

# OBRABA NA ^LENIH ELEVATORSKE VERIGE

## THE WEAR MECHANISM OF ELEVATOR CHAINS

FRANC LEGAT

Zabreznica 36, 4274 @irovnica

*Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19*

Opis mehanizmov obrabe -lenov elevatorskih verig. Rezultati preiskave dveh vzorcev elevatorskih verig po uporabi v cementarni. Opredelitev tribološkega sistema. Opis poškodb na površini -lenov in mikrostrukture jekla ob tej površini. Numerična analiza napetostnega stanja med -lenom in dvižnim kolesom.

ključne besede: elevatorske verige, obraba, mikrostruktura jekla, napetostno stanje

Description of the wear mechanism of elevator chains. Results of the examination of two chains after exploitation in cement production. Identification of the tribological system. Description of links surface damages and microstructure. Numerical analysis of stresses in links in contact with the elevator wheel.

Key words: elevator chains, wear, microstructure, stresses

### 1 UVOD

Med tehnične verige spadajo tudi elevatorske, ki se večinoma uporabljajo v rudarstvu, gradbeništvu, procesni industriji ter v proizvodnji gradbenega materiala. V teh industrijah obratujejo verige v zelo težkih razmerah; vročina, vlaga, abrazivni materiali, velike in neenakomerne obremenitve, erozija in drugo. Tribološki sistem, ki je izpostavljen naštetim okoliščinam, je sestavljen iz treh elementov: -len verige - vmesno sredstvo - -len verige. Obraba na dotikalnih ploskvah med -leni ter -leni in verižnim kolesom ima za posledico povečano delitev med -leni, ki sčasoma toliko zraste, da je potrebno verigo zamenjati. Delitev je notranja dolžina -lena in jo označujemo s "t", "d" pa je premer materiala -lena.

Pri prehodu preko verižnega kolesa (slika 1a) se -leni verige dotikajo njegovih zob v štirih dotikalnih ploskvah.

Dva -lena verige se pred vstopom v oprijem z verižnim kolesom dotikata na dotikalni ploskvi, ki je simetrična glede na os -lena verige. Pri vstopu v oprijem se njuna dotikalna ploskev zasuje za  $\phi/2$  glede na simetrično os v eno in nato se za  $\phi/2$  v drugo smer (slika 1b). Veriga je obremenjena s silo  $F_n$ , ki je enaka vsoti koristne obremenitve in sile teže.

Dotikalna ploskev se zaradi obremenitve elastično poveča. Porazdelitev obremenitve na dotikalni ploskvi je enaka Hertzovemu tlaku.

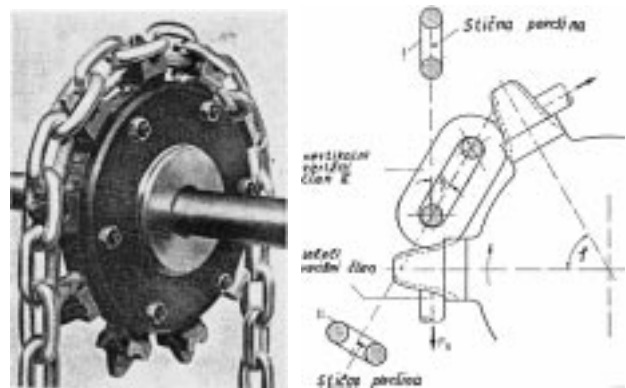
Dotikalni ploskvi -lenov, ki sta v dotiku, se medsebojno relativno premikata z različno hitrostjo in velikostjo premika. Neurejeno premikanje dveh -lenov se pojavlja v prostem - neobremenjenem in obremenjenem delu verige, medtem ko imamo v oprijemu z verižnim kolesom tri relativno statične dotikalne ploskve (slika 1b).

Tribološki kontakt je obremenjen z napetostmi, ki izhajajo iz normalne obremenitve in z obrabo zaradi

abrazivnega sredstva. Obrabo kontaktne ploskve na -lenu prikazuje slika 2.

### 2 PREISKAVE

Za preiskavo vzrokov obrabe na -lenih elevatorskih verig smo vzeli vzorce verige  $\phi 30 \times 120$ , ki obratuje na elevatorjih z medosno razdaljo 37 m in s skupno silo v verigi 69,4 kN. Kot zasuka dotikalne ploskve pri prehodu verige preko verižnega kolesa ( $\phi 12$ ) je med  $15^\circ$  in  $22,5^\circ$  odvisno od premera verižnika od  $D_k = 919$  mm do 614 mm. Preiskava je bila izvršena na vzorcih verig dveh proizvajalcev, ki so označeni z V in z R. Podatki o sistematičnem pregledu verige v cementarni so podani na naslednjih straneh. Načrt naloga je bila, da opredelimo mehanizem obrabe glede na obremenitveni kolektiv, pri katerem obratujeta obe verigi.



Slika 1: Prehod verige preko verižnega kolesa  
Figure 1: Passage of the chain over the elevator wheel

### 3 REZULTATI

#### 3.1 Tribolo{ki sistem

##### I. Funkcija:

Kora-ni elevator MC 2D, zobato veri'no kolo s -lenkasto verigo iz okroglega materiala, prenos klinkerja

##### II. Obremenitveni kolektiv:

$F_n = 51,4 - 69,4$  kN

$v = 1,25$  m/s

$\phi = 30 - 45^\circ$

frekvenca nihanja -lenov ni poznana

##### III. Struktura sistema:

Osnovni elementi:

Vzorec V: -leni verige, izdelani iz jekla ^ 5420 in cementirani na 707 do 795 HV 1, trdota necementiranega jekla 339 do 345 HV 1

Vzorec R: -leni verige, izdelani iz jekla ^ 5420 in cementirani 750 do 840 HV 30

Vmesni element:

Transportni material-abrazivno sredstvo: klinker 450-580 HV, cement iz visoke pe-i 524 HV

Okolica:

Voda, zrak, temperatura (max. 150°C)

##### IV. Vrsta obrabe:

Obraba pri drsnem trenju, abrazija, erozija

##### V. Po{kodbe

Veriga V

- bele lise na povr{ini dotikalne ploskve
- plasti-na deformacija
- odstranitev cementacijske plasti

Veriga R

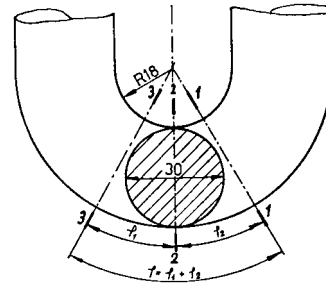
- bele lise na povr{ini
- odstranitev cementacijske plasti

#### 3.2 Mikrostruktura

**Slika 3** prikazuje prerezne ravnine 1-1, 2-2, 3-3, kjer sta bila vzorca V in R prerezana in pripravljena za preiskave v opti-nem mikroskopu.



**Slika 2:** Obrabljena notranja povr{ina -lena verige  
**Figure 2:** Worn internal link surface



**Slika 3:** Del veri'nega -lena z ozna-enimi prereznimi ravninami  
**Figure 3:** Part of a chain link with marked sectioning planes

#### Vzorec verige V 1: $\phi 30 \times 120 \times 36$ mm

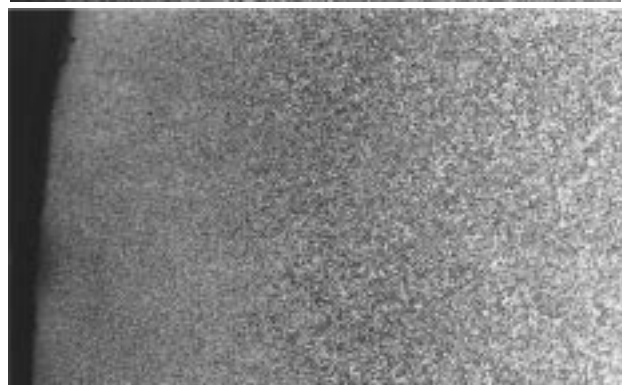
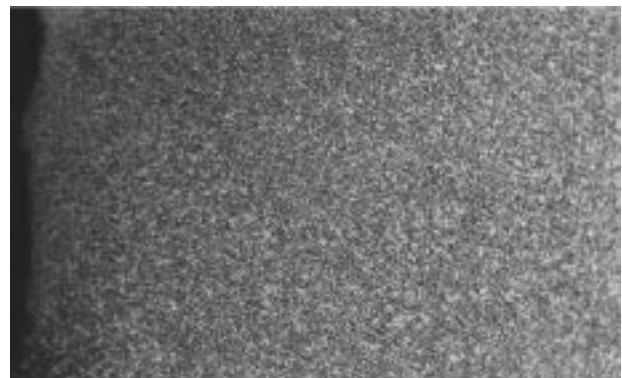
Fotografiji na **sliki 4a in 4b** prikazujeta mikrostrukturo na prerezu 1-1 na mestih obrabljene in neobrabljene cementacijske plasti.

Na prerezu 2-2 na **sliki 5** se vidi plasti-na deformacija jekla, ki je nastala po odlu{-enju cementacijske plasti.

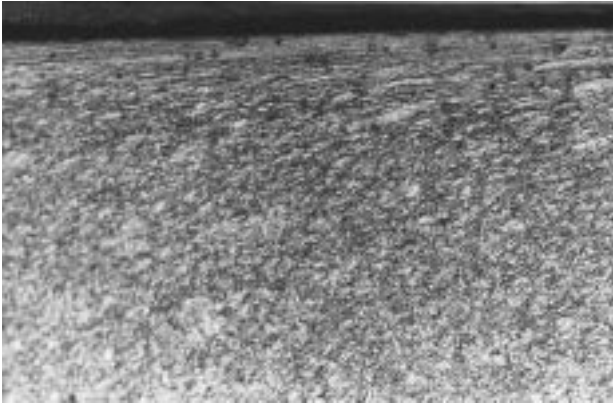
**Slika 6** prikazuje mikrostrukturo necementiranega jekla.

#### Vzorec verige R: $\phi 30 \times 120 \times 36$ mm

Na **slikah 7a in 7b** je prikazana mikrostruktura jekla na mestih obrabljene in ohranjene cementacijske plasti.



**Slika 4a, 4b:** 30 x. Mikrostruktura na prerezu 1-1 na mestih obrabljene in neobrabljene cementirane plasti  
**Figure 4a, 4b:** 30 x. Microstructure on the section 1-1 through the worn and intact case hardened layer



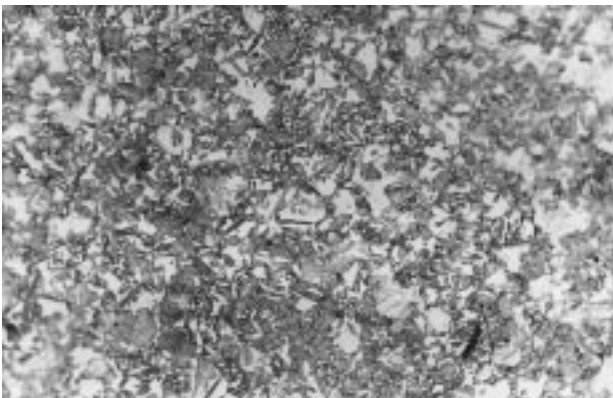
**Slika 5:** 100 x. Mikrostruktura na mestu, kjer se je obrabila cementirana plast. Plasti-no deformiran sloj ob povr{ini  
**Figure 5:** 100 x. Microstructure on place of worn case hardening layer. Plastic deformed steel at the link surface

### 3.3 Analiza napetostnega stanja

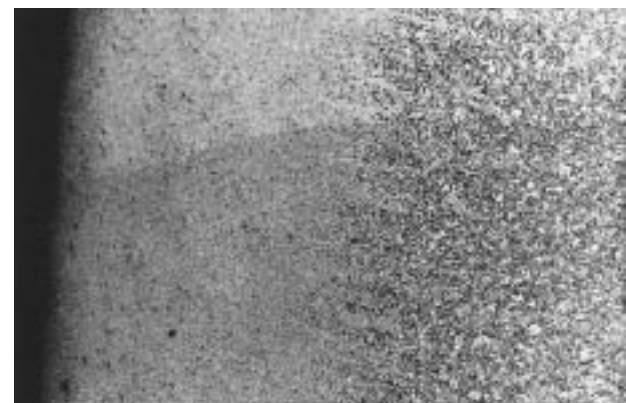
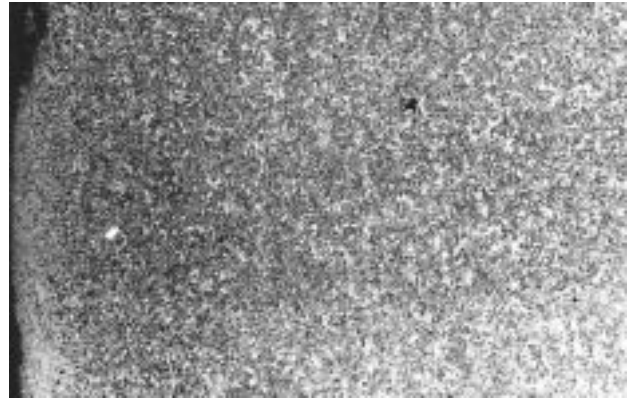
Napetostno stanje smo analizirali za dotikalno ploskev, ki jo tvorita dva obremenjena ^lena v dotiku. Dotikalna ploskev ima obliko elipse, ki jo preslikamo v pravokotnik.

**Slika 8** prikazuje karakteristi-no obrabo na ^lenku elevatorske verige. Posnetki so pripravljene na podlagi ve-letnega spremljanja obrabe na ve- razli-nih elevator-skih verigah, ki so delovale v razli-nih okoli{~inah. Mesta, ki so na **sliki 8** ozna-ena s ~rkami c, d in e, so bila izbrana tako, da je bilo mogo-e iz njihovih pove-anih posnetkov razbrati mehanizem obrabe med delovanjem verige.

Na mikroskopu REM narejeni posnetki so prikazani na **sliki 9**. Primerjalna analiza obrabljenih dotikalnih ploskev vzorcev V in R je pokazala, da je mehanizem obrabe enak tistemu, ki ga je mogo-e razbrati s posnetkov na **sliki 9**. Pri elevatorskih verigah torej nastopa abrazija ter utrujanje dotikalne povr{ine z abrazivnim sredstvom ali brez njega.



**Slika 6:** 500 x. Mikrostruktura v sredini ^lena  
**Figure 6:** 500 x. Microstructure of steel in the link core



**Slika 7a, 7b:** 30 x. Mikrostruktura jekla ob povr{ini ^lena, kjer je obrabljena oziroma ohranjena cementirana plast  
**Figure 7a, 7b:** 30 x. Microstructure of the steel at the link surface by worn and intact case hardening layer

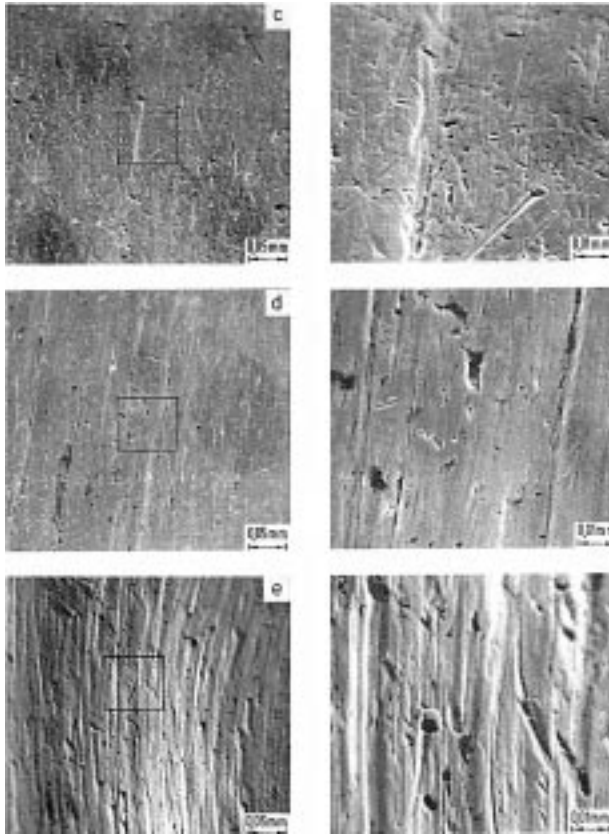
Obremenitveno stanje pri abrazivnem sredstvu prikazuje **slika 10**. V obremenitvenem stanju lahko pri-akujemo tri vrste prileganja, kot to prikazuje **slika 11**.

**Slika 12** prikazuje dogajanje na dotikalni ploskvi za razli-na razmerja med trdotama abrazivnega delca  $H_a$  in dotikalne povr{ine.

Glede na obremenitveno stanje smo predpostavili, da se spreminja koeficient trenja od 0,16 do 0,3. Maksimalni Hertzov tlak smo za predpostavljeno pravokotno obliko dotikalne ploskve izra-unali iz ena-be (2):



**Slika 8:** Krater obrabe na ^lenu elevatorske verige  
**Figure 8:** Wear crater on elevator chain link



Slika 9: Razli-na morfologija obrabe na povr{ini veri' njih -lenov  
Figure 9: Different worn surface morphology on chain links

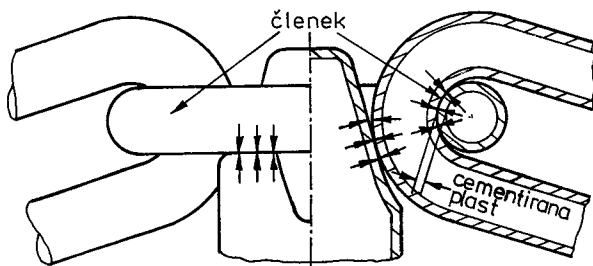
$$P_H \max = 0,59 \sqrt{\frac{F}{l} \cdot F \cdot \frac{D_1 - D_2}{D_1 \cdot D_2}}$$

s predpostavko, da je

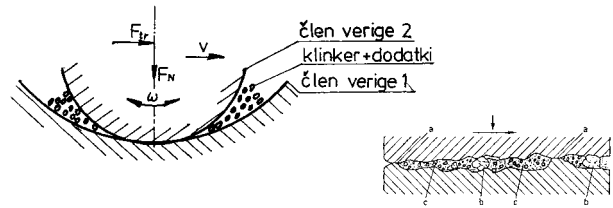
$$E_1 = E_2 : V_1 = V_2 = 0,3$$

$$P_H \max = 0,59 \sqrt{\frac{69000}{9} \cdot 21000 \cdot \frac{6}{36 \cdot 30}} = 1769,6 \text{ N/mm}^2$$

Polovi-ni radij dotikalne ploskve smo izra-unali iz ena-be:



Slika 10: Obremenjena mesta na stiku verige in veri'nega kolesa  
Figure 10: Loaded areas on the contact between chain links and chain wheel



Slika 11: Obraba pri razli-ni vrsti prilaganja na dotikalni ploskvi: a - dotik jeklo (1)/jeklo (2); b - dotik jeklo (1)/abrazivni dele/jeklo (2); c - dotik jeklo (1)/abrazivni delci/jeklo (2)

Figure 11: Wear by different fitting on contact surface (2): a - contact steel - steel; b - contact steel - abrasive particles; c - contact steel - abrasive particles

$$a = 1,08 \sqrt{\frac{F}{1 \cdot E} \cdot \frac{D_1 \cdot D_2}{D_1 \cdot D_2}} = 1,08 \sqrt{\frac{69400}{210 \cdot 9} \cdot \frac{36 \cdot 30}{6}}$$

$$a = 3.272 \text{ mm}$$

Napetosti na dotikalno in pod dotikalno povr{ino v odvisnosti od Hertzovega tlaka, polmera dotikalne ploskve in koeficienta trenja dobimo iz diagramov:

Za  $\mu = 0,1$ :

1. Na dotikalni povr{ini:

$$\sigma_{pr} = 0,38 P_H \max = 0,38 \cdot 1769,6 = 672,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 0,1 P_H \max = 0,1 \cdot 1769,6 = 176,96 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{zy} = 0,1 P_H \max = 0,1 \cdot 1769,6 = 176,96 \text{ N/mm}^2$$

2. Pod dotikalno povr{ino na mestu najve-jjih napetosti:

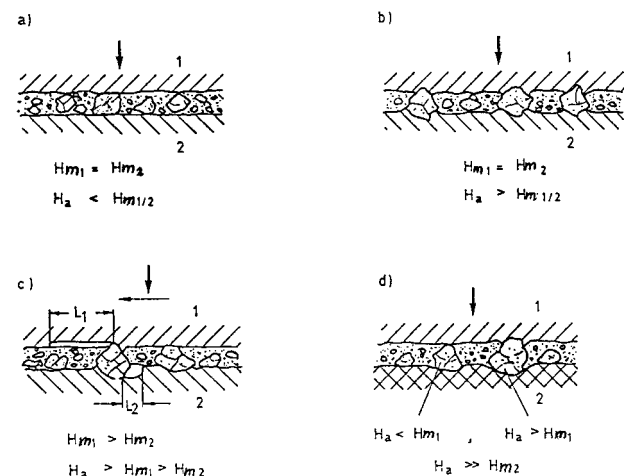
$$z/a = 0,78 \quad z = 0,78 \cdot 3,27 = 2,55 \text{ mm}$$

$$\tau_{pr} \max = 0,56 \cdot P_H \max = 990,98 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau \max = 0,3 P_H \max = 530,9 \text{ N/mm}^2$$

$$z/a = 0,5 \quad z = 0,5 \cdot 3,27 = 1,635 \text{ mm}$$

$$\tau_{xy} \max = 0,3 P_H \max = 530,9 \text{ N/mm}^2$$



Slika 12: Razmere na dotikalni povr{ini za razli-ne trdote dotikalne povr{ine in abrazivnih zrn

Figure 12: Conditions on contact surface by different hardness of steel and abrasive particles

Za  $\mu = 0,3$ :

1. Na dotikalni povr{ini:

$$\sigma_{pr} = 0,63 P_H \max = 1114,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau = 0,3 P_H \max = 530,9 \text{ N/mm}^2$$

2. Pod dotikalno povr{ino na mestu najve-jih napetosti:

$$z/a = 0,5 \quad z = 1,635 \text{ mm}$$

$$\sigma_{pr} \max = 0,63 P_H \max = 1114,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{zy} \max = 0,35 P_H \max = 619,36 \text{ N/mm}^2$$

$$z/a = 0,78 \quad z = 2,55$$

$$\tau \max = 0,3 P_H \max = 530,9 \text{ N/mm}^2$$

#### 4 PRIMERJAVA REZULTATOV

Strukturno so vsi vzorci, ozna-eni z V, podobni. Globino cementirane plasti poka'e diagram trdote. Ta dose'e 707 HV 1 na globini 0,2 mm, 349 HV 1 na globini 2,4 mm in 665 HV 1 na globini 0,06 mm. Na osnovi trdot smo iz tabele od-itali natezno trdnost cementirane plasti in jedra:

$$665 \text{ HV } 1 \quad \sigma_M = 1913 \text{ N/mm}^2$$

$$707 \text{ HV } 1 \quad \sigma_M = 1995 \text{ N/mm}^2$$

$$349 \text{ HV } 1 \quad \sigma_M = 1130 \text{ N/mm}^2$$

Za jedro je poznana tudi dopustna napetost in napetosti, pri kateri nastopi plasti-na deformacija:

Po tabeli za ^.5420 4

$$\sigma_T = 650 - 800 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_M = 900 - 1200 \text{ N/mm}^2$$

Povpre-no razmerje med natezno in plasti-no trdnostjo je:

$$\sigma_M/\sigma_T = 1050/725 = 1,448$$

Predpostavimo, da to razmerje velja tudi za cementirano plast:

$$\sigma_T \text{ cem.pl.} = \sigma_M/1,448$$

$$\sigma_T \text{ 650 HV} = 1321 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_T \text{ 707 HV} = 1377,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_T \text{ 349 HV} = 780 \text{ N/mm}^2$$

Po merilu Tresca nastopi pri izotopnem materialu te-enje, kadar je izpolnjen pogoj:

$$\tau_1 = \sigma_2 - \sigma_3/2 = \sigma_T/2$$

$$\tau_2 = \sigma_3 - \sigma_1/2 = \sigma_T/2$$

$$\tau_3 = \sigma_1 - \sigma_2/2 = \sigma_T/2$$

pri -emer je GT mejna plasti-na napetost pri nateznem preizkusu. Po merilu Tresca se pojavi plasti-na deformacija v cementacijski plasti ali jedru, ko katera koli glavna stri'na napetost prekora-i polovi-no vrednost plasti-ne napetosti.

Iz diagrama za glavne stri'ne napetosti lahko od-itamo za dva koeficienta trenja velikosti glavne stri'ne napetosti in njeno globino:

Za  $\mu = 0,16$  na globini:

$$z = 0,63 \quad a = 0,63 \cdot 3,272 = 2,06 \text{ mm}$$

$$\tau_{1,2,3} = 0,35 P_H \max = 0,35 \cdot 1769,6 = 619,36 \text{ N/mm}^2$$

na globini: od  $z = 0,4$   $a = 1,3$  mm

$$\text{do } z = 0,1 \quad a = 3,272 \text{ mm}$$

$$\tau_{1,2,3} = 0,3 P_H \max = 530,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{na globini: } z = 0,1 \quad a = 0,3272 \text{ mm}$$

$$\tau_{1,2,3} = 0,25 P_H \max = 442,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{na povr{ini: } z = 0$$

$$\tau_{1,2,3} = 0,2 P_H \max = 353,92 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{na globini: } z = 0,5 \quad a = 1,625 \text{ mm}$$

$$\tau_{zy} \max = 0,33 P_H \max = 584 \text{ N/mm}^2$$

Za  $\mu = 0,3$

$$\text{na globini: od } z = 0,5 \quad a = 1,625 \text{ mm}$$

$$\text{do } z = 0,63 \quad a = 2,06 \text{ mm}$$

$$\tau_{1,2,3} \max = 0,35 P_H \max = 619,36 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{na globini: od } z = 0$$

$$\text{do } z = 1,0 \quad a = 3,272 \text{ mm}$$

$$\tau_{1,2,3} = 0,3 P_H \max = 530,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{na globini: } z = 0,5 \quad a = 1,635 \text{ mm, deluje tudi}$$

$$\tau_{zy} \max = 0,35 P_H \max = 619,36 \text{ N/mm}^2$$

Iz teh izra-unov sledi, da je dopustna napetost lahko prekora-ena, -e je izpolnjen naslednji pogoj:

$$1) \sigma_T/2 < 1,2,3$$

$$2) \sigma_T/2 < \tau_{zy}$$

$$\sigma_T \text{ 665/2} = 1321/2 = 660,5 \text{ N/mm}^2; \text{ za } z = 0,06 \text{ mm}$$

$$\sigma_T \text{ 707/2} = 1377,8/2 = 688,9 \text{ N/mm}^2; \text{ za } z = 0,2 \text{ mm}$$

$$\sigma_T \text{ 349/2} = 780/2 = 390 \text{ N/mm}^2; \text{ za } z = 2,4 \text{ mm}$$

Za  $\mu = 0,16$

$$\tau_{1,2,3} = 619,36 \text{ N/mm}^2 > \sigma_T/2 \text{ za } z = 2,06 \text{ mm}$$

$$\tau_{zy} \max = 584 \text{ N/mm}^2 > \sigma_T/2 \text{ za } z = 1,625 \text{ mm}$$

Za  $\mu = 0,3$

$$\tau_{1,2,3} = 619,36 \text{ N/mm}^2 > \sigma_T/2 \text{ za } z = 1,625 \text{ mm} - 2,06$$

$$\tau_{zy} = 619,36 \text{ N/mm}^2 > \sigma_T/2 \text{ za } z = 1,625 \text{ mm}$$

Primerjava med napetostmi za  $\mu = 0,16$  in  $\mu = 0,3$  in mikrostrukturne analize verig V 1  $\phi$  30 x 120 je pokazala, da se je cementacijska plast odlu{-ila vedno na meji z jedrom.

Mikroskopska preiskava verige R je pokazala, da se cementacijska plast ne odlu{-i na mejni plasti, ampak se najprej obrablja in nato odlu{-i, ko se je dovolj stanj{ala. Na odlu{-enem mestu se material plasti-no deformira in hladno utrjuje.

Sicer pa so obrabljene povr{ine enake na vzorcih V in R. V obeh primerih je opazna obraba zaradi abrazivnega sredstva, obraba, ki nastane pri dotiku ^/^ in tista, ki je zna-ilna za nihajo-e gibanje pri abrazivnem sredstvu in eroziji.

#### 5 SKLEP

Na obrabni povr{ini in na prereznih ravninah za simetri-no obremenitev in za kot zasuka  $\phi/2$  smo pri obeh vzorcih verig V in R na{li naslednje mehanizme obrabe:

1) Na mestih, kjer se dotikata kovinski povr{ini enega in drugega -lena brez abrazivnega sredstva se pojavlja

adhezija in utrujanje povr{ine. Le-to se pojavlja na povr{ini in na mestih najve-jih napetosti pod povr{ino. Utrujenje pospe{uje koeficient trenja, ki se pove-a zaradi hrapavosti povr{ine, ki jo povzro-ata adhezijska in abrazijska obraba. Z utrujanjem nastajajo na {ibkih mestih na povr{ini in pod njo razpoke, ki postopoma zrastejo do povr{ine, nato pa se odlu{-i cementacijska plast.

- 2) Abrazivni delci, ki imajo trdoto  $H_a = 450-580$  HV se ne zadirajo v cementacijsko plast, ker ima ve-jo trdoto  $H_m = 665-750$  HV. Zato se pod obremenitvijo tarejo med dotikalno povr{ino enega in drugega -lena verige. Ker se dotikalna povr{ina isto-asno medsebojno premika za kot  $\phi/2$ , abrazivni delci odna{ajo z dotikalne povr{ine material in s -asom zmanj{ujejo debelino cementacijske plasti. ^e je na dotikalni povr{ini tudi tr{i abrazivni delec kot povr{ina, se v

povr{ino vdre in pri relativnem zamiku povzro-i globoko razo na eni ali drugi dotikalni povr{ini.

- 3) V neobremenjeni veji elevatorja -lena medsebojno nihata z dolo-eno frekvenco. Zato so na obrabni povr{ini opazne majhne raze, ki jih napravijo abrazivni delci, ki se med obema dotikalnima povr{inama premikajo z zelo majhno amplitudo. Ta proces povzro-a tudi erozijsko obrabo, -e je prisotna vlaga. Posebno velik vpliv ima ta proces na utrujanje povr{ine in na spremembo njene hrapavosti.

## 6 LITERATURA

<sup>1</sup> H. Uetz: Abrasion und Erosion, Carl Hanser Verlag, 1986

<sup>2</sup> J. Vi'intin: Annual Report for the Second Year, NBS, 1987

<sup>3</sup> J. Vi'intin in sodelavci: Poro-ilo o raziskavi obrabe na -lenih, 1988