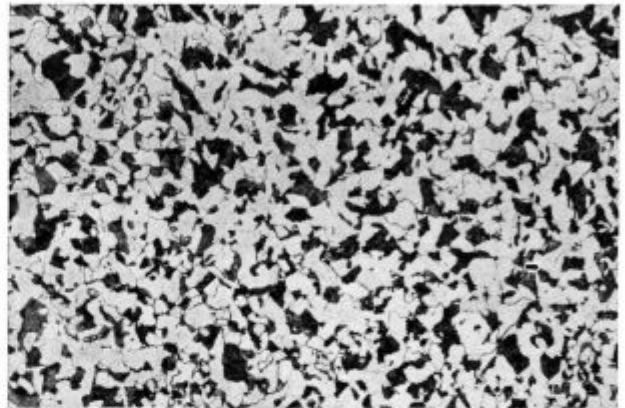


Slika 7

Makroskopski posnetek preloma ob žarišču (začetku) utrujenostnega preloma gredi. Različen videz preloma ob zajedi (Z) in pod njo. Povečano približno 1,7-krat

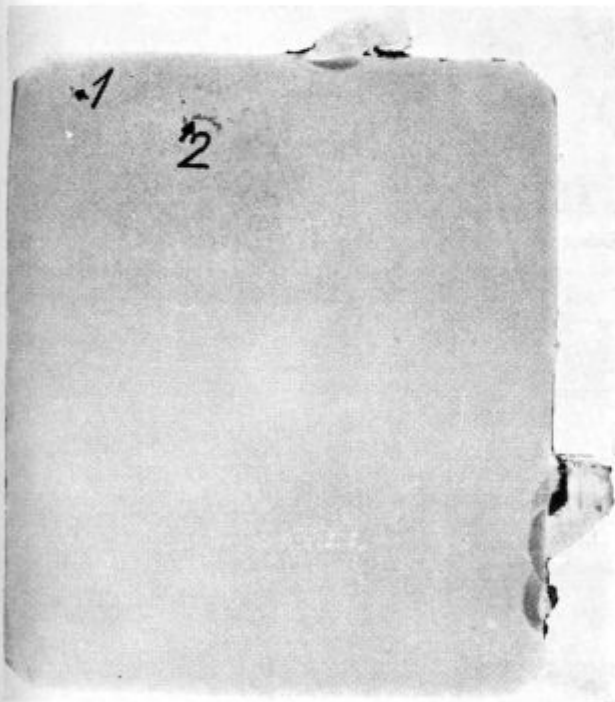
zmanjšal in se zaradi prevelike obremenitve trenutno prelomil. Utrujenostni prelom se je začel v enem samem žarišču, ki je na sliki 6 in 7 (Z) v temnem področju zgoraj. Na sliki 7 pa kaže puščica mesto varilne zajede (z), ki je bila po vsej verjetnosti začetek utrujenostnega preloma. Da je nastal prelom v tem delu nam pove tudi oblika prelomne površine okoli zajede, ki se bistveno loči od preostale prelomne ploskve.

Makroskopsko jedkani prečni presek gredi, zvara in privarjenega elementa ne kaže nobenih razpok in nehomogenosti (izcej). Pač pa smo opazili mesta z velikimi vključki žlindre (slika 8). Kaže pa, da vključki žlindre niso vplivali na funkcionalnost, prav gotovo pa niso povzročili porušitve. Sestava jekla (okoli 0,15...0,2% C) je normalna za namene, katerim je gred služila. Tudi toplotna obdelava in s tem struktura sta običajni. Gred je bila normalizirana, struktura pa je bila sestavljena iz ferita in perlita (slika 9).



Slika 9

Mikrostruktura osnovnega materiala gredi. Normalizirano. Ferit in perlit, pov. 100-krat, jedkano z nitalom (2%)



Slika 8

Makroskopski posnetek prečnega preseka gredi. Zgoraj zvar ob katerem se je začela širiti razpoka. Levo spodaj od zvara sta vidna dva večja vključka žlindre (1, 2). Temna polja ob navarjenih elementih so področja toplotnega vpliva na osnovni material gredi. Jedkano z nitalom (4%). Zmanjšamo približno 1,1-krat

Na meji med materialom gredi in dodanim materialom zvara smo opazili zelo velike vključke varilne žlindre (slika 10). Na istih mestih smo opazili v zvaru tudi drobne razpoke. Struktura zvara je normalna, prav tako pa tudi struktura prehodne cone, ki sestoji iz bainita in delno martenzita (slika 11). To zadnje pove, da gred po varjenju ni bila toplotno obdelana.

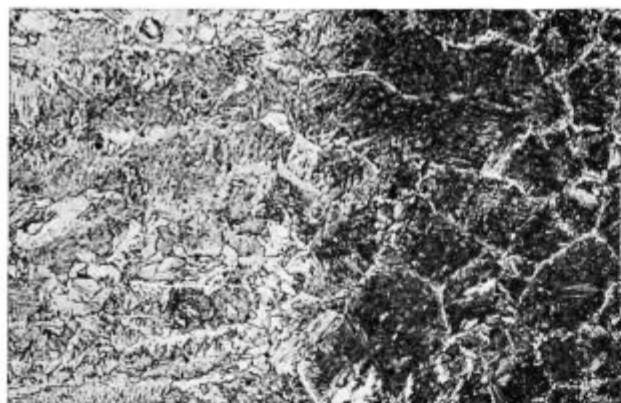
Vzrok nastanka razpoke smo lahko iskali v naslednjem:



Slika 10

Veliki vključek varilne žlindre na meji med dodanim materialom in osnovnim materialom gredi. Vidijo se tudi drobne razpoke na strani zvara. Pov. 100-krat, jedkano z nitalom (2%)



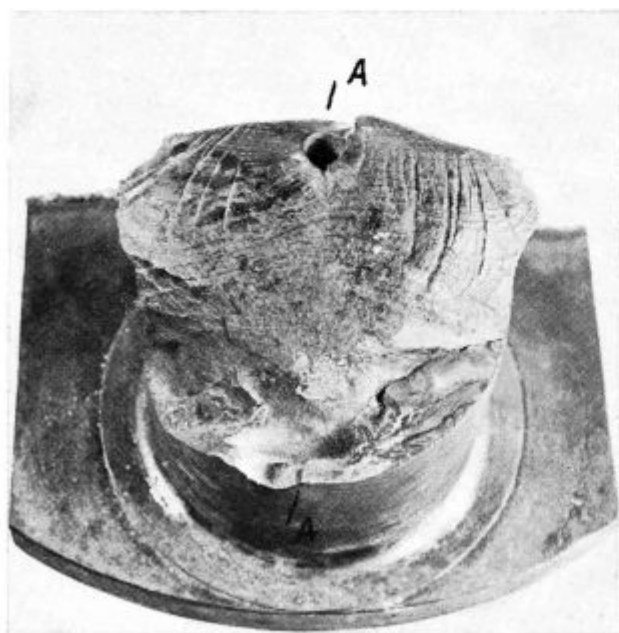


Slika 11

Prehod med navarjeno kovino in cono toplotnega učinka v osnovni kovini. Levo lita struktura zvara, desno toplotna cona z bainitom in martenzitom. Pov. 200 $\times$ , jedkano z nitalom (2%)

Najverjetneje je bil začetek preloma v zajedu, kakršno vidimo na slikah 6, 7, ki je nastala zaradi nekvalitetnega varjenja. Pod vplivom izmenične obremenitve je zajedu lahko postala začetek utrujenostnega preloma, posebno še zato, ker je v toplotni coni zvara, čigar struktura je mnogo bolj trda in krhka od materiala gredi. Material gredi je zelo plastičen in prenese velike deformacije, zato je prav malo verjetno, da bi nastale razpoke pri ravnanju ali nezgodi. Obe možnosti pa sta majhni tudi zato, ker bi pri popravilu gredi opazili razpoko.

Začetek razpoke utegne biti tudi posledica velikih vključkov varilne žilindre in pa majhnih razpok



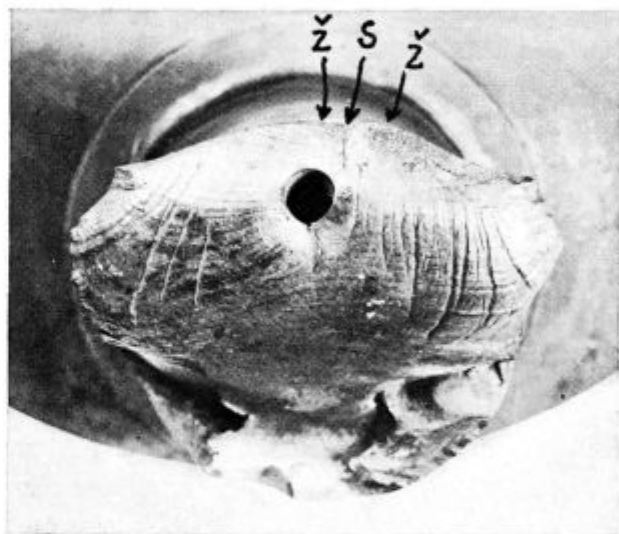
Slika 12

Prelomna površina kolenčaste gredi z utrujenostnim delom (zgoraj) in delom, ki je nastal pri trenutnem prelomu (spodaj). Pomanj. pribl. 1,8 $\times$

v zvaru. Lega teh vključkov je zelo ugodna za nastanek razpoke pri izmenični obremenitvi.

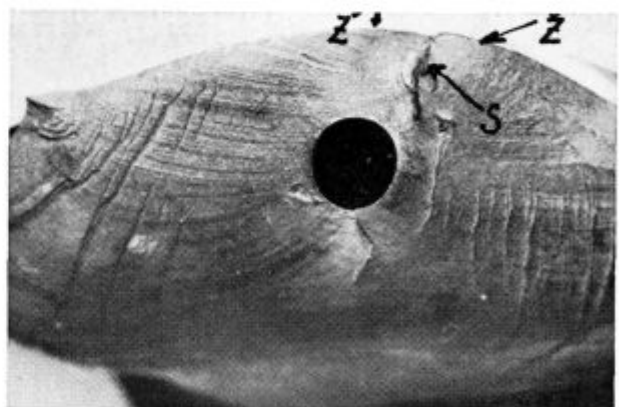
Odgovorili smo naročniku, da je bilo delo pri popraviljanju odveč, ker je v takem primeru najbolje zamenjati gred. Če pa so se lotili tega dela, bi ga morali opraviti strokovno mnogo bolj neoporečno.

3. Tretji je primer porušitve kolenčaste gredi pomožnega motorja neke naše večje motorne ladje. Slika 12. kaže prelomno površino, katere spodnji del je značilen za trenutni prelom, zgornji pa ima tipične znake utrujenostnega preloma. Delež prelomne površine, ki pripada trenutnemu prelomu ni večji od 20 % celotnega preloma. Na sliki 13 imamo videz prelomne površine z nasprotni strani. Na tej sliki še bolj pa na sliki 14 vidimo mesti, kjer se je neodvisno začel prelom. Razpokici sta se najprej neodvisno širili, nato pa združili na stopnici, ki je na sliki 14 označena s puščico. Slika 15 kaže stran-



Slika 13

Prelomna površina opazovana s strani preloma, ki je nastal s stopničastim širjenjem razpoke. Puščici označujeta mesti, na katerih je neodvisno začel prelom (Z). Vidi se tudi stopnica na kateri sta se začetni razpokici združili (S). Zmanjšano pribl. 1,8 $\times$



Slika 14

Detajl sl. 13 s stopnico (S) in žariščema v katerih je začel prelom (Z). Pomanjšano pribl. 1,2 $\times$

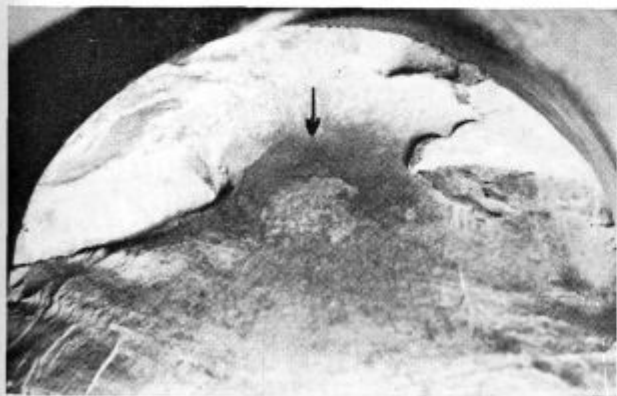


Slika 15

Razpoka v aksialni smeri gredi. Pomanjšano pribl. 1,8×

sko razpoko, ki poteka približno po osnem preseku gredi in katere nastanek in širjenje je verjetno neodvisno od glavne razpoke, ki je povzročila prelom. Na sliki 16 kaže puščica, kako se širi stranska razpoka v notranjosti gredi. Na posnetku vidimo, da je prehod iz ležajnega dela gredi v ročico gredi normalno izdelan in da na njem ni nobenih poškodb.

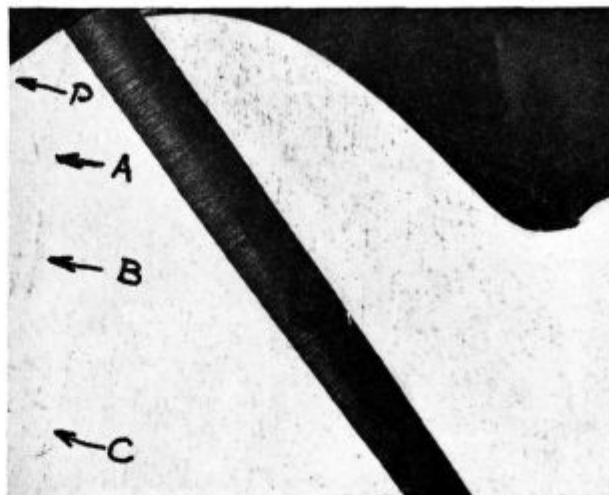
Tudi na površini ležajnega dela nismo opazili nobenih poškodb. Po teh zapažanjih in navzočnosti od glavne razpoke neodvisne bočne razpoke, smo



Slika 16

Prelomna površina s trenutno prelomljenim delom. S puščico je označena razpoka, ki poteka v aksialni smeri gredi

sklepali, da preloma ni povzročila površinska napaka. Zato smo poslani del kolenčaste gredi prežali po preseku AA, kot kaže slika 12. Ta osni presek smo zbrusili in makroskopsko jedkali v amonpersulfatu.



Slika 17

Makroskopski izgled osnega preseka gredi (A-A sl. 12) puščice kažejo mesto začetka preloma (P) in skupine drobnih razpok (A, B, C). Jedkano z vodno raztopino amonpersulfata. Pomanjšano pribl. 1,3×

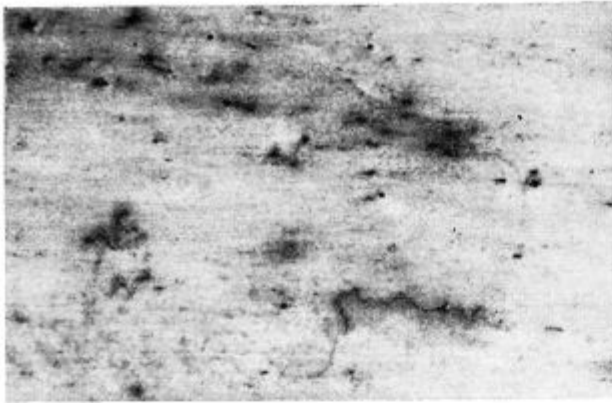
Slika 17 kaže jedkano površino osnega preseka, potek vlaken je normalen. Jedkanje pa je odkrilo številne nekovinske vključke in razpoke. Cele skupinice razpok na sliki 17 so označene z A, B, C, povečana detajla pa vidimo na slikah 18 in 19. Ta dva posnetka kažeta tudi večje nekovinske vključke.

Razpoke so usmerjene pretežno pod precej strmim kotom proti osi gredi, nekatere pa potekajo tudi v smeri osi. Vse opažene razpoke so bile na tisti strani, kjer je prelom začel. Potek razpok je značilen za stopničasto širjenje od začetne točke.

Jeklo, iz katerega je izdelana gred, je zelo nečisto. Ima polno nekovinskih vključkov različnih



Slika 18  
Detajl A s sl. 17



Slika 19  
Detajl B s sl. 17

oblik in razporedb. Primere vključkov kaže slika 20. Pri izdelavi obrusov je mnogo večjih vključkov izpadlo iz svojih mest. Iz oblike in sestave preostalih vključkov smo sklepali, da so sestavljeni večinoma iz žlindre, prav redko pa so vključki v ognju obstojnega materiala.



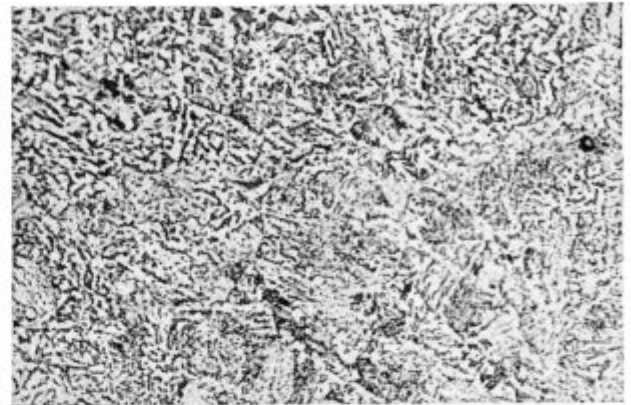
Slika 20  
Nekovinski vključki. Jedkano z nitalom (2%). Pov. 100×

Struktura jekla je sestajala iz popuščenega bainita (slika 21), mestoma smo opazili tudi segregacije ogljika. Mehanskih preiskav in kemične analize ni bilo potrebno izvršiti, zato smo izmerili le trdoto, ki je bila 24 do 25 HRC, kar ustreza trdnosti 85...90 kp/mm<sup>2</sup>. To pa je že trdnost legiranih in toplotno obdelanih jekel, ki rabijo za podobne namene. Po tem sklepamo, da je bila tudi toplotna obdelava pravilna.

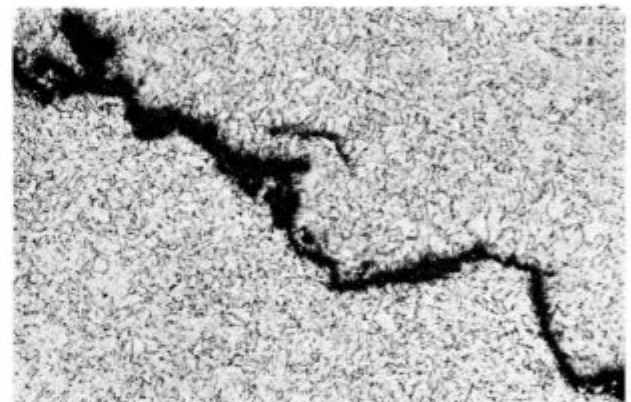
Potek posameznih razpok je v značilnem cik-caku (sl. 22, 23). Tak potek je značilen za razpoke, ki so se stopničasto širile zaradi obtežbe, ki je nihala v določenem intervalu. Stranska razpoka je bolj ravna (slika 24).

Pri preiskavi in pretresu vplivnih faktorjev smo v sklepu izrazili mnenje oziroma ugotovitve o neposrednih vzrokih porušitve gredi. Ovrgli smo možnost nastanka začetne razpoke zaradi površin-

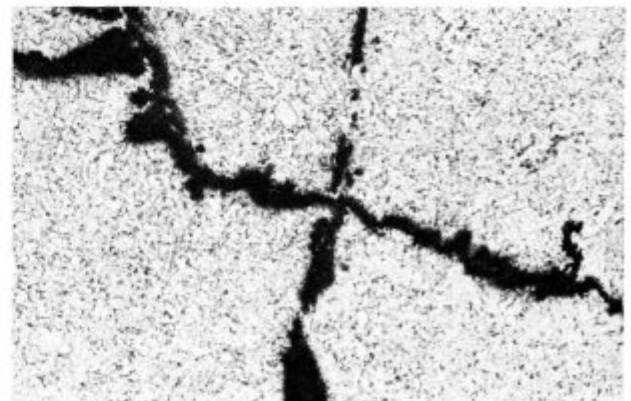
skih napak, saj je bila površina popolnoma v redu. Poglavitni krivec je bil nekvaliteten material z zelo velikimi vključki žlindre. Že pri normalnem delu so nastale v gredi razpoke, katerih začetki so bili prav ob vključkih. Najbolj neugodni pa so prav vključki ob površini, zato so se tudi razpoke s teh



Slika 21  
Mikrostruktura jekla gredi. Jedkano z nitalom (2%). Pov. 500×

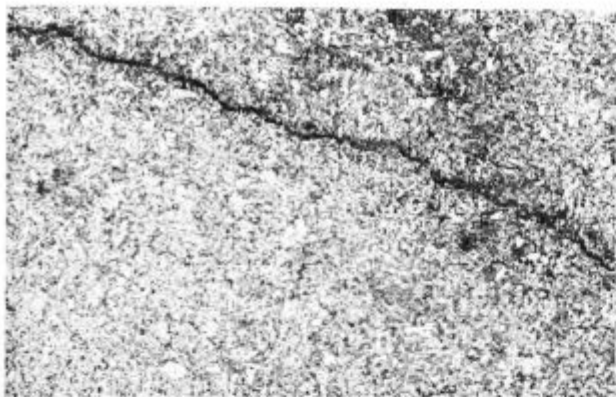


Slika 22  
Detajl razpoke na mestu (C). Jedkano z nitalom (2%), Pov. 100×



Slika 23  
Razpoka prečno na nekovinski vključek. Jedkano z nitalom (2%). Pov. 100×





Slika 24

Konec razpoke, ki poteka v aksialni smeri, v notranjosti gredi. Jedkano z nitalom (2%). Pov. 100×

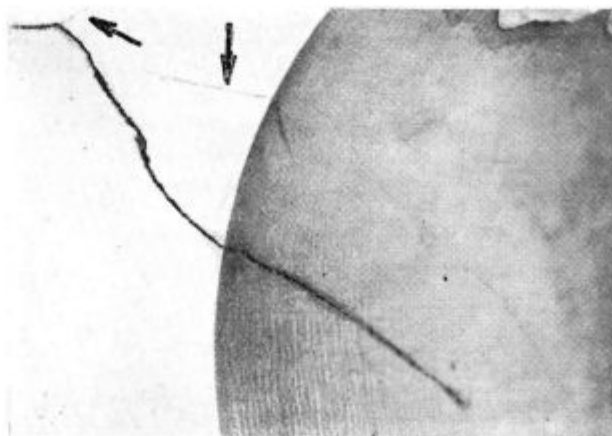
točk najhitreje širile pod vplivom dinamične obremenitve. Da je temu tako, nam potrjujejo tudi številne razpoke okoli vključkov v notranjosti gredi.

Zato vzroka za porušitev ne moremo iskati v normalnem utrujanju materiala, temveč v nečistosti, saj velikost in množina vključkov presegata vse tehnično dovoljene meje.

4. Povsem podoben primer je tudi naslednja preiskava kolenčaste gredi. Na prirobnici kolenčaste gredi je bila velika razpoka, katero kaže slika 25. Ko smo očistili prineseni del gredi, smo opazili še več manjših razpok, ki so na sliki 26 označene s puščicami. Poglavitna razpoka je šla skozi celo steno prirobnice, saj je ta razpadla, ko smo jo prežali, da bi dobili reprezentančno površino za preiskavo. Površine razpok, ki so se pri tem pokazale, so bile preveč korodirane in umazane, da bi nam pri preiskavi lahko koristile.

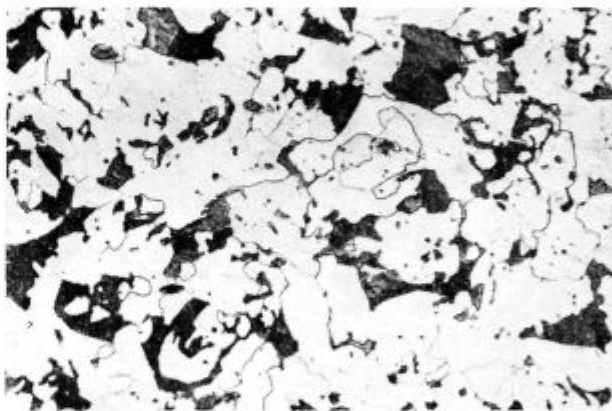
Iz kosa smo izrezali vzorce za metalografsko preiskavo na strani razpoke in na nasprotni, nepoškodovani strani. V delu prirobnice, kjer je bila razpoka, smo v jeklu opazili veliko množino ne-

kovinskih vključkov, na nasprotni strani pa jih je bilo znatno manj. Vključki so bili silikatnega in sulfidnega tipa. Struktura jekla je bila na vseh mestih identična. Sestavljala so jo dokaj neenakomerna zrna ferita in perlita (slika 27).



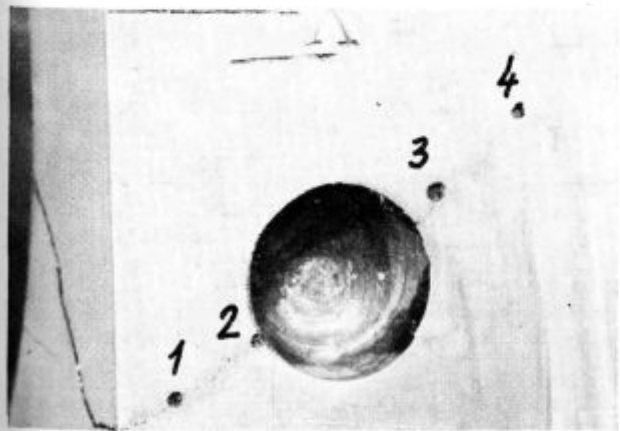
Slika 26

Glavna in več manjših razpok



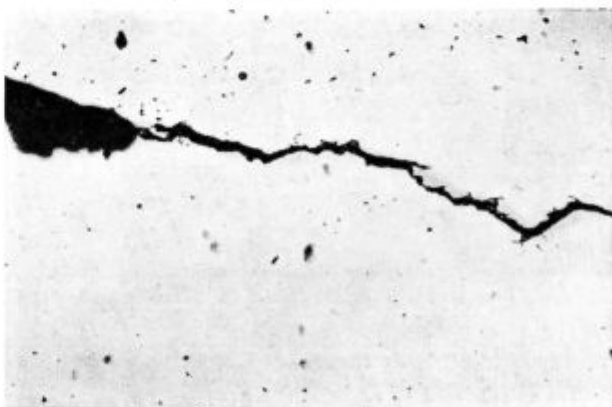
Slika 27

Mikrostruktura jekla v neposredni bližini razpoke, ferit, perlit. Jedkano z nitalom (2%). Pov. 100×



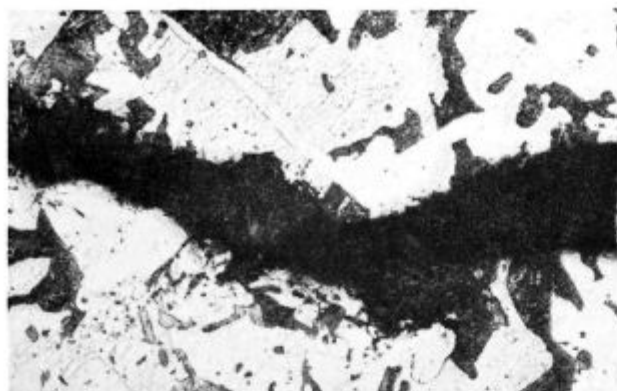
Slika 25

Razpoke v prirobnici kolenčaste gredi. Točke 1, 2, 3, 4 označujejo intervale napredovanja razpoke v določenih časih. Povečano pribl. 1,7×

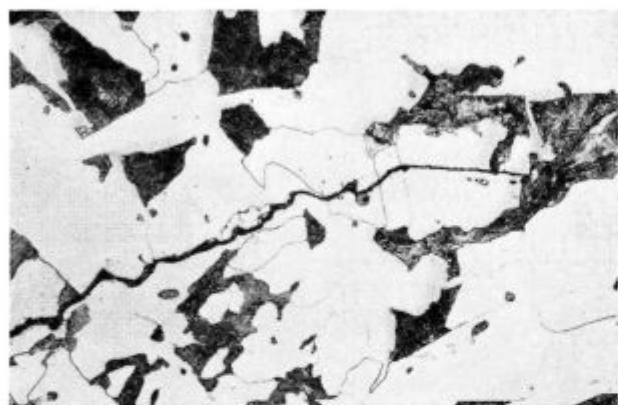


Slika 28

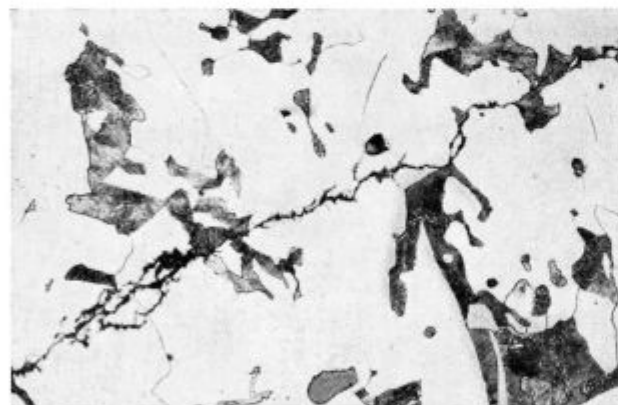
Razpoka, ki raste iz podolgovate votlinice. Polirano, pov. 100×



Slika 29  
Detajl s sl. 28. Jedkano z nitalom. Pov. 500×



Slika 30



Slika 31  
Čeli dveh razpok. Jedkano z nitalom (2%)

Po njihovi obliki je verjetno, da gred po izdelavi ni bila normalizirana. Po množini lamelarnega perlita smo lahko sklepali, da je imelo jeklo okoli 0,2 % C. V predelu, kjer so razpoke posebno goste, smo našli več podolgovatih votlin, ki so se podaljševale v razpoke (sl. 28, 29). V teh votlinah smo opazili mestoma zrna žindre, kovina ob njih pa ni bila razogljičena, kar kaže, da so votline posledek mikrolunkerjev. Na sliki 30 in 31 sta vidni čeli dveh razpok. Razvejano čelo je značilno za razpoke, ki se zaradi dinamične obtežbe postopno širijo.

V tem primeru je bila razpoka tako široka, da nismo mogli najti mesta, kjer naj bi se začela. Ker pa smo našli v jeklu številne napake, v katerih so se načenjale manjše razpoke, smo odgovorili, da je bila ena teh napak neposredni vzrok nastanka velike razpoke. Iz tega sledi, da ni bila vzrok okvare gredi utrujenost materiala kot posledica dinamične obremenitve, temveč nekvalitetno izdelan material z napakami, ki so sprožile začetek razpoke.

### SKLEP

Opisali smo štiri primere preiskave gredi, v katerih smo morali z neko največjo gotovostjo pokazati vzrok porušitve. V vseh primerih so nastale napake, ki so bistveno skrajšale življenjsko dobo elementov. Dvakrat je povzročila bistveno skrajšanje delovne dobe gredi slaba kvaliteta materiala z veliko množino nekovinskih vključkov (žindre, delno v ognjuobstojnega gradiva...). V drugih primerih pa smo našli napake na sami površini gredi in sicer enkrat zaradi slabe mehanske obdelave in korozijskega napada, drugič pa zaradi nestrokovnega popravila poškodovane gredi.

Po zgoraj povedanem in iz metalografske prakse bi lahko rekli, da se metalurški vzroki porušitve gredi skrajšajo na minimalno število. Vseeno pa je tudi iz njih težko izluščiti pravega. Na metalografu je potem, da pretehta vse vplivne faktorje in po presoji pove, kateri vzrok je najbolj verjeten.

*Zahvaljujeva se članu laboratorija P. Letnarju za skrb, ki jo je imel s pripravo vzorcev in dokumentacije.*

### ZUSAMMENFASSUNG

Es sind vier praktische Beispiele der metallographischen Untersuchung einer Welle beschrieben für welche wir mit einer grösst möglichen Sicherheit die Ursache der Zerstörung finden und deuten müssten. In allen vier Fällen wurden grobe Fehler entdeckt, welche wesentlich die Arbeitszeit dieser Maschinenteile verkürzten.

In zwei Fällen war die Ursache eine schlechte Qualität des Materials mit einer grossen Menge der nichtmetallischen Einschlüsse. (Schlacke und feuerfestes Material.)

In anderen zwei Fällen wurden Fehler an der Oberfläche der Welle gefunden und zwar einmal wegen der

schlechten mechanischen Bearbeitung und eines Korrosionsangriffes, und zweitens wegen der unfachgemässen Reparatur der Welle.

Bei diesen Konstruktionsteilen wird die Zahl der Ursachen auf welche wir mit den Verfahren der Metallurgischen Technologie einwirken können auf eine eng begrenzte Grösse reduziert. Trotzdem ist es manchmal schwer aus diesem engen Kreis die richtige Ursache zu finden. An dem Metallographen liegt es, die allen einflussreichen Faktoren zu erwägen und auf den höchstwahrscheinlichen zu zeigen.



## SUMMARY

Four examples of metallographic examination of a shaft are described, where cause of failure had to be found and shown with the greatest certainty. In all four cases coarse defect appeared which essentially shortened the life of these machine parts.

Twice bad quality of material was the main defect due to great number of non-metallic inclusions (slag, refractory, etc.). In two cases defects were found on the surface of the shaft, once due to bad machining and attack of corro-

sion, in the second case because of unprofessional repair of the shaft.

At these machine parts the number of causes of defects which can be influenced by metallurgical processing is diminished to a very limited number. None the less, many times the true reason is not easy to be found. Metallographic researcher had to consider all the influential factors, and by his own consideration he can show the most probable reason.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описаны четыре случая испытания валов при которых нужно было с достаточной точностью определить и указать причины излома. При всех описанных случаях оказались грубые ошибки которые существенно сократили рабочее время этих машинных частей.

В двух примерах причина излома было плохое качество материала ради присутствия большого количества неметаллических включений (шлак, жаростойкий материал итд.). При следующих двух примерах обнаружены ошибки на поверхности вала вслед-

ствии плохой обработки и нападения коррозии а во втором случае вследствие неправильной починки вала.

При этих конструктивных частях число причин на которые можно повлиять способом металлургической технологии ограничиться на весьма узкий предел, но несмотря на это также и из этого числа не легко выбрать главную причину. Предоставлено матааллографу рассмотреть и оценить все существенные данные и по собственному выбору определить наиболее вероятную причину излома.