

UDK 620.171.2:621.833

## Preiskave poškodovanih zobnikov

LADISLAV KOSEC

Raziskave poškodovanih strojnih delov imajo praktičen pomen. Tudi raziskave poškodovanih zobnikov prispevajo k boljši kakovosti in zanesljivosti tega tako pogostega in pomembnega strojnega dela. Ugotovitve in analize raziskav poškodb se s pridom uporabljajo pri načrtovanju in izdelavi enakih ali podobnih zobnikov in pri zagotavljanju ustreznih delovnih razmer.

Pristopov k raziskavam in analizi vzrokov za poškodbe je več. V mnogih naših institucijah in delovnih organizacijah je preizkušena in uspešna raziskovalna metodika, ki sloni pretežno na znanju in laboratorijski tehniki; to so preiskave gradiv v njenem širokem pomenu, pri katerih se uporabljajo metode metalografskih, kemičnih, mehanskih in tehnoloških preiskav gradiva. Čeprav ta metodika iz subjektivnih razlogov praviloma le v omejenem obsegu vključuje znanje konstruiranja, strojniške tehnologije ipd., lahko v mnogih primerih daje popoln ali zadosten odgovor o načinu in vzrokih za poškodbe. Kadar tega ne zmore, pa z izključevanjem določenih možnih vzrokov tudi mnogo prispeva k razjasnitvi problema.

Poškodbe zobnikov nastajajo na več različnih načinov. Pogosto začetka in razvoja poškodb sploh ni mogoče opaziti, niti ju dalje opazovati. V nekaterih primerih jih napovedujejo zvok in vibriranje. Večinoma pa se odkrijejo šele tedaj, ko dosežejo velikost in obseg, ko zobnik ne more več opravljati normalne funkcije.

Zobniki se lahko poškodujejo zaradi obrabe, utrujenosti površine in plastične deformacije na zobnih bokih ter zlomov. To je razmeroma široka in ohlapna klasifikacija poškodb, saj se vsaka od teh štirih vrst izraža tudi na več načinov in tudi vzroki zanje so različni.

Po skoraj deset let stari statistični analizi [1] je največ poškodb zaradi zlomov (61,2 %), zaradi površinske utrujenosti (20,3 %), potem zaradi obrabe (13,2 %) in plastične deformacije (5,3 %). Od vseh poškodb je po tej statistiki največ, kar 32,8 % zlomov zaradi utrujenosti, 19,5 % jih je zaradi preobremenitve zob, zaradi abrazivne obrabe 10,3 %, zaradi jamičenja pa 7,2 %.

Med vzroki za poškodbe jih je po tej statistiki praktično tri četrtine (74,7 %) zaradi razmer pri delu, med temi največ (25 %) zaradi trajnih preobremenitev in neustrezne montaže (21,2 %) zobnikov. Napake pri toplotni obdelavi v najširšem pomenu besede so vzroki za 16,2 % poškodb, napake v izhodnem materialu pa le za 0,8 %. Po tej statistiki gre 6,9 % poškodb na račun napak pri načrtovanju zobnikov, 1,4 % pa na rovaš izdelave.

V mnogih primerih se poškodbe pojavljajo v več oblikah, npr. obraba in zlom, površinska

utrujenost ali plastična deformacija in zlom ipd., pa tudi vzrokov za poškodbe je lahko več hkrati, npr. neprimerne toplotne obdelave, napake v montaži in preobremenitve ipd.

Dandanes se zobniki izdelujejo iz najraznovrstnejših gradiv: iz neželeznih kovin, iz kovinskih prahov po postopkih prašne metalurgije, iz nekovinskih materialov, iz sive in jeklene litine. Daleč pred vsemi temi gradivi pa po količini uporabljenega materiala za zobnike prednjačijo jekla. Zato so prav problemi v zvezi s toplotnimi obdelavami, predvsem pa s toplotnim utrjevanjem pri zobnikih tako pomembni kakor pri malokaterem drugem strojnem delu.

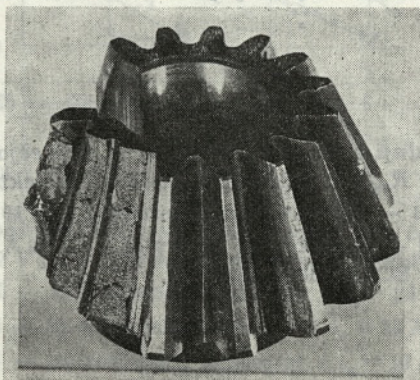
V prispevku je prikazana metodika raziskave in analize poškodb zobnikov v nekaterih značilnih primerih, ki smo jih preiskali za različne delovne organizacije.

Količina in kakovost informacij o poškodovanih zobnikih je bila dokaj raznovrstna. Dostikrat si je o delovnih pogojih moč ustvariti sliko šele na osnovi poškodb. Mnogokrat so zobniki poškodovani pozneje, korodirani ipd., kar vse zmanjšuje kakovost vzorcev in lahko otežuje raziskavo. Zato so tudi prikazani primeri večkrat osiromašeni za nekatere osnovne podatke, ki npr. strojnike posebej zanimajo.

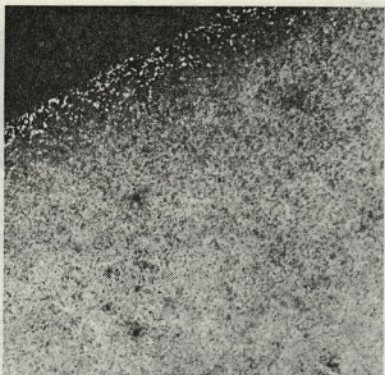
1. Stožčasti zobnik s slike 1 je sestavni del pogonskega mehanizma kmetijskega stroja.

Poškodbe so nastale trenutno, zaradi zlomov zob. Odlomljeno je bilo večje število zob, na nekaterih zobnikih skoraj vsi. Nekateri zobje so bili odlomljeni po vsej dolžini, drugi le na delu. Na ohranjenih zobeh ni bilo opaziti poškodb zaradi obrabe ali površinske utrujenosti. Po makroskopskem izgledu prelomnih površin so zlomi nastali v trenutku. Bolj ali manj ostre zareze v korenih zob so bile zareze zaradi mehanske obdelave.

Zobniki so izdelani iz jekla Č.4321, bili so cementirani in ustrezno toplotno obdelani. Preiskani



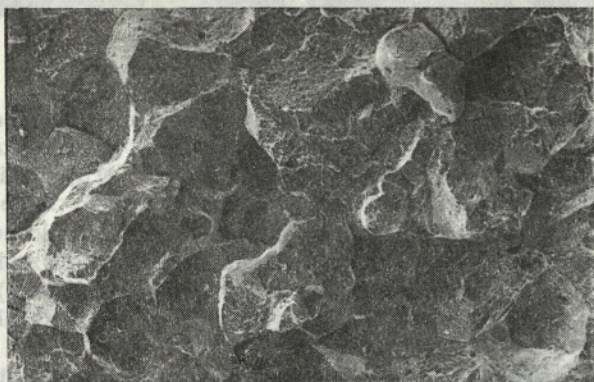
Sl. 1. Stožčasti zobnik z odlomljenimi zobmi  
Levo je izrezan eden od zob za preiskavo (pribl. 1 : 1,4)



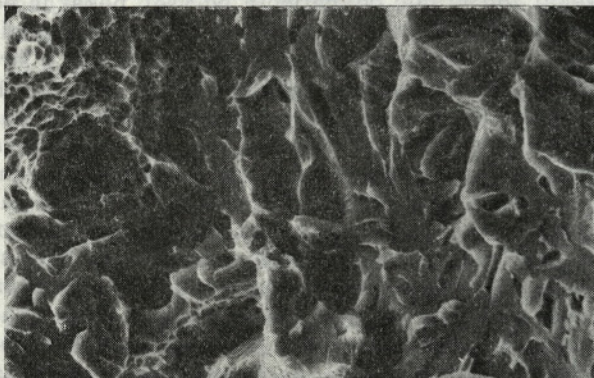
Sl. 2. Cementit na površini zobnega boka (100 : 1)

zobniki so bili naogljčeni do take mere, da je na površini nastal prosti (sekundarni) cementit. Le-ta je bil večinoma razdeljen v obliki mreže po mejah kristalnih zrn ali v obliki samostojnih ovalnih zrn (sl. 2).

Mikrostruktura v jedru zob je različna. V nekaterih je sestavljena iz martenzita in bainita, v drugih pa je še prosti, netransformirani ferit. To potrjujejo tudi razlike v mikrotvrdoti jeder zob na posameznih zobnikih, ki so skoraj 100 HV. Podobno velike razlike so bile tudi v trdoti površine zob na različnih zobnikih (npr. 550 HV nasproti 640 HV).



Sl. 3. Morfologija prelomne površine ob površini zoba; interkristalen krhek prelom (1000 : 1)



Sl. 4. Morfologija prelomne površine v jedru zoba; žilav in krhek transkristalen prelom (2000 : 1)

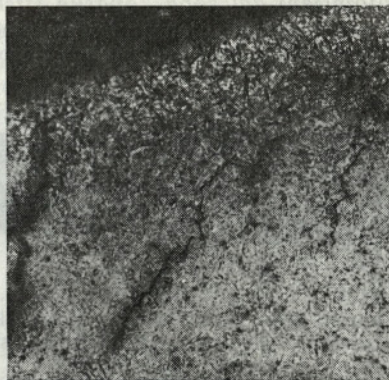
Na prelomih zob sta dve značilni področji. V delu cementirane površine je značilen interkristalen krhek prelom, prelom skozi jedro pa je mešanica žilavega in krhkega transkristalnega (sl. 3, 4). Interkristalni krhki prelom izhaja iz sekundarnega cementita, prisotnega na mejah.

1.1. Zobniki imajo dve značilni napaki: premočno naogljčeno površino in zareze zaradi mehanske obdelave v korenih zob.

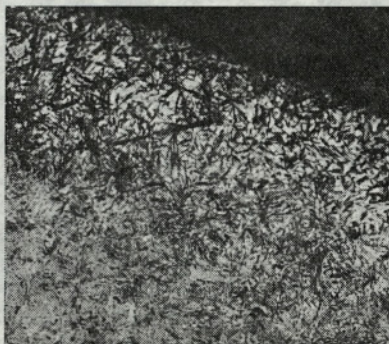
Po mikrotvrdoti in različni mikrostrukturi sodeč pa se razlikujejo posamezni zobniki tudi po trdnosti jedra. Zareze in neugodna mikrostruktura jekla (cementit) povečujeta občutljivost zobnikov nasproti preobremenitvam in zelo verjetno je, da je ena takih preobremenitev že na začetku dela povzročila zlom enega ali več zob.

2. Serija enakih zobnikov je bila kemotermično obdelana v drugačnih razmerah. Ti zobniki so sicer vzdržali kratkotrajni preizkus v stroju, imeli pa so prav tako pomanjkljivosti, zaradi katerih bi slej ko prej prišlo do poškodb.

Na prerezu posameznih zob so bile kalilne razpoke (sl. 5). Mikrostruktura na površini zob je iz martenzita in zaostalega avstenita (sl. 6), v jedru pa sta bila martenzit in bainit. Preostalega avstenita je na površini toliko, da povzroča opazno zmanjšanje trdote (za več ko 120 HV v primerjavi z največjo trdoto cementirane plasti). Čeprav so znana mnenja o koristnosti zaostalega avstenita pri vtekavanju zobnikov, pa je v danem primeru njegova količina odločno prevelika.



Sl. 5. Mikrostruktura na površini zobnega boka; martenzit in zaostali avstenit (100 : 1)



Sl. 6. Kalilne razpoke ob zobnem boku (100 : 1)

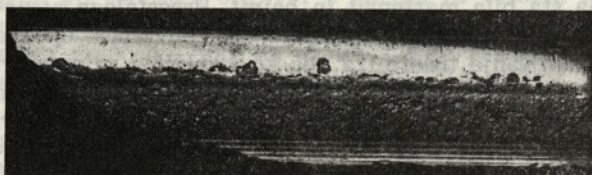
3. Odlomljeni zob na sliki 7 je s kovaške stiskalnice. Zobni bok je poškodovan zaradi površinske utrujenosti (jamičenja).

Prelom, ki se je začel v korenu zoba, je značilen za utrujenostni zlom. Jamičenje in utrujenostni prelom nimajo med sabo nobene neposredne oz. vzročne zveze.

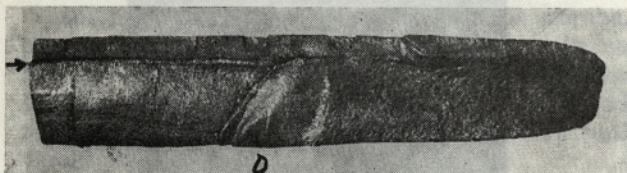
V korenu zoba, kjer se je začela utrujenostna razpoka, so zareze nastale pri mehanski obdelavi zobnika. Utrujenostna prelomna površina je iz dveh ploskev. Širša se začne v korenu na delovni strani zoba, kjer je bok poškodovan zaradi jamičenja, ožja pa z nasprotni strani zoba. Površina, nastala pri trenutnem zlomu, je zelo majhna (sl. 8).

Zobnik je izdelan iz jekla Č.1430. To povesta kemična analiza in tudi metalografska slika strukture (sl. 9).

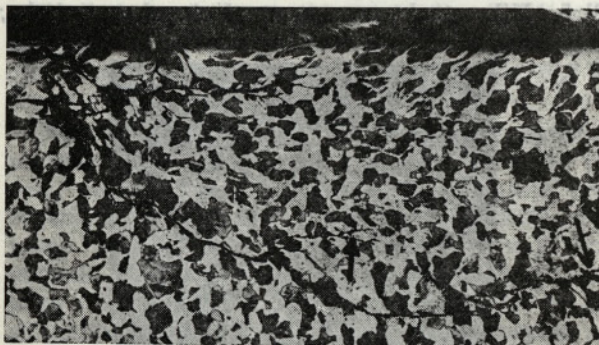
Mikrostruktura jekla je enaka na površini in v jedru zoba (sl. 9). Sestoji iz drobnih kristalnih zrn ferita in finolamelarnega perlita. Zobnik ni bil površinsko utrjen, temveč le normaliziran. Trdote na površini in v jedru so enake (200 ... 215 HV). Na sliki 9 je skupina utrujenostnih razpok na prerezu



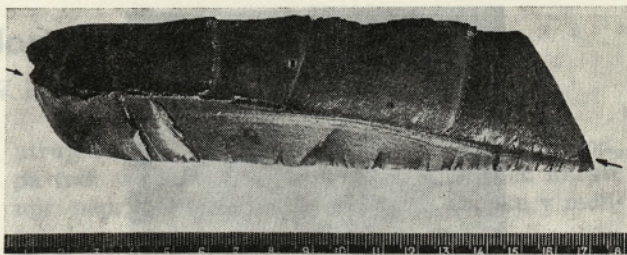
Sl. 7. Odlomljeni del zoba kovaške stiskalnice  
Velik obseg površinske utrujenosti (jamičenja) in zareze zaradi mehanske obdelave v zobnem korenu (pribl. 1 : 1)



Sl. 8. Prelomna površina zoba  
Puščica prikazuje greben trenutnega zloma, kjer sta se srečali utrujenostni razpoki; (D) delovna stran zoba (pribl. 1 : 1)

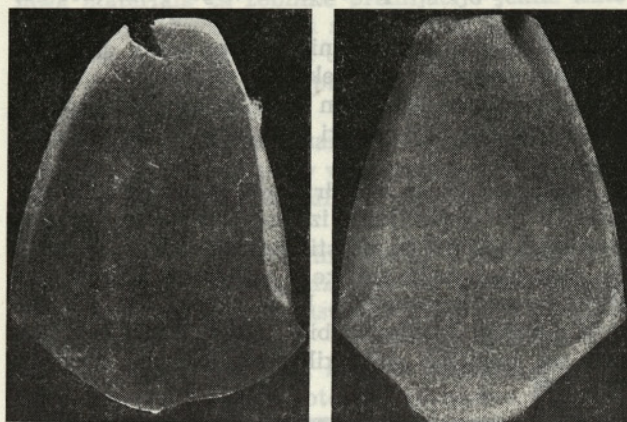


Sl. 9. Površinska utrujenost na zobnem boku  
Puščici prikazujeta dve od utrujenostnih razpok; mikrostruktura jekla: ferit in perlit (pov. 100 : 1)



Sl. 10. Prelomna površina enega od zob pastorka kovaške stiskalnice

Puščici prikazujeta greben trenutnega preloma, kjer sta se srečali utrujenostni razpoki z nasprotnih zobnih korenov (pribl. 1 : 2,65)

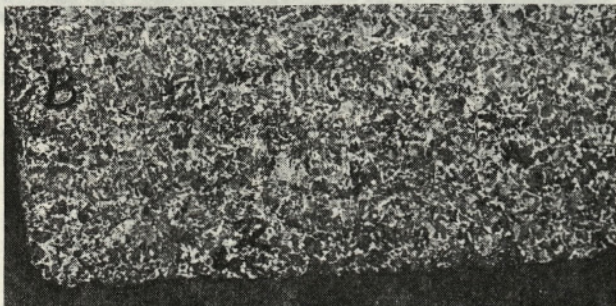


Sl. 11. Prerez čez odlomljena zoba  
Konture kaljene površine (pov. pribl. 1 : 1)

zoba v področju jamičenja. Te razpoke privedejo do luščenja kovine. Narava poškodb (površinska utrujenost — jamičenje in zlom zaradi utrujenosti) kaže, da bi moral biti zobnik izdelan iz kakovostnejšega jekla in biti predvsem bolje toplotno obdelan. Premajhna trdnost na zobnikih je vzrok za površinsko utrujenost (progresivno jamičenje), zareze zaradi mehanske obdelave pa so začetek utrujenostne razpoke v korenu zoba.

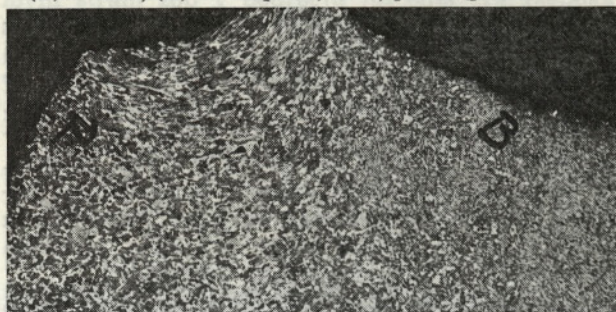
4. Na podobnem stroju se je zaradi utrujenosti zlomilo več zob pastorka s poševnimi zobmi, nekateri neodlomljeni zobje pa so imeli velike razpoke. Nekaj zob je bilo odlomljenih po vsej, nekaj le po delu dolžine bokov. Na zobnih bokih ni bilo jamičenja ali drugih poškodb. Zlom zob je nastal s širjenjem dveh utrujenostnih razpok z nasprotnih korenov. Utrujenostni razpoki sta se širili v notranjost venca in končali v ozkem področju trenutnega zloma. Razpoke, ki se začneta na delovni strani zoba, so približno 1,5 do 2,5-krat širše od onih z nasprotni strani (sl. 10). Iz načrta zobnika je razvidno, da je izdelan iz jekla Č 5432, poboljšana na trdnost 850 ... 950 N/mm<sup>2</sup> in površinsko kaljen. Kemična sestava, ki smo jo približno ugotovili z mikroanalizatorjem, ustreza načrtu. Zobje so na bokih površinsko kaljeni (sl. 11), na temenih in korenih pa ne. Širina površinsko kaljene cone ni enakomerna. Na najširših mestih je debela 4 ... 5 mm, na naj-

ožjih pa pod 1 mm. Na delovni strani je površinsko kaljena plast nekaj mm krajša kakor na nasprotnem boku. Na delovni strani zob se začne utrujenostna razpoka v korenu približno 2 ... 3 mm pod koncem površinsko kaljene plasti, na nasprotni strani pa v prehodu med površinsko kaljeno plastjo in jedrom. Tu je poleg glavne še več krajših razpok (sl. 12, 13).



Sl. 12. Potek utrujenostne razpoke z delovne strani zoba

(B) — bok, (R) — razpoka; ferit, perlit (pribl. 30 : 1)



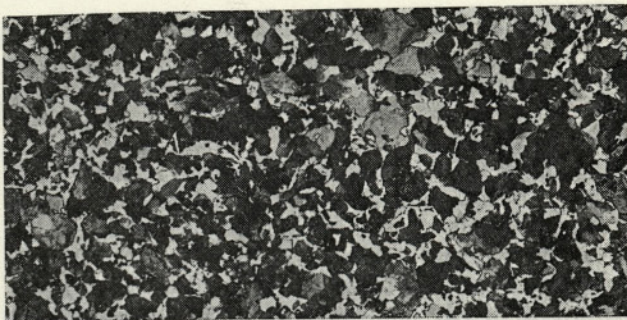
Sl. 13. Potek utrujenostne razpoke z nasprotne strani zoba

(B) — bok zoba, (R) — razpoke; prehodna cona (pov. 30 : 1)

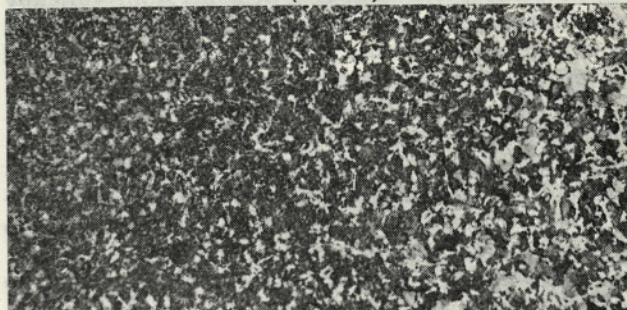
Mikrostruktura v površinsko kaljeni plasti je iz drobnogličastega martenzita s trdoto okoli 550 HV. Jedra zob so iz drobnozrnate mešanice ferita in drobnolamelarnega perlita (sl. 14, 15). Prehodi med jedrom in površino so iz zmesi zrn martenzita in ferita. Trdota v jedru je 210 do 230 HV, kar ustreza trdnosti 700 ... 780 N/mm<sup>2</sup> in je znatno manjša od načrtovane vrednosti. Zahtevano trdnost bi jeklo doseglo, če bi bil zobnik poprej poboľššan.

4.1. Geometrija površinsko kaljene cone ni ugodna in je v nasprotju s priporočilom, naj bodo kaljene tudi površine v korenih zob. Mehanske lastnosti jedra so prav tako manjše od predpisanih.

Površinsko kaljenje je vzrok za značilen pojav notranjih napetosti. V kaljeni coni so tlačne napetosti, v jedru in nekaljeni površini pa so te kompenzirane z ustreznimi nateznimi napetostmi. Zaradi opazovane geometrije površinsko kaljene cone je zob v korenu zelo neugodno obremenjen, saj se notranjim nateznim napetostim na delovni strani prištejejo še menjajoče se natezne napetosti zaradi obremenitve zoba. Trajna trdnost jekla pa je na tem kritičnem mestu razmeroma majhna. Zato se



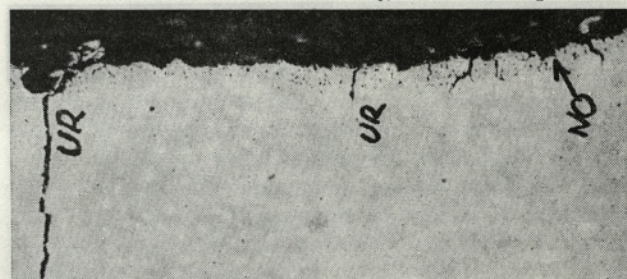
Sl. 14. Mikrostruktura v zobnem jedru; ferit in perlit (100 : 1)



Sl. 15. Mikrostruktura na prehodu jedra v kaljeno površino; martenzit in ferit (60 : 1)

tu sproži rast utrujenostne razpoke, ki jo seveda pospeši morebitni koncentrador napetosti (npr. zareza ipd.). Za dani primer je mogoče skoraj popolnoma zanesljivo trditi, da do zloma ne bi prišlo, če bi bil zobnik kaljen tudi v korenu zob in če bi imelo jeklo v jedru zob res predpisano trdnost, ki pa bi jo dosegli le s poboľšanjem.

5. Zobniki v gradbenih strojih so se prehitro poškodovali zaradi zlomov, pa tudi zaradi obrabe, površinske utrujenosti in celo plastične deformacije na zobnih bokih. Omenimo naj, da smo za preiska-



Sl. 16. Notranje oksidirana površina (NO) in utrujenostni razpoki (UR) v zobnem korenu (200 : 1)



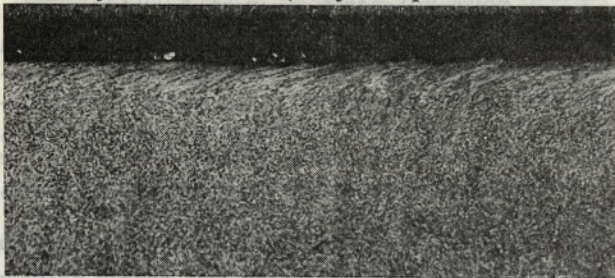
Sl. 17. Razogljčena in notranje oksidirana površina na kontrolnem vzorcu jekla (pov. 200 : 1)

vo dobili le nekaj porušenih ali izrezanih zob in smo si sliko o poškodovanih zobnikih ustvarili le po teh vzorcih in bolj skopih informacijah. Poleg vzorcev zob smo imeli tudi kontrolne valjčke iz peči za ogljičenje.

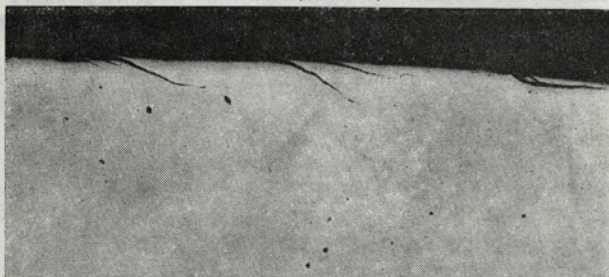
Zobniki so bili izdelani iz jekla za cementiranje Č. 5421. Naogljicheni so bili v plinu, pripravljenem iz propana, po ogljičenju ohlajeni v zaščiti dušika in nato ustrezno toplotno obdelani. Poškodbe na zobeh različnih zobnikov so se razlikovale (npr. na nekaterih ni bilo jamičenja, na drugih je bila manjša obraba ali deformacija zob).

Površine preiskanih zob in kontrolnih valjčkov so bile razogljichenene in notranje oksidirane. Globina popolnega razogljichenja je 20 ... 30  $\mu\text{m}$ . V tem delu površine so razpršena drobna zrnca silicijevega in kromovega oksida, nekaj oksida pa je tudi v obliki lamel ali igel, akumuliranega na mejah kristalnih zrn (sl. 16, 17). Na zobnih bokih je razogljichenena in notranje oksidirana plast popolnoma ali delno obrabljena, na bokih nekaterih zob pa je jeklo močno plastično deformirano (sl. 18, 19, 20).

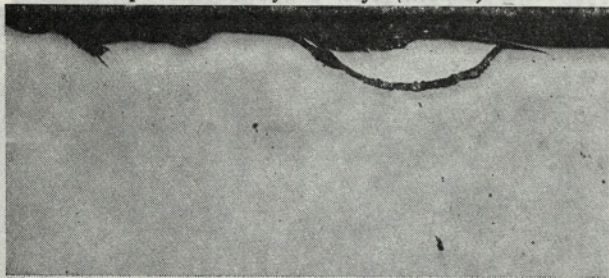
Jeklo na različnih zobeh se razlikuje tudi po mikrostrukturi in trdoti. Primer: na površini enega od zob je bil martenzit, v jedru pa še bainit. Na



Sl. 18. Plastično deformirana površina na zobnem boku (200 : 1)



Sl. 19. Porušitev jekla na bokih zaradi pretirane plastične deformacije (100 : 1)



Sl. 20. Površinska utrujenost in nastajanje jamičenja na zobnem boku (100 : 1)



Sl. 21. Heterogena struktura v jedru enega od zob: martenzit in bainit (100 : 1)

boku, kjer je bil zob plastično deformiran, je bila trdota približno 530 HV, malo pod površino pa 580 ... 610 HV. V jedru je bila trdota 440 ... 460 HV. Na drugem zobu je bila v deformirani površini trdota okrog 550 HV, pod njim 650 ... 670 HV, v jedru mestoma 410 ... 420 HV, drugje pa 350 ... 370 HV. Jedro sestavljajo večji vložki martenzita in bainita, zato so tudi te razlike v trdoti (sl. 21).

Na več mestih v korenu zob so oksidne lamele na kristalnih mejah vzročnik za začetek utrujenostnih razpok (sl. 16). Nekateri teh razpok so precej napredovale, druge pa praktično nič. Praviloma le ena od teh razpok preraste v utrujenostni prelom.

Glavna krivca za opazovane poškodbe sta razogljichenje in notranje oksidirana površina zobnika.

Akumulacije oksidov delujejo kot zareze, iz katerih zrastejo utrujenostne razpoke. Razogljichena površina pa je osnovni vzrok za obrabo, plastično deformacijo in tudi površinsko utrujenost.

To pomeni, da bi se omenjenim napakam lahko skoro zanesljivo izognili, če bi preprečili razogljichenje in notranjo oksidacijo jekla. Do tega pojava lahko pride v vsaki od faz kemotermske obdelave. Globina razogljichenja in notranja oksidacija sta značilni za atmosfere z majhnim parcialnim tlakom kisika. Ker so bili kontrolni vzorci po naogljichenju enako močno razogljicheni in notranje oksidirani kakor že kaljeni zobniki, sklepamo, da kaljenje (toplotna obdelava po naogljichenju) ni krivo za ta pojav. Najverjetneje je do razogljichenja prišlo takrat, ko se je vložek po naogljichenju hladil v atmosferi dušika, za katerega je znano, da večinoma vsebuje določeno količino kisika, lahko pa tudi vodne pare.

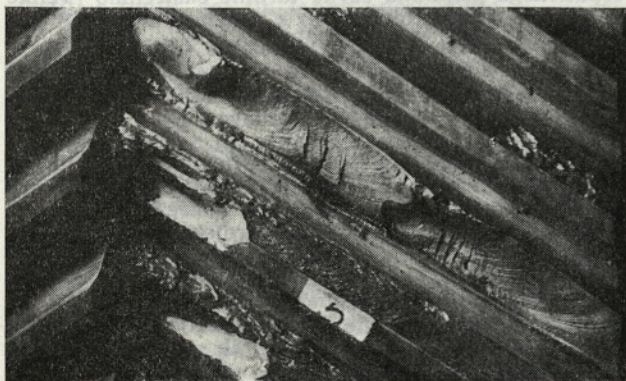
Ko smo se zanimali za aktivno atmosfero v peči, je tovarna posredovala sestavo (v %): 1 CO<sub>2</sub>, 0 O<sub>2</sub>, 23 CO, 0,5 CH<sub>4</sub>, 8,8 H<sub>2</sub> in 66,7 N<sub>2</sub>. Plin te sestave ni v logični zvezi s sestavo propana, iz katerega je bil izdelan. To se kaže v neustreznem razmerju glavnih treh sestavin: CO, H<sub>2</sub> in N<sub>2</sub>. Delež CO je pravšen (teoretično 23,6 %), delež vodika pa mnogo premajhen (31,5 %), zato pa je dušika preveč (44,9 %). Tudi deleža CO<sub>2</sub> in CH<sub>4</sub> sta malo nad običajno mero. Če je aktivna atmosfera v peči res taka, o čemer pa upravičeno dvomimo, potem razogljichenje ni posledica te atmosfere. Ker pa je dušik zamenjal aktivno atmosfero že pri temperaturi

naogljichenja (približno 920 °C), hlajenje pa traja nekaj ur, je najbolj verjetna domneva, da so nečistoče v dušiku (kisik in morebitna vlaga) krive za razogljichenje in notranjo oksidacijo. Žal pa sestava uporabljenega tehničnega dušika iz tistega časa ni bila znana. Čistili ga pa tudi niso.

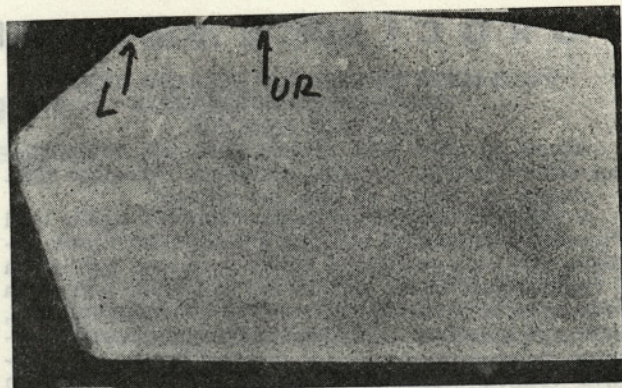
Po metodi, ki jo je priredil za računalniški program B. Koroušić, bi morala biti aktivna atmosfera za jeklo Č. 5421, če bi ga pri tej temperaturi hoteli naogljčiti na površini do 0,8 % ogljika, naslednje sestave (v %): 22,8 CO, 0,23 CO<sub>2</sub>, 0,5 CH<sub>4</sub>, 32 H<sub>2</sub> in 44,5 N<sub>2</sub> s točko rosišča — 4,8 °C, kar je zelo blizu »idealni« sestavi iz propana izdelanega plina.

6. Zobnik na sliki 22 je iz velikega reduktorja industrijskega mlina. Na zobniku se je zlomilo 17 zob, eden po vsej dolžini, drugi le na delu dolžine boka zob. Na delovni strani zob je bilo na bokih precej površine poškodovane zaradi površinske utrujenosti, progresivnega jamičenja, ki je prešel ponekod že v pravo luščenje. Zlom je utrujenostne narave. Utrujenostne razpoke se začenjajo na delovni strani zob v področju luščenja. Ta razpoka obsega na popolnoma odlomljenem zobu približno 90 % celotne prelomne površine. Preostali del preloma pa pripada utrujenostni razpoki, ki se je širila z nasprotni strani, in pa trenutnemu zlomu.

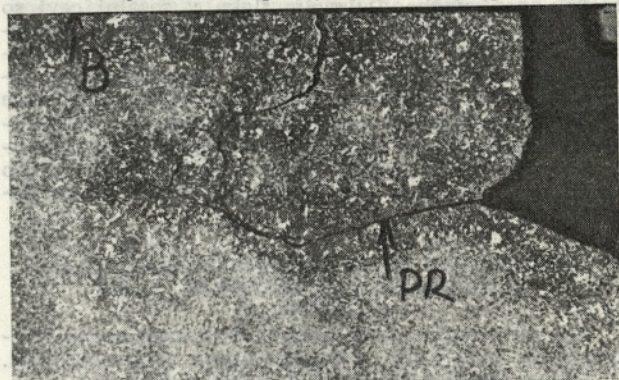
Zobnik je bil izdelan iz jekla Č 4732, poboljšan in površinsko utrjen z nitriranjem. Na površini je blizu 10 µm debela tako imenovana bela plast, nastala pri nitriranju. Difuzijska cona seže do globine približno 0,8 mm, jedro pa sestavlja popuščeni martenzit. Trdota na zobnih bokih je zaradi bele plasti 650 ... 750 HV, pod belo plastjo pa je jeklo v difuzijski coni utrjeno na približno 550 HV; trdota v jedru je 240 ... 260 HV, kar ustreza trdnosti 750 ... 850 N/mm<sup>2</sup>, ki je bila v načrtu tudi določena. Večina razpok zaradi površinske utrujenosti, ki se kaže v zelo poudarjeni obliki luščenja, je v globini 0,6 do 0,8 mm od površine, kar se dobro sklada z globino utrditve površine z nitriranjem (sl. 23, 24). Iz poškodb zaradi luščenja so nastale utrujenostne razpoke, ki so pripeljale do zlomov zob.



Sl. 22. Nekateri od poškodovanih zob zobnika v reduktorju industrijskega mlina (pribl. 1 : 2,5)



Sl. 23. Prečni prerez čez odlomljeni zob  
UR — utrujenostna razpoka, L — luščenje (pribl. 4,5 : 1)



Sl. 24. Površinska utrujenost (luščenje) na zobnem boku

B — zobni bok, PR — razpoke (30 : 1)

V danem primeru je bil zobnik izdelan iz jekla, kakor ga določa načrt, tudi mehanske lastnosti jekla zadovoljujejo zahteve konstrukterja. Površine zob so utrjene praktično do največje mogoče vrednosti, ki jo je pri tem jeklu mogoče doseči z nitriranjem. Te lastnosti je konstrukter pri načrtovanju tudi upošteval.

Videz poškodb kaže, da so bili zobje preobremenjeni. To je potrdila hkratna preiskava konstrukcije in vgradnje zobnika. Zobje so namreč oprijemali le po delu dolžine zobnih bokov, na kar pa je opozoril že delen zlom večine zob.

S primeri poškodovanih zobnikov smo hoteli opozoriti na nekatere napake pri izbiri jekla in toplotni oz. kemotermični obdelavi zobnikov, ki so vzrok za poškodbe zobnikov. Preiskava poškodb je po naravi interdisciplinarna in zahteva znanje več strok, ki pa ga je pri nas le malokrat uspelo združiti v taki meri, da bi dobili popolne in vzorne analize problemov.

#### LITERATURA

- [1] Metals Handbook, Vol. 10, Ohio, 1975, 507 ... 524.
- [2] Handbuch der Schadenverhütung, Allianz, 1976, 719 ... 744.
- [3] Why Metals Fail, Gordon and Breach, 1970.

Avtorjev naslov: prof. dr. ing. Ladislav Kosec  
Metalurški inštitut  
Ljubljana