

UTICAJ OTKAZA ZUBACA NA BEZBEDNOST MAŠINA – ISPITIVANJE I ANALIZA THE EFFECT OF TEETH FAILURES ON MACHINE SAFETY – TESTING AND ANALYSIS

Stručni članak / Professional paper
UDK / UDC: 621.833.01
Rad primljen / Paper received: 10.06.2007.

Adresa autora / Author's address
Institut za ispitivanje materijala, Beograd, Bulevar vojvode
Mišića 43, iviatanasov@yahoo.com

Ključne reči

- zupčanici
- mašinska direktiva 98/37/EC
- oštećenja
- bezbednost

Izvod

Odredbama Mašinske direktive 98/37/EC definisani su osnovni zahtevi koje moraju da ispune zupčasti prenosnici snage u pogledu zdravstvene i bezbednosne zaštite. U radu su opisani različiti oblici oštećenja i razaranja zubaca zupčanika i uslovi spoljnje okoline, rada i održavanja koji do njih dovode. Detaljnije su opisani oblici oštećenja površina bokova zubaca u uslovima velikih opterećenja i nedovoljnog podmazivanja, koji mogu dovesti do havarija velikih mašina i predstavljaju opasnost po ljude i okolinu. Prikazan je postupak ispitivanja i analize nekoliko vrsta i stepena oštećenja zubaca. Prikazano je izvedeno ispitivanje zubaca zupčanika pogona prednje strele bagera.

UVOD

Zupčasti prenosnici snage su vitalni deo mašina, pa se zahteva pouzdan rad zupčanika da ne bi došlo do oštećenja i loma mašina. I pored toga u toku rada dolazi do različitih oblika otkaza zubaca zupčanika i promene radnih karakteristika zupčastih prenosnika, što može da prouzrokuje otkaz celog mašinskog sklopa čiji je zupčanik deo. Velika pažnja se posvećuje izučavanju različitih oblika otkaza zubaca da bi se sprečili ili bar usporili procesi njihovog nastajanja i širenja.

Evropskom mašinskom direktivom 98/37/EC, /1/, uveden je novi pristup koji definiše zahteve osnovne zdravstvene i bezbednosne zaštite koje moraju da ispune mašine. U Direktivi 98/37/EC pod „mašinom“ se podrazumeva skup delova ili komponenti međusobno povezanih radi specifične primene, od kojih je najmanje jedna pokretna, sa pripadajućim priključcima, kontrolnim i električnim kolima.

U skladu sa ovom definicijom i zupčasti prenosnici snage moraju zadovoljavati odredbe Direktive 98/37/EC, pa su u Prilogu I definisani zahtevi koji se odnose na projektovanje i izradu mašina i u njih ugrađenih prenosnika.

Keywords

- gears
- Machinery Directive 98/37/EC
- damage
- safety

Abstract

According to clauses of Machinery Directive 98/37/EC the basic requirements are defined which have to be met by gear power transmissions in regard to health and safety. Different types of gear teeth damage, fracture and affecting conditions of environment, service and maintenance are analysed in the paper. A detailed description of damage forms of teeth flank surfaces under high loads and insufficient lubrication which can cause failure of heavy machinery and also imposes danger for people and environment. Testing and analysis procedures for some types and levels of teeth damage are shown. Tests of gear teeth of an excavator front arm are presented.

INTRODUCTION

Power gear transmissions are vital parts of machines, and their reliable operation is required in order to prevent machine damage and fracture. However, different kinds of failures of gear teeth occur in service, altering the operating characteristics of transmission, eventually leading to failure of whole mechanical assembly with built-in gear. Great care is paid to analysis of different tooth failure types in order to prevent or at least to prolong the process of their initiation and development.

The European Machinery Directive 98/37/EC, /1/, introduces a new approach, defining requirements for basic health and safety protection that machines must meet. The term “machine”, in Directive 98/37/EC, is understood as an aggregate of parts or components mutually linked for specified application, at least one of them movable with corresponding control and electrical circuits.

In accordance with this definition, gear transmissions also have to satisfy clauses of Directive 98/37/EC, and so in the Annex I the requirements for design and manufacture of machines and built-in transmissions in them are defined.

Prema odredbama ovog Priloga proizvođač ima obavezu da identifikuje i oceni opasnosti koje se odnose na njegovu mašinu, i da projektovanje i izradu uskladi sa tim. U tački 1.3.2. *Rizik od loma tokom rada*, navedeno je da:

- različiti delovi mašine i njihove veze moraju biti u mogućnosti da izdrže opterećenje za koje su projektovane ako se koriste na način predviđen od strane proizvođača,
- trajnost materijala koji su ugrađeni mora biti usaglašena sa prirodom radnog prostora koji je predvideo proizvođač, posebno u pogledu pojave zamora, starenja, korozije i abrazije,
- proizvođač mora u uputstvu da navede tip i učestalost kontrole i održavanje koje je potrebno iz bezbednosnih razloga. On mora, kada je to prikladno, da navede delove koji su izloženi habanju kao i kriterijume za zamenu,
- kada uprkos preduzetim merama postoji i dalje rizik od loma ili razaranja (npr. kao sa brusnim točkom), pokretni delovi moraju biti montirani i pozicionirani tako da u slučaju loma njihovi delovi ostanu povezani.

Nepravilnosti u toku eksploatacije zupčastog prenosnika, koje mogu dovesti do oštećenja zupčanika, pa i do njegovog loma, brojne su i obično deluju istovremeno i udruženo. Od najvećeg uticaja za oštećenje zubaca zupčanika su: neadekvatno podmazivanje, odstupanja geometrije spreznja zubaca zupčastog para (usled neprecizne montaže zupčastog para ili kao posledica pohabanosti zubaca i ostalih delova zupčastog prenosnika), nehomogenosti u materijalu zupčanika nastale u toku izrade, neadekvatna termička obrada, udarna opterećenja koja prelaze nominalne vrednosti za koje je zupčasti par proračunat.

VRSTA OŠTEĆENJA ZUBACA

Ovde će biti opisani različiti oblici oštećenja i razaranja zubaca zupčanika i definisani osnovni pojmovi prema literaturi, /2–5/. Detaljno su opisani oblici oštećenja zubaca visokopterećenih zupčastih parova koji rade u nezaštićenoj okolini i izloženi su uticaju atmosferskih uslova, kakvi su u ovom radu posebno ispitani.

U zavisnosti od vrste opterećenja i radnih uslova na zupcima spregnutih zupčanika se javlja više od 20 različitih tipova oštećenja. Prema analizama različitih autora, /2,5/, definicijama oštećenja zubaca prema standardu ISO 10825, /6/, kao i na osnovu iskustva iz ispitivanja zupčastih parova izvedenih u Institutu za ispitivanje materijala, osnovni tipovi oštećenja zubaca zupčanika su:

1. površinska oštećenja,
2. zaribavanje,
3. trajne deformacije,
4. površinska oštećenja usled zamora,
5. prslina i
6. lom zubaca.

POVRŠINSKA OŠTEĆENJA

Površinska oštećenja javljaju se na radnim površinama bokova zubaca u obliku:

- habanja usled klizanja,
- korozije,
- pregrevanja, i
- erozije.

According to the clauses of this Annex, the manufacturer is obliged to identify and assess the hazards relating to his machine; he must design and construct them accordingly. *Part 1.3.2. Risk of break-up during operation*, defines:

- that various parts of machinery and their linkages must be able to withstand stresses to which they are subjected when used as foreseen by the manufacturer,
- the durability of materials used must be adequate for the nature of the work place foreseen by the manufacturer, in particular regarding the phenomena of fatigue, ageing, corrosion and abrasion,
- that the manufacturer must indicate in the instructions the type and frequency of inspection and maintenance required for safety reasons. He must, where appropriate, indicate the parts subjected to wear and criteria for replacement,
- where a risk of rupture or disintegration remains despite measures taken (e.g. as with grinding wheels) the moving parts must be mounted and positioned in such a way that in case of rupture their fragments will be contained.

Irregularities during exploitation of gear transmission which can cause gear damage, even its fracture, are numerous, and normally act simultaneously and jointly. The most influencing on gear tooth damage are: inadequate lubrication, geometric deviation in mesh of gear pair teeth (due to inaccurate assembling of gear pair or, as a consequence of teeth and other gear transmission parts wear), inhomogeneity in gear material introduced during manufacturing, inadequate heat treatment, impact loads exceeding nominal values for which the gear pair has been calculated.

TYPES OF TEETH DAMAGES

Here, different types of damages and fractures of gear teeth are presented, and defined are basic notions according to references /2–5/. Types of teeth damage of highly stressed gear pairs, operating in non-protected environment and exposed to atmospheric conditions examined in this work are described in detail.

Depending on loading type and operating conditions, more than 20 different types of damage can occur on the coupled teeth of gears. According to the analysis of different authors, /2,5/, definitions of teeth damages given in standard ISO 10825, /6/, and based on the experience of gear pairs tests performed at the Institute for material testing, basic types of gear teeth damages are:

1. surface deterioration,
2. scuffing,
3. permanent deformation,
4. surface fatigue phenomena,
5. cracks, and
6. tooth fracture.

SURFACE DETERIORATIONS

Surface deteriorations occur on working surfaces of teeth flanks in the form of:

- sliding wear,
- corrosion,
- overheating, and
- erosion.

Habanje usled klizanja spada u najčešće oblike oštećenja zubaca. Habanje kao opšti pojam se odnosi na uklanjanje materijala sa površina koje klizu jedna po drugoj. On obuhvata i abrazivno dejstvo štetnih primesa u mazivu – abrazivno habanje, i habanje zbog lokalnog lepljenja i odvajanja čestica materijala zubaca – adheziono habanje (sl. 1). Habanje usled klizanja javlja se u toku eksploatacije od samog početka u vidu udubljenja u zoni velike brzine klizanja. Prvo se javlja između kinematskog i podnožnog kruga, a zatim između kinematskog i temenog kruga i širi se na celu površinu aktivnog dela boka zupca.



Slika 1. Adheziono habanje
Figure 1. Adhesive wear.

Na početku rada zupčastog para javlja se tzv. habanje u toku razrade, koje ima pozitivan efekt na raspodelu opterećenja u sprezi dva zupca, jer dovodi do glačanja površine mašinski obrađenog boka zupca. Može se javiti u vidu umerenog habanja i u vidu poliranja. Kod umerenog habanja primećuje se da je materijal skinut sa površina glave i noge zupca, dok je poliranje veoma spor proces habanja u toku kojeg se hrapavost kontaktnih površina postepeno smanjuje do sjaja ogledala. Habanje koje posle određenog perioda rada dostiže kritičan obim definiše se kao prekomerno habanje, sl. 2.

Posebni oblici habanja usled klizanja su: umereno grebanje, izraženo grebanje i interferentno habanje. Kod umerenog grebanja javljaju se sitni žlebovi u pravcu klizanja, nepravilno raspoređeni po bokovima zupca. Izraženo grebanje je vrsta abrazivnog habanja sa prisutnim uglačanim linijskim žlebovima u pravcu klizanja zupca, kao posledica kopanja površina spregnutih zubaca oštrim ivicama hrapavih površina ili tvrdim česticama prilepljenim za njih. Interferentno habanje je habanje vrha jednog zupca i/ili podnožja zupca koji je s njim u sprezi. Kao rezultat ovog habanja javljaju se udubljenja u podnožjima i zaobljenja na vrhovima zubaca dva spregnuta zupčanika.

Habanje se može smanjiti izborom maziva i povećanjem kvaliteta obrade radnih površina, kao i izborom materijala. Bokovi zubaca malog zupčanika treba da imaju veću tvrdoću, jer trpe veći broj promena opterećenja u toku rada.

Korozija je vid površinskog razaranja bokova zubaca. Hemijska korozija predstavlja degradaciju površinskih slojeva materijala pod hemijskim dejstvom primesa iz maziva. Kontaktna korozija je površinsko oštećenje zbog ponavljanja malih pomeranja jedne kontaktne površine po drugoj, što dovodi do ubrzanog oštećenja abrazijom. Ljuspanje se javlja zbog procesa oksidacije u toku termičke obrade.

Sliding wear belongs to the most frequent type of tooth damages. Wear as a general term that refers to the removal of material from two surfaces sliding on one another. It includes also an abrasive action of detrimental particles in the lubricant – abrasive wear, and the wear due to localized adhesion and detachment of material particles from the teeth – adhesive wear (Fig. 1). Sliding wear occurs in exploitation from the very beginning, in the form of cavities in the zone of high sliding rate. It initiates between pitch and root circle, then between pitch and tip circle, and then extends to the whole area of tooth flank active part.



Slika 2. Prekomerno habanje
Figure 2. Excessive wear.

At the beginning of gear pair operation, so called running-in wear occurs, with positive effect on load distribution on two coupled teeth, because of smoothing of the surface of the machined tooth flank. It can occur in forms of moderate wear and polishing. Moderate wear reveals that metal has been removed from both addendum and dedendum teeth surfaces, and polishing is a very slow wearing-in process in which the roughness of contacting surfaces is gradually worn until mirror-like surfaces. After a certain working period, wear attains a critical level, defined as excessive wear, Fig. 2.

Specific types of sliding wear are: moderate scratching (scoring), severe scratching and interference wear. In moderate scratching, fine grooves in the sliding direction occur, irregularly spaced over teeth flanks. Severe scratching is a form of abrasive wear with smooth linear grooves in the direction of tooth sliding, as a consequence of the ploughing action of hard asperities on mating flanks or by hard particles embedded therein. Interference wear is a wear at the tip of one tooth and/or at the root of the mating tooth. Results of this wear on both roots and tips of the teeth are the occurrence of hollowing on the former and blunting on the latter.

Wear can be reduced by selection of lubricant and increasing the machined quality of working surfaces, as well as by material selection. Teeth flanks of pinion have to be harder, since they are exposed to higher loading rate at work.

Corrosion is a specific type of tooth flank surface damage. Chemical corrosion is surface degradation of tooth material caused by chemical attack of lubricant admixture. Fretting corrosion is surface damage caused by repeated small movements of one contacting surface over another, causing fast damage by abrasive action. Scaling occurs due to an oxidation process during heat treatment.

Pri radu zupčastih parova mogu se javiti visoke temperature koje dovode do *pregrevanja*, praćenog pohanom zonom i plastičnom deformacijom bokova zubaca.

Poseban vid oštećenja površina bokova zubaca je *erozija*: kavitacijska, hidraulična ili električna. Kavitacijska erozija nastaje zbog visokofrekventnih vibracija ili kada je mazivo zagađeno vodom, vazduhom ili drugim gasovima. Hidrauličnu eroziju izaziva dejstvo mlaza ili struje tečnosti, koja sadrži vazduh i sitne čestice. Električna erozija se javlja pri pražnjenju električnog luka ili varnica između spregnutih bokova, praćena malim kraterima glatkih ivica na bokovima zubaca i nekad, većim sagorelim oblastima.

ZARIBAVANJE

Zaribavanje je oštećenje bokova zubaca od dejstva velikih površinskih pritisaka i brzina klizanja, a javlja se kao vid specifičnog habanja sa brazdama i zarezima u smeru klizanja. *Hladno zaribavanje* se javlja pri obimnim brzinama ispod 4 m/s, kod zupčanika izrađenih od poboljšanog čelika sa nižim kvalitetom obrade, relativno retko, a *toplo zaribavanje* nastaje pri velikim brzinama klizanja i površinskim pritiscima, kod termički obrađenih cilindričnih zupčanika. Primer izraženog zaribavanja zbog velikog odstupanja paralelnosti osa spregnutih zupčanika je dat na sl. 3.

TRAJNE DEFORMACIJE

Trajne deformacije se pojavljuju kao utisnuta mesta na bokovima zubaca pri prolazu stranih čestica kroz zahvat u vidu: valovitosti, brazdi ili hrapavih ivica.

Valovitost su trajne deformacije nastale na mestima najvećeg opterećenja bokova zubaca. Ove deformacije imaju oblik malih grebena, normalnih na pravac klizanja. Grebeni su valoviti i daju površini bokova izgled sličan pesku ili talogu, u manjoj meri rasturenom vetrom ili vodom.

Brazde su poseban vid oštećenja od izrazitih grebena i žlebova, koji nastaju plastičnom deformacijom, ali ponekad i dodatnim habanjem bokova zubaca. Najčešće se javlja na zupcima sporohodnih zupčanika, izrađenih od materijala male tvrdoće, sa velikom komponentom klizanja u pravcu linije kontakta zubaca.

Hrapave ivice predstavljaju deformaciju u obliku grubih, često oštih, izduženih ivica na krajevima zubaca, nastalih usled velikih opterećenja praćenih klizanjem ili usled zaribavanja, a ponekad u toku proizvodnih operacija.

ZAMORNA POVRŠINSKA OŠTEĆENJA

Zamorna oštećenja površine materijala nastaju zbog ponovljenih opterećenja bokova zubaca u toku rada, uklanjanjem dela materijala i formiranjem prslina. Javljaju se u vidu pitinga, ljuspastog pitinga, ljuštenja i površinskog drobljenja, kao posledica površinskih i potpovršinskih napona od kontaktnog opterećenja.

Najčešće se javlja *pitting*, u vidu malih jamica veličine od nekoliko desetina μm do 0,2 mm. Piting se uglavnom pojavljuje nakon više od 10^4 promena opterećenja, odnosno sprežanja istog para zubaca. Prslina koje nastaju obično su pod uglom od 5° do 20° u odnosu na bočnu površinu (sl. 4), i leže u pravcu normale na glavni normalni napon.

Overheating is damage caused by an excessively high temperature occurring during gear pair operation, followed by scuffed areas and plastic deformation of tooth flanks.

Specific form of tooth flank surface damage is *erosion*: cavitation, hydraulic or electric. Cavitation erosion may occur when high-frequency vibrations are present or when the lubricant is contaminated with water, air or other gases. Hydraulic erosion is due from the action of a jet or stream of liquid, containing air and fine particles. Electric erosion occurs at discharge of electric arc or sparks between mating flanks, producing small, smooth edged craters in tooth flanks, and occasionally, by larger burned areas.

SCUFFING

Scuffing is the type of tooth flank damage due to high surface pressure and sliding velocity, occurring as form of specific wear with fissures and incisions in the sliding direction. *Cold scuffing* occurs at circumferential velocity below 4 m/s, on gears produced of quenched and tempered steel of lower machining quality, occurring rarely, and *hot scuffing* occurs at high sliding speeds and surface pressures, on heat treated cylindrical gears. An example of expressed scuffing as a result of pronounced misalignment of coupled gears axes is presented in Fig. 3.

PERMANENT DEFORMATIONS

Permanent deformations are indentation in tooth flanks caused by passage through a mesh of individual particles and can occur as: rippling, ridging and burrs.

Rippling is a permanent deformation which occurs at the maximum loaded sites of tooth flanks. This deformation is of form of minute ridges, perpendicular to sliding direction. The ridges are wavy and give gear flank an impression similar to sand or mud disturbed by wind or water.

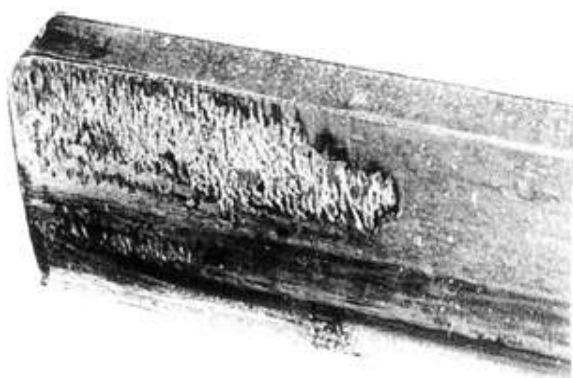
Ridging is a specific damage form of pronounced ridges and grooves as a result of plastic deformation, and sometimes wear of teeth flanks. It is most frequently found on teeth of slow-speed gears, made of low-hardness material, with a significant sliding component in the direction of the teeth contact lines.

Burrs are deformations which occur as rough, often sharp, extensions formed on edges of teeth and caused by heavy loading with high friction or by the action of scuffing; only occasionally caused during manufacture.

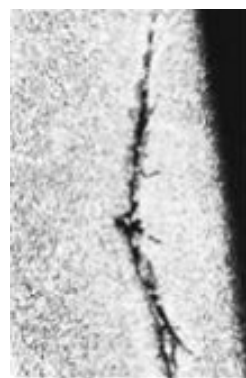
FATIGUE SURFACE DAMAGES

Fatigue damage of the material surface is caused by load repeated action on teeth flanks during gear operation with the removal of metal and the formation of cracks. It occurs in the forms of pitting, flake pitting, spalling and case crushing, as a consequence of surface or sub-surface stresses caused by contact loads.

Pitting is most frequent in the form of small pits, sizes from several tenths of μm to 0.2 mm. Pitting usually occurs after more than 10^4 load cycles, i.e. contacts of the same gear pair. Initiated cracks are distributed at 5° to 20° in regard to flank surface (Fig. 4), positioned in the normal direction to principal normal stress.



Slika 3. Izraženo zaribavanje
Figure 3. Excessive scuffing.



Slika 4. Pravac prslina ispod površine boka zupca
Figure 4. Tooth flank sub-surface crack direction.

Eksperimentalna ispitivanja, /7/, su pokazala da su aktivne površine bokova zubaca ispod kinematske površine (noga zupca) više izložene pitingu nego površine bokova iznad nje kod pogonskog i kod gonjenog zupčanika, ali je češće kod pogonskog zupčanika.

Razlikuju se početni, progresivni i mikro piting. Početni piting se javlja na početku rada zupčastog para, čak i odmah posle razrade. Prepoznaje se kao oštećenje u vidu malih, plitkih jamica, koje su posledica nepravilne obrade površina a može preći u progresivni piting (sl. 5). Početni piting može eliminisati početne nepravilnosti kontaktnih površina i time zaustaviti zamorno oštećenje. Mikro piting je pojava mreže mikro jama ili mikro prslina, kao rezultat nedovoljne debljine uljnog filma u odnosu na opterećenje.

Ljuspasti piting je vid oštećenja površine zupca koji uključuje probijanje i izbacivanje tankih ljuspica materijala u velikoj oblasti, čime se stvaraju plitke šupljine približno konstantne dubine, oblika trouglova sa vrhom nadole.

Ljuštenje-otcepljenje je oštećenje slično ljuspastom pitingu, pri čemu su slomljeni komadi materijala često deblji od kaljenog sloja i nepravilnog su oblika. Obično se javlja kod otvrdnutih površina bokova cilindričnih zupčanika sa pravim zupcima. Na sl. 6 je prikazan izgled ovog oštećenja kod zupčanika sa pravim zupcima, i mikografski snimak (100×), na kojem se vidi razvoj potpovršinske prsline.

Površinsko drobljenje je težak oblik ljuštenja zbog rasta prslina uz cepanje većih delova površinski kaljenog čelika.

PRSLINE

Prsline zubaca nastaju zbog kaljenja, brušenja ili zamora.

Do *prslina zbog kaljenja* dolazi pri termičkoj obradi zbog prekomernih unutrašnjih napona. Ove prsline se često otkrivaju tek posle određenog vremena rada ili pri brušenju.

Prsline zbog brušenja javljaju se u toku ili posle obrade brušenjem, i uglavnom imaju pravilan raspored. Ove prsline su kratke, ne mnogo duboke, javljaju se kao serije približno paralelnih prslina, najčešće normalno na pravac putanje brusnog točka ili u obliku rešetke od prslina.

Zamorne prsline rezultat su ponavljanja naizmeničnih ili cikličnih opterećenja, čiji su intenziteti najčešće znatno manji od zatezne čvrstoće materijala (sl. 7).

Experimental tests have shown, /7/, that tooth flank active surface bellow pitch surface (dedendum) is more exposed to pitting than the addendum surface above it on both drive and driven gears, but is more frequent on drive gears.

Pitting types are initial, progressive, and micro pitting. Initial pitting takes place at the beginning of gear pair work, even just after running-in. It is revealed as damage in the form of small shallow pits, induced by improper surface machining and can turn to progressive pitting (Fig. 5). Initial pitting can eliminate initial irregularities of contact surfaces and arrest fatigue damage. Micro pitting is the occurrence of the net of micro pits or micro cracks, as a result of insufficient oil film in relation to loading.

Flake pitting is a form of tooth-surface damage involving the breaking out of thin flakes of material on large area, leaving shallow cavities of roughly constant depth shaped like inverted triangles.

Spalling is damage similar to flake pitting in which the detached material fragments tend to be thicker than the hardened layer and are of irregular shape. It usually occurs on flank hardened surfaces of cylindrical gears with straight teeth. This damage on the gear with straight teeth is shown in Fig. 6, and with micrograph (100×) revealing the development of sub-surface cracks.

Case crushing is a severe form of spalling due to crack growth with cleavage of bigger particles of hardened steel.

CRACKS

Quenching, grinding or fatigue can produce tooth cracks.

Hardening cracks are caused during heat treatment by excessive internal stresses. These cracks are often detected only some time after or, at grinding operation.

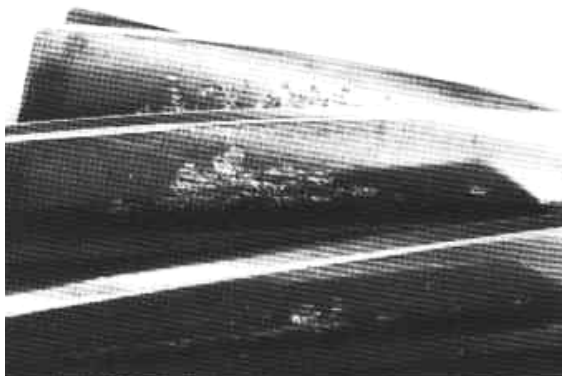
Grinding cracks emerge during or after grinding operation, usually in a regular pattern. These cracks are short, not very deep and appear as a series of roughly parallel fissures, usually perpendicular to the path of the grinding wheel, or in a crazed pattern.

Fatigue cracks are results of repeated alternating or cyclic loads with magnitudes usually considerably below the tensile strength of the material (Fig. 7).

LOM ZUPCA

Do loma zupca može doći zbog preopterećenja, smicanja zupca, posle plastične deformacije i zbog zamora.

Lom usled preopterećenja je rezultat jednokratnog ili malog broja dejstva velikog opterećenja. Ovaj lom se javlja kao krt, žilav ili kvazi-krt lom.



Slika 5. Piting boka zupca – početni (gore) i progresivni (dole)
Figure 5. Tooth flank pitting – initial (up) and progressive (down)

Smicanje zupca je lom sa površinom odsečenom slično mašinski obrađenoj površini. Ovaj otkaz se javlja kod zupčanika od materijala niske čvrstoće, spregnutog sa zupčanikom od jačeg materijala, pri jednokratnom preopterećenju.

Zamorni lom se javlja zbog savojnog opterećenja ili kao lom dela zupca. Zamorni lom od savijanja nastaje zbog rasta prsline tokom velikog broja ciklusa opterećenja. Na površini loma izdvajaju se dve zone: površina zamora i površina konačnog loma. U zoni zamora nema znakova plastične deformacije, a površina zone konačnog loma je glatka, mat i često ispresecana zatvorenim linijama (sl. 8), često i sa strijama uzastopnog rasta prsline. Zamorni lom dela zupca nastaje na krajevima zubaca cilindričnih i koničnih zupčanika, zbog koncentracije opterećenja uz izraženi piting, koji inicira zamornu prslinu u susednom zupcu.

Složeno opterećenje zubaca izaziva različite vidove oštećenja, koji podstiču jedno drugo. Zato je potrebno proračunom nosivosti zupčanika obuhvatiti sve kriterijume: čvrstoću bokova i podnožja zubaca, zaribavanje i habanje.

ISPITIVANJE I ANALIZA OŠTEĆENJA ZUBACA

Programom ispitivanja, zavisno od tipa otkaza zubaca (oštećenje ili lom), treba definisati sve aktivnosti.

U širem obliku on obuhvata: vizuelni pregled, kontrolni proračun, osnovne geometrijske mere zupčanika i odступа

TOOTH BREAKAGE

The tooth breakage can take place due to overload, tooth shear, after plastic deformation and due to fatigue.

Overload breakage is a result of a single action or a small number of acting high loads. This fracture can be brittle, ductile or quasi-brittle.



Slika 6. Ljuštenje cepanjem
Figure 6. Spalling.

The surface appearance of the *sheared tooth* is similar to that of machined surfaces. This failure occurs in gears of low-strength material coupled with gears of stronger materials, at single severe overload.

Fatigue breakage develops as bending fatigue or tooth end breakage. Bending fatigue fracture is caused by crack growth during a large number of load cycles. The fracture surface consists of two different zones, the fatigue and final fracture surfaces. The fatigue zone is free from marks of plastic deformation, the surface of final fracture is smooth, matt, often traversed by closed lines (Fig. 8), frequently with striation of successive crack growth. Tooth end fatigue breakage occurs at a tooth end of a cylindrical or bevel gear, attributed to load concentration followed by severe pitting which initiates the fatigue crack in the next tooth.

Teeth complex loading introduces different kinds of damage, with impelling effects. For that it is necessary by calculation of gear working capacity to involve all criteria: strength of tooth flank and foot scuffing and wear.

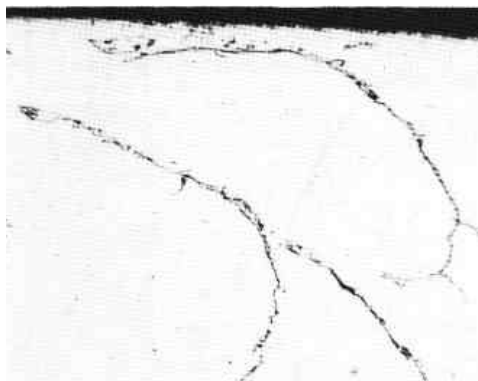
TESTING AND ANALYSIS OF TOOTH DAMAGE

All activities should be defined by the test programme, depending on tooth failure type (damage or fracture).

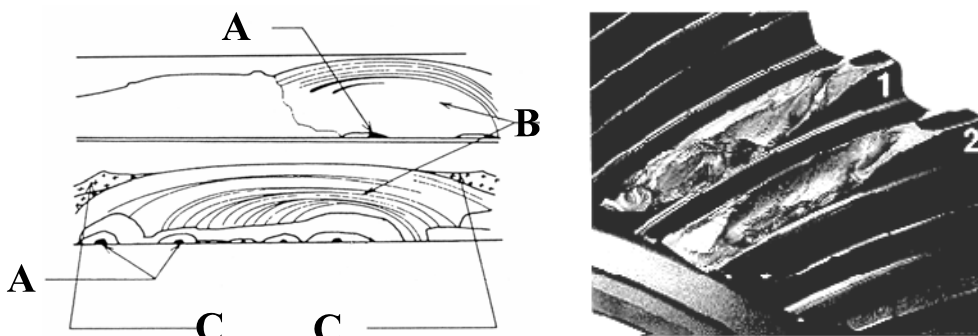
In the extended form it includes: visual examination, a test calculation, gear geometry basic measures and devia

nja zbog habanja i plastične deformacije, otkrivanje površinskih i prostornih prslina i nehomogenosti materijala metodama bez razaranja, karakterizaciju materijala (hemijski sastav, mehaničke osobine, mikrostrukturu, stanje i kvalitet termičke i površinske obrade), analizu prelomnih površina (makro pregled, skening mikroskopija), spoljne uticaje (atmosferski uslovi, sredina, mazivo). Postupak ispitivanja loma zubaca u Institutu za ispitivanje materijala usvojen je prema pristupu izloženom u radu /8/.

tions due to wear and plastic deformation, detection of planar or volumetric defects and material inhomogeneity by non-destructive methods, material characterization (chemical composition, mechanical properties, microstructure, state and quality of heat and surface treatment), fracture surface analysis (macro examination, scanning microscopy), external effects (atmospheric conditions, environment, lubricant). Teeth fracture testing procedure in the Institute for material testing is accepted based on the approach from Ref. /8/.



Slika 7. Izgled zamorne prsline (60×)
Figure 7. View of fatigue crack (60×).



Slika 8. Zamorni lom zbog savijanja (A–inicijacija prsline; B–rast prsline, C–lom)
Figure 8. Bending fatigue fracture (A–crack initiation; B–crack growth; C–fracture).

Prikazan je postupak ispitivanja i analize oštećenja zubaca zupčanika radi procene njegove upotrebljivosti, razvijen i usvojen u Laboratoriji za ispitivanje metala Instituta za ispitivanje materijala. Kao primer su izabrana dva identična zupčasta para, levi i desni, pogona prednje strele bagera na otvorenim kopovima uglja, jer se koriste u uslovima velikih radnih i udarnih opterećenja, bez zaštite od atmosferskih uslova. Sem toga, njihov lom i otkaz može dovesti do loma velike konstrukcije bagera i ozbiljno ugroziti bezbednost radnika.

Ispitivanja metodama bez razaranja

Vizuelni pregled gonjenih zupčanika oba zupčasta para ukazuju na različite vrste oštećenja.

Na bokovima zubaca koji ulaze u spregu pri podizanju strele jasno su vidljive:

- plastične deformacije talasastog oblika u pravcu normalnom na pravac klizanja,
- oštećenja tipa ljuspastog pitinga na svim radnim površinama, kako u pojasu bokova zubaca oko podeonog kruga, tako i na temenim delovima bokova zubaca,

The procedure for testing and analysis of gear teeth damage for the evaluation of their usability, developed and adopted in Laboratory for metal tests in the Institute for material testing, is presented. As an example, two identical gear pairs are selected, left and right, of the excavator front arm drive at surface coal mines, being used in conditions of high working and impact loads, without protection from atmospheric conditions. Additionally, their fracture and failure may lead to fracture of the huge excavator structure and endanger the safety of workers.

Non-destructive testing methods

Visual examination of wheels of both gear pairs indicated different damage types.

The teeth flanks entering the mesh during lifting of the arm clearly depict:

- plastic deformations of wave form in the direction perpendicular to sliding direction,
- damages of flake pitting on all working areas, in the region of teeth flanks, around the pitch circle, as well as on tip zones of teeth flanks,

- jasne plastične deformacije zubaca blizu temenih linija,
- abrazivno habanje.

Na bokovima zubaca koji ulaze u spregu pri spuštanju strele vidljivi su:

- početni piting po površini bokova zubaca,
- kontaktna korozija.

Izrazito manji nivo oštećenja pogonskih zupčanika oba zupčasta para je utvrđen vizuelnim pregledom.

Ispitivanjem magnetofluksom otkrivene su:

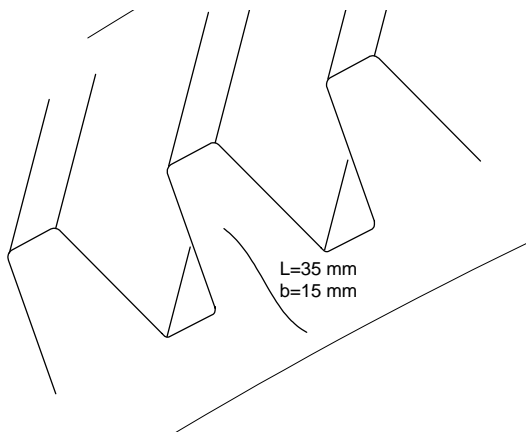
- prsline na čeonim stranama zubaca (sl. 9),
- prsline na bokovima zubaca ranije repariranih područja, na gonjenom zupčaniku desnog i levog zupčastog para.

Ispitivanje pogonskih zupčanika oba zupčasta para je otkrilo površinska mehanička oštećenja, ali ne i prsline.

Analiza rezultata ispitivanja

1. Bokovi zubaca gonjenih zupčanika koji ulaze u spregu pri podizanju strele nose veće radno opterećenje. Na njihovim površinama su nađene različite vrste oštećenja.

Intenzitet talasastih plastičnih deformacija normalno na pravac klizanja je takav da ne predstavlja potencijalni uzrok otkaza, ali zahteva praćenje u eksploataciji.



- clear plastic deformation of teeth close to tip lines,
- abrasive wear.

The flanks of teeth entering the mesh during lowering of the arm clearly depict:

- initial pitting on the surface of teeth flanks,
- fretting corrosion.

A significantly lower level of damage of drive gears of both gear pairs is found by visual examination.

Magnetoflux testing has revealed:

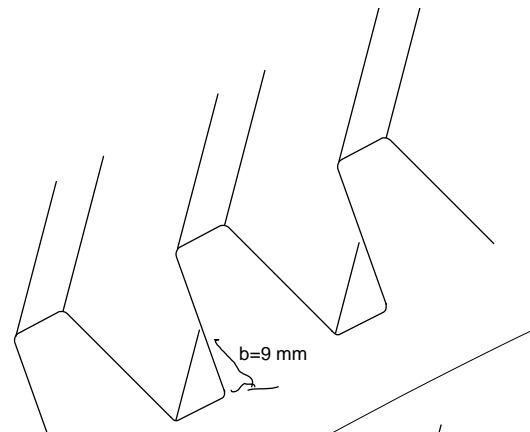
- cracks on tooth faces (Fig. 9),
- cracks on flanks of previously repaired regions on the wheel of the right and left gear pairs.

The testing of pinions of both gear pairs revealed surface mechanical damage, but not cracks.

Analysis of test results

1. The flanks of wheels entering the mesh during arm lifting are exposed to higher working load. Different forms of damage were found on their surfaces.

The intensity of wavy plastic deformation perpendicular to sliding direction is such that it does not present the potential cause of failure, but requires in-service monitoring.



Slika 9. Oblik i dimenzije prsline na čelima zubaca (L–dužina prsline, b–dubina prsline)
 Figure 9. Shape and dimension of cracks on tooth faces (L–crack length, b–crack depth).

Ljuspasti piting koji se ne javlja samo u pojasu bokova zubaca oko podeonog kruga, već i na temenim delovima bokova zubaca, ukazuje na to da oštećenje nije prouzrokovano nedozvoljenim kontaktnim naprezanjima, već lošim podmazivanjem koje dovodi do odlepljivanja čestica sa površine bokova zubaca. Ovo oštećenje može biti i rezultat loše termičke obrade zupčanika, ali za ispitivane zupčanike nema raspoloživih podataka o termičkoj obradi.

Izražene plastične deformacije zubaca u okolini temenih linija rezultat su udarnih opterećenja pri ulaska zubaca u spregu i nedovoljnog podmazivanja, a verovatno i odstupanja osnovnog rastojanja nastalog pri montaži zupčastog para. Međutim, ni u ovom slučaju podaci o kontroli analiziranih zupčanika nisu dostupni.

Abrazivno habanje površina bokova zubaca posledica je nezaštićenosti zupčastog para od okoline (zaštitne limove treba propisno montirati) i prisustva nečistoća u mazivu.

2. Bokovi zubaca gonjenih zupčanika, koji su u sprezi pri spuštanju strele, trpe veće klizanje. Vizuelnim pregledom na njihovim površinama otkrivena su različita oštećenja.

Flake pitting that occurred on teeth flanks, not only around pitch circle zones, but also on zones below teeth tips, indicates that damage was not caused by non-allowed contact stresses, but due to poor lubrication which produced spalling of particles from teeth flank surfaces. This type of damage can also be associated with poor heat treatment, but for gears considered here there are no available data about heat treatment.

Pronounced plastic deformations around tooth tip lines are result of impact load in the first instance of teeth meshing and from poor lubrication, but probably this can be associated to the deviation of gear pair centre span during assembly. However, this type of data were also unavailable for the analysed gear.

Abrasive wear of teeth flanks is the result of the lack of protection from the environment (shielding plates should be properly mounted), and from impurities in lubricants.

2. Teeth flanks of wheels which are in contact during the lowering of arm suffer higher levels of sliding. On their surfaces various damage is discovered during visual inspection.

Ova oštećenja su, najverovatnije, rezultat nedovoljnog podmazivanja, a imaju oblik:

- početnog pitinga po celoj površini bokova zubaca,
- kontaktne korozije zbog suvog trenja dodirnih površina.

3. Na čeonim stranama bokova zubaca gonjenog zupčanika desnog zupčastog para nađene su početne zamorne prrsline, verovatno inicirane nehomogenostima u materijalu zupčanika (npr. u toku kaljenja). Veličina i raspored ovih prrslina upućuju na potrebu zamene zupčanika.

4. Na bokovima zubaca pogonskih zupčanika oba zupčasta para su oštećenja manjeg obima.

4.1. Na bokovima zubaca pogonskih zupčanika koji ulaze u spregu pri podizanju strele i trpe veće radno opterećenje, postojeća oštećenja tipa ljuspastog pitinga i plastičnih deformacija nisu potencijalni uzrok otkaza, ali ih je potrebno pratiti u daljoj eksploataciji.

4.2. Vizuelnim pregledom otkrivena su oštećenja u vidu brazdi u pravcu normalnom na pravac klizanja. Ona se iskazuju kao zaribavanje, čiji uzrok može biti neadekvatno uhodavanje pre punog opterećenja i loše naleganje bokova spregnutih zubaca po dužini pri sklapanju.

4.3. Na bokovima zubaca koji ulaze u spregu pri spuštanju strele vidljivo je oštećenje tipa ogrebotina duž dodirnih linija, koje je rezultat udarnih opterećenja pri ulasku i izlasku zubaca iz sprege.

Zaključak o kontroli zupčanika

Gonjeni zupčanici imaju oštećenja čiji tip i intenzitet ukazuju na potrebu njihove zamene.

Nađena oštećenja pogonskih zupčanika nisu opasna za rad, jer su oni preciznije izrade zubaca, sa bočnom linijom bačvastog oblika i korigovanim profilom u zoni temena i podnožja zubaca, kao i prikladnije termičke obrađeni.

Oštećenja na analiziranim zupčanicima rezultat su:

- nehomogenosti u materijalu zupčanika nastalih u izradi,
- nedovoljnog podmazivanja,
- odstupanja profila zubaca nastalih kao posledica plastičnih deformacija zubaca i eventualno pri izradi zupčanika (ne postoje podaci o početnoj geometriji zupčanika),
- udarnih opterećenja i preopterećenja pri puštanju u rad i pri promeni smera obrtanja zupčastih parova.

ZAKLJUČAK

U toku rada zupčanika na zupcima se javljaju različiti oblici oštećenja koji, ako postanu kritični, mogu dovesti do nepravilnosti u sprezi ili do otkaza zupčastog prenosnika. Kod zupčanika bez termičke obrade bokova zubaca, kritična je nosivost zupca, dok je za termički obrađene zupčanike kritična nosivost podnožja zubaca.

Oštećenja i lomovi zubaca i otkazi velikih i jako opterećenih zupčastih prenosnika predstavljaju opasnost u pogledu bezbednosti osoblja i mogu biti uzrok velike materijalne štete.

Ispitivanje zupčastog para je prikazano da bi se istakla složenost procesa ispitivanja oštećenja zubaca zupčanika i analize rezultata. Ispitivanju zupčanika ne sme se pristupiti samo sa stanovišta rutinskog ispitivanja metodama bez razaranja, već istovremeno sa stanovišta poznavanja geometrije, materijala i funkcionisanja zupčastih parova, i razu-

tion. These damages are most probably the result of insufficient lubrication, and had occurred in the form of:

- initial pitting on whole teeth flank surfaces,
- fretting corrosion as result of lack of lubrication.

3. Initial fatigue cracks are discovered on the faces of wheel teeth of right gear pair, initiated probably as result of inhomogeneities of material (i.e. during quenching). Size and distribution of these cracks lead to the conclusion that it is necessary to replace gears.

4. On the flanks of the pinions of both gear pairs the detected damages are minor.

4.1. On teeth flanks of pinions which enter contact during lifting of the arm and suffer a higher level of load, the existing damages in the form of flake pitting and plastic deformation are not eventual failure causes, but they have to be monitored in further exploitation.

4.2. Visual inspection revealed ridging type of damage, in the direction perpendicular to the sliding direction. These locations exhibited scuffing which probably occurred as a result of inappropriate running prior to full loading and poor tolerance of meshed teeth flanks during assembly.

4.3. Scratch type damage along contact lines is visible on teeth flanks entering in contact during lowering of the arm which is the result of impact load while entering and exiting phases of teeth meshing.

Conclusion on gear inspection

Driven gears sustained damage in type and extension that indicated that their replacement is necessary.

Detected damage in pinions is not significant for normal operation since they are machined more accurately, with crowning teeth shape and corrected profile in tip and root zones, but also with much more convenient heat treatment.

Damages on analysed gears are the result of:

- inhomogeneities in gear material from manufacture,
- poor lubrication,
- deviations in teeth profile caused by plastic deformation of teeth or during manufacture (data about initial gear geometry are not available),
- impact loading and overloading during running-in and from changes of rotating direction of gear pairs.

CONCLUSION

During gear operation, various types of teeth damages occur, and if they become critical could lead to irregularities during meshing or failure of gear transmission. For gears with no heat treatment of teeth flanks the tooth strength is critical, while for heat treated gears the tooth root strength is critical.

Damage and breakage of teeth and failures of large and highly stressed gear transmissions are a potential danger regarding personnel safety and can cause an important material loss.

Inspection of gear pair is presented in order to emphasize the complexity of damaged gear teeth test procedure and result analysis. The approach to gear testing could not be based only on routine use of non-destructive test methods, but also approached from the geometry, material and functionality of gear pairs and understanding the differences

mevanja razlika između različitih vrsta oštećenja. Takav pristup omogućava definisanje korektivnih mera u eksploataciji zupčanika, koje će dovesti do veće pouzdanosti i bezbednosti rada mašina čiji su zupčanici deo.

Zbog toga je, u skladu sa procesom usvajanja Mašinske direktive 98/37/EC, neophodno usvajanje i harmonizacija standarda za proračun zupčanika (serija ISO 6336) i klasifikacije oštećenja zubaca zupčanika (ISO 10825), koji pripadaju tehničkom komitetu TC 60 i u nadležnosti su ISO. Takođe, javlja se potreba za propisivanjem procedure za ispitivanje i analizu oštećenja zupčastih parova. U Institutu IMS u toku je izrada ove procedure.

Zahvalnost

Članak je deo projekta TD-702B4: „Istraživanje, razvoj i primena metoda i postupaka ispitivanja, kontrole i sertifikacije konstrukcijskih proizvoda u skladu sa zahtevima međunarodnih standarda i propisa“. Projekt finansijski podržava Ministarstvo za nauku i ekologiju Vlade Srbije.

between damages of various types. Such an approach enables definition of corrective measures in gear service that will increase operational reliability and safety of machines with built-in gears.

In that sense, in accordance with the process of adopting Machinery Directive 98/37/EC, it is necessary to accept and harmonize standards for gear calculations (ISO 6336 series) and classification of gear teeth damage (ISO 10825) which are under jurisdiction of Technical Committee TC 60 and ISO. Additionally, there is a need for defining a procedure for testing and analysis of gear pair damages. The preparation of this procedure is in progress in Institute IMS.

Acknowledgements

The paper is part of project TD-702B4: “Research, Development and Application of Methods and Procedures of Testing, Inspection and Certification of Structural Products in accordance to the Requirements of International Standards and Regulations.” The project is supported by the Ministry of Science of the Serbian government.

LITERATURA – REFERENCES

1. Machinery Directive, Directive 98/37/EC of the European Parliament and of the Council of 22 June 1998 on the approximation of the laws of the Member States relating to machinery, 1998.
2. Ljubojević, B., *Pregled uobičajenih vidova oštećenja zupčanika u toku eksploatacije prenosnika*, Peti SEVER simpozijum o mehaničkim prenosnicima, Subotica, 1995, str.252-258.
3. Linke, H., Gajewski, G., *Breitenlastverteilung unter besonderer Berücksichtigung der Breitenballigkeit bei Verzahnungen*, Maschinenbautechnik, №10, 1983., 445-449.
4. Заблонский, К.И., Вопросы жесткости зубчатых передач большой мощности и методика их расчета, АН СССР, 1953.
5. Alban, Lester, E., *Systematic Analysis of gear Failures*, ASM Failure Analysis Library on CD, ASM International, 1997.
6. ISO 10825:1995 – Gears – Wear and damage to gear teeth – Terminology
7. Ristivojević, M.: *Analiza uticaja geometrije zubaca i raspodele opterećenja na površinsku čvrstoću cilindričnih evolventnih zupčanika*, Doktorska disertacija, Beograd, 1991.
8. Momčilović, D., Jauković, T., Bokan, D., *Quality management in forensic engineering*, IX Međunarodni simpozijum SymOrg, „Menadžment- ključni faktori uspeha“, Zlatibor, 2004.
9. Atanasovska, I., *Analiza raspodele opterećenja na spregnute parove zubaca sa osvrtnom na čvrstoću boka zupca zupčanika*, Magistarska teza, Kragujevac, 1999.
10. Bartelmus, W., *Condition monitoring of open cast mining machinery*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006.