

Primerjalno preizkušanje obrabne obstojnosti orodnih jekel

Comparative Testing of Resistance to Wear of Tool Steels

J. Vižintin, E. Tomšič, *Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za tribologijo, Ljubljana*

F. Uranc, F. Grešovnik, J. Šegel, *Metal Ravne d.o.o., Ravne na Koroškem*

Opis simulacije obremenitvenega kolektiva pri valjanju, način izbire modelov in postopek preizkušanja za raziskavo obrabe. Obrabna obstojnost orodnih in hitroreznih jekel, ki se uporabljajo za delovne valje, smo izmerili v paru z materialoma valjancev OC 100ex. in Prokron 12sp.. Koeficiente trenja, obrabo in poškodbe kontaktnih površin smo vrednotili v odvisnosti od časa.

Ključne besede: primerjalno preizkušanje, hladno valjanje, obraba orodnih in hitroreznih jekel, koeficient trenja

The simulation of contact stresses at metal rolling process, the choice of test models for wear analysis and process of testing are described. Resistance to wear of tool steels for working rolls was measured in contact with strip from steel OC 100ex. and Prokron 12sp.. Friction coefficient, wear rate and damages of contact surfaces were determined in function of test time.

Key words: comparative testing, cold rolling, wear of tool and high speed steels, friction coefficient

1 Uvod

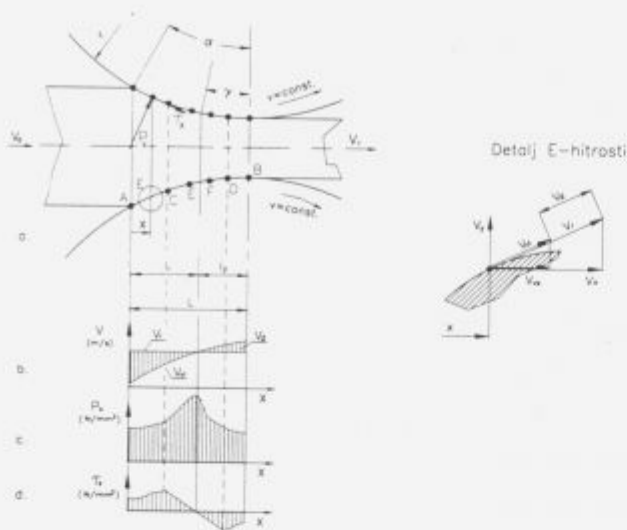
Železarna Ravne izdeluje valje za valjarniške stroje iz orodnih in hitroreznih jekel. Obrabna obstojnost valjev je pomemben parameter pri procesu valjanja. Kot obrabno obstojnost razumemo poleg odpornosti valjev proti obrabi tudi odpornost proti lepljenju valjanca, nastanku razpok, luščenju površin, itd.. Na obrabno obstojnost valjev vplivamo s pravilno izbiro materiala, termično in mehansko obdelavo, mazanjem in hlajenjem valjev. Obrabno obstojnost orodnih in hitroreznih jekel, ki se uporabljajo za valje, bi lahko določili na procesu valjanja, toda stroški preizkušanja bi bili v tem primeru visoki. Zaradi cenenosti in enostavnosti preizkušanja uporabljajo raziskovalci za določitev obrabne obstojnosti materialov za valje primerjalno preizkušanje na modelnih preizkuševališčih.

Sven-Erik Lundberg¹ je raziskoval obrabo delovnega valja izdelanega iz orodnega jekla za delo v vročem pri vročem valjanju nerjavnega in konstrukcijskega jekla. Za raziskavo je skonstruiral modelni sistem, ki je simuliral kinematiko in obremenitve pri vročem valjanju. V Japonski jeklarni Katsuta², ki izdeluje valje Sendzimir in njihove nadomestne dele v sodelovanju z združenjem T. Sendzimir, so razvili interno testno metodo za kontrolo obrabne obstojnosti orodnih in hitroreznih jekel, ki jih

uprabljajo za Sendzimir valje. Obrabno obstojnost merijo na modelu čistega drsenja (Pin on disc) in modelu čistega izmeničnega drsenja.

B. M. Shukla, P. C. Nautiyal, V. R. K. Sastry³ so raziskovali obrabne procese kontaktnih površin pri plastični deformaciji. Preizkuse so izvedli na Amslerjevem kotalnem merilniku trenja in obrabe tip A135. Preizkušane iz kaljenega jekla je simuliral orodje, medtem ko je preizkušane iz mehkega jekla simuliral obdelovanec. Obremenitev med preizkušancema je bila takšna, da se je kontaktna površina na preizkušancu iz mehkega jekla plastično deformirala. Določali so obrabo preizkušancev, trenje in obrabne mehanizme pri mazanju z mineralnimi in rastlinskimi olji.

V tem prispevku so prikazani rezultati raziskave obrabne obstojnosti orodnih in hitroreznih jekel, ki se uporabljajo za delovne valje pri hladnem valjanju. Raziskavo obrabne obstojnosti smo izvedli tako, da smo na modelu valjanja, modelu čistega izmeničnega drsenja in modelu čistega drsenja simulirali obremenitveni kolektiv (drsnost hitrosti in tlačne napetosti) med delovnim valjem in valjancem. Obrabno obstojnost hitroreznih in orodnih jekel smo izmerili v paru z materialoma valjancev OC 100ex. in Prokron 12sp.. Po preizkusih smo obrabljene površine analizirali na optičnem mikroskopu in drugih analiznih aparatih.



Slika 1. Model procesa hladnega valjanja V_{sl} -drсна hitrost (m/s) V_r -obodna hitrost valja (m/s), V_{vl} -hitrost valjanca (m/s), V_{vo} -vstopna hitrost valjanca (m/s), V_{vi} -izstopna hitrost valjanca (m/s), P_x -tlačna napetost (N/mm²), t_x -strižna napetost (N/mm²).

Figure 1. Model of cold rolling V_{sl} -slip speed (m/s), V_r -tangencial speed of roll (m/s), V_{vl} -strip speed (m/s), V_{vo} -strip speed of the entry (m/s), V_{vi} -strip speed of the exit (m/s), P_x -normal stress (N/mm²), t_x -shear stress (N/mm²).

2 Obremenitveni kolektiv pri valjanju

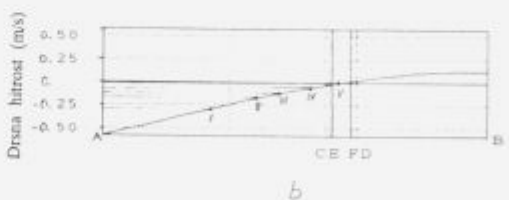
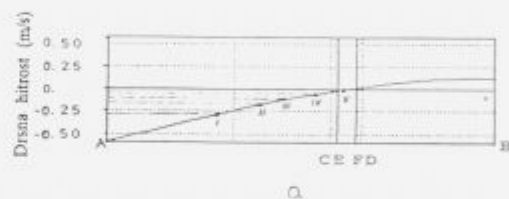
Na osnovi teorije za analizo kinematičnega in napetostnega stanja pri valjanju, ki je opisana v 4, 5 in 6 smo izdelali model procesa hladnega valjanja, ki je prikazan na **sliki 1**.

Delovni valj in valjanec se pri valjanju dotikata na dotikalni ploskvi dolžine AB. Kontakt med delovnim valjem in valjancem AB smo poimenovali deformacijska cona, ki je prikazana na **sliki 1a**. Deformacijska cona AB, v kateri se valjanec plastično deformira, je razdeljena na drsni coni AC in DB ter adhezijsko cono CD. Adhezijska cona CD se v našem primeru deli na notranje adhezijsko območje EF in zunanje adhezijsko območje CE in FD. Velikost teh območij je odvisna od vrste valjanja⁴. Diagrami na **sliki 1b, c in d** prikazujejo drsno hitrost ter tlačno in strižno napetost v deformacijski coni pri hladnem valjanju pločevine.

V drsni coni AC je hitrost valjanca V_{vl} manjša od obodne hitrosti delovnega valja V_r . V drsni coni DB pa je hitrost valjanca večja od obodne hitrosti delovnega valja. Razlika med obodno hitrostjo delovnega valja V_r in hitrostjo valjanca V_{vl} je drsna hitrost med delovnim valjem in valjancem. V adhezijski coni CD spremeni smer delovanja drsna hitrost (**slika 1b**) in strižna napetost (**slika 1d**), tlačna napetost pa doseže maksimalno vrednost (**slika 1c**).

Na osnovi teorije, ki je opisana v literaturi 4, 5 in 6 in modela, ki je prikazan na **sliki 1**, smo izdelali računalniški program za izračun obremenitvenega kolektiva v deformacijski coni pri hladnem valjanju pločevine. S programom

smo izračunali obremenitveni kolektiv, za premer valja 120mm, vstopno debelino pločevine 0.55mm, izstopno debelino pločevine 0.4mm, hitrostjo valjanja 2.5m/s in koeficient trenja 0.1. Material valjanca (pločevine) je bil OC 100ex. in Prokron 12sp. Podatke za izračun smo dobili v Železarni Ravne in Železarni Jesenice. Izračunane vrednosti za obremenitveni kolektiv v deformacijski coni AB, ki smo jih dobili pri simulaciji valjanja pločevine iz OC 100ex. in Prokrona 12sp., so prikazane na **sliki 2a, b**.

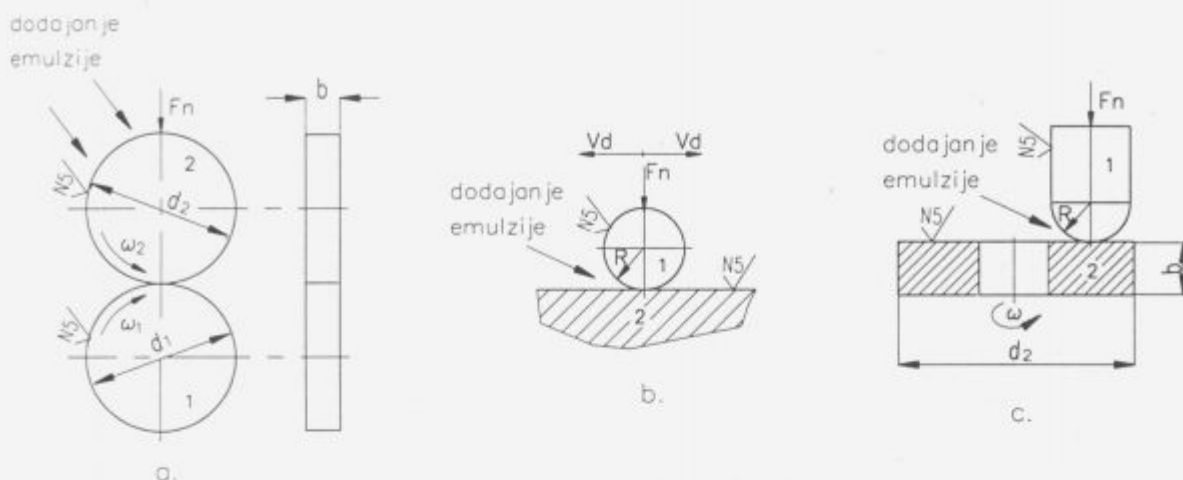


Slika 2. Izračunane vrednosti za obremenitveni kolektiv: vstopna debelina pločevine 0.55mm, izstopna debelina pločevine 0.4mm, hitrost valjanja 2.5m/s, koeficient trenja 0.1

- a. Material valjanca OC 100ex. Drsna hitrost I=0.3m/s, II=0.15m/s, III=0.1m/s, IV=0.06m/s, V=0.01m/s.
- b. Material valjanca Prokron 12sp. Drsna hitrost I=0.3m/s, II=0.15m/s, III=0.1m/s, IV=0.06m/s, V=0.01m/s.

Figure 2. Calculated normal stresses and slip speed at cold rolling: thickness of strip before rolling 0.55mm, thickness of strip after rolling 0.4mm, speed of rolling 2.5m/s, friction coefficient 0.1.

- a. Strip from steel OC 100ex. Slip speed I=0.3m/s, II=0.15m/s, III=0.1m/s, IV=0.06m/s, V=0.01m/s.
- b. Strip from steel Prokron 12sp. Slip speed I=0.3m/s, II=0.15m/s, III=0.1m/s, IV=0.06m/s, V=0.01m/s.



Slika 3. Izbrani modeli za preizkušanje: a. Model valjanja, $d_1=d_2=40\text{mm}$, $b=10\text{mm}$ b. Model čistega izmeničnega drsenja, $R=3\text{mm}$. c. Model čistega drsenja, $R=3\text{mm}$, $d_2=40\text{mm}$, $b=10\text{mm}$.

Figure 3. Selected testing models: a. Rolling model (Amsler tester), $d_1=d_2=40\text{mm}$, $b=10\text{mm}$ b. Oscillating model, $R=3\text{mm}$. c. Sliding model (Pin on disc), $R=3\text{mm}$, $d_2=40\text{mm}$, $b=10\text{mm}$.

3 Izbira modelov in modelnih preizkuševališč

Slika 3a, b in c prikazuje izbrane modele za preizkušanje, na katerih smo simulirali obremenitveni kolektiv na dotikalni ploskvi med delovnim valjem in valjancem pri hladnem valjanju pločevine.

Z modelom valjanja smo popisali kontakt valja s pločvino v deformacijski coni AB, kjer nastopa kombinacija kotaljenja in drsenja delovnega valja po valjancu. Z valjem 1 smo simulirali delovni valj, ki je bil izdelan iz orodnega jekla, medtem ko smo z valjem 2 simulirali valjanec, ki smo ga izdelali iz materiala valjanca. Dršno hitrost v deformacijski coni AB smo dosegli z različno obodno hitrostjo valja 1 in 2. Preizkušanje po modelu valjanja smo opravili na kotalnem merilniku trenja in obrabe.

Za popis stanja v adhezijski coni CD smo izbrali model čistega izmeničnega drsenja. Spremembo smeri delovanja drsne hitrosti in strižne napetosti v coni CD smo dosegli z izmeničnim drsenjem valjčka 1 po mirujoči ploščici 2. Valjček, ki je simuliral delovni valj je bil izdelan iz orodnega jekla, ploščica pa je predstavljala valjanec in je bila izdelana iz materiala valjanca. Preizkušanje po modelu čistega izmeničnega drsenja smo izvedli na frekvenčnem merilniku trenja in obrabe.

Model čistega drsenja smo izbrali za simulacijo čistega drsenja v deformacijski coni AB. Čisto drsenje v kontaktu smo dosegli z vrtenjem valja 1 po mirujočem valjčku 2. Valj je simuliral valjanec, medtem ko je valjček simuliral delovni valj iz orodnega jekla. Kontaktno površino valjčka smo izdelali v obliki polkrogle. Preizkušanje po modelu čistega drsenja smo opravili na merilniku valjček-valj.

Na vseh izbranih modelih za preizkušanje je bila velikost pritiskne sile takšna, da je bil maksimalni tlak v kontaktu med preizkušancema enak povprečnemu tlaku v deformacijski coni AB, slika 2. Na modelu čistega izmeničnega drsenja smo morali za doseg željene tlačne napetosti v kontaktu med preizkušancema zožati širino kontakta, ki je bila običajno pri takih preizkusih 16mm. Pri materialu valjanca iz OC 100ex. je bila v našem primeru širina kontakta 4mm, pri materialu valjanca Prokron 12sp. pa 8mm. Z modelom valjanja smo simulirali dršno hitrost, ki smo jo odbrali v točki I in IV (slika 2). Točka I je predstavljala največjo dršno hitrost, točka IV pa najmanjšo dršno hitrost, ki smo jo lahko simulirali s tem modelom. Z modelom čistega izmeničnega drsenja smo simulirali dršno hitrost v točki V, ki leži znotraj adhezijske cone CD. Da bi ugotovili vpliv izmenične drsne hitrosti na obrabo smo izbrali za simulacijo na tem modelu tudi točko II, slika 2. Na modelu čistega drsenja smo simulirali dršno hitrost, ki smo jo odbrali v točki I in III. Točko I smo izbrali zato, da smo lahko primerjali rezultate, ki smo jih dobili s preizkusom na tem modelu z rezultati, ki smo jih dobili na modelu valjanja.

Pri hladnem valjanju pločevin je delovni proces valjanja hlajen s hladilno mazalno emulzijo, zato smo tudi naše modelne preizkuse hladili s 5% hladilno-mazalno emulzijo, ki jo uporabljajo pri hladnem valjanju v valjarni na Jesenicah. Hladilno mazalno emulzijo smo v kontakt na modelnih preizkuševališčih dovajali tako kot je prikazano na sliki 3.

4 Materiali in opis preizkušanja

V tabeli 1 so prikazani vsi materiali za delovne valje, materiali valjanca in obremenitveni kolektivi, pri katerih smo izvedli preizkušanje na modelu valjanja, modelu čistega izmeničnega drsenja in modelu čistega drsenja. Za vsako

Tabela 1: Izvedeni preizkusi na modelnih preizkuševališčih.**Table 1:** Realized tests on testing models.

Mat. valjanca	OC 100 exp.				Prokron 12 Sp			
Pogoji pre- izkušanja Mat. za delovni valj	Drсна hitrost (m/s)				Drсна hitrost (m/s)			
	0.15, 0.3		0.01, 0.1		0.15, 0.3		0.01, 0.1	
	Temperatura preizkušanja (°C)				Temperatura preizkušanja (°C)			
	20	90	20	90	20	90	20	90
BRM1		X		X		X		X
BRM2	X	X	X	X	X	X	X	X
BR885		X		X		X		X
OSV1	X	X	X	X	X	X	X	X
UTOP Mo5	X	X	X	X	X	X	X	X
UTOP Mo6	X	X	X	X	X	X	X	X
OCR 12vms		X		X		X		X

preizkušano jeklo smo pri določenem obremenitvenem kolektivu izvedli tri preizkuse.

Delovne valje v Železarni Ravne najprej mehansko obdelajo, nato pa sledi toplotna obdelava. Po toplotni obdelavi delovne valje še brusijo. Valji in valjčki iz orodnih in hitroreznih jekel, ki smo jih preizkušali, so bili po mehanski obdelavi kaljeni v vakumski peči pri zaščitni atmosferi dušika ter nato še popuščani na zraku. Preizkušanci iz materiala valjanca so bili mehansko obdelani in žarjeni. Preizkušancem iz materiala orodnega in hitroreznega jekla smo najprej izmerili mikrotvrdo in hrapavost kontaktne površine. Za preizkus na modelu valjanja smo preizkušance iz orodnih in hitroreznih jekel pred preizkusom še tehtali. Med preizkusom smo zapisovali koeficient trenja. Časovno odvisnost obrabe in poškodbe kontaktne površine smo določili tako, da smo preizkus prekinjali in sicer pri 2000, 10000 ter pri 20000 ciklih. Za preizkuse smo skonstruirali vpenjalno pripravo, ki je omogočila izpenjanje preizkusnega para iz preizkuševališča, določitev količine obrabljenega materiala in nato nastavitve preizkuševalnega para na isto pozicijo, ki jo je par imel pred prekinitvijo preizkusa. Količino obrabe preizkušancev za model valjanja smo določili s tehtanjem, za ostala dva modela pa smo z optičnim mikroskopom izmerili širino obrabnih kalot na valjčkih. Iz količine obrabljenega materiala ter širine obrabnih kalot smo nato izračunali volumen obrabljenega materiala za preizkušance iz orodnih in hitroreznih jekel. Poškodbe kontaktnih površin na valjih in valjčkih smo analizirali in poslikali z optičnim mikroskopom. Pri 20000 ciklih, smo poleg določitve količine obrabe izmerili še hrapavost in mikrotvrdo obrabljenih površin valjev in valjčkov, ki so simulirali delovni valj.

5 Opis rezultatov

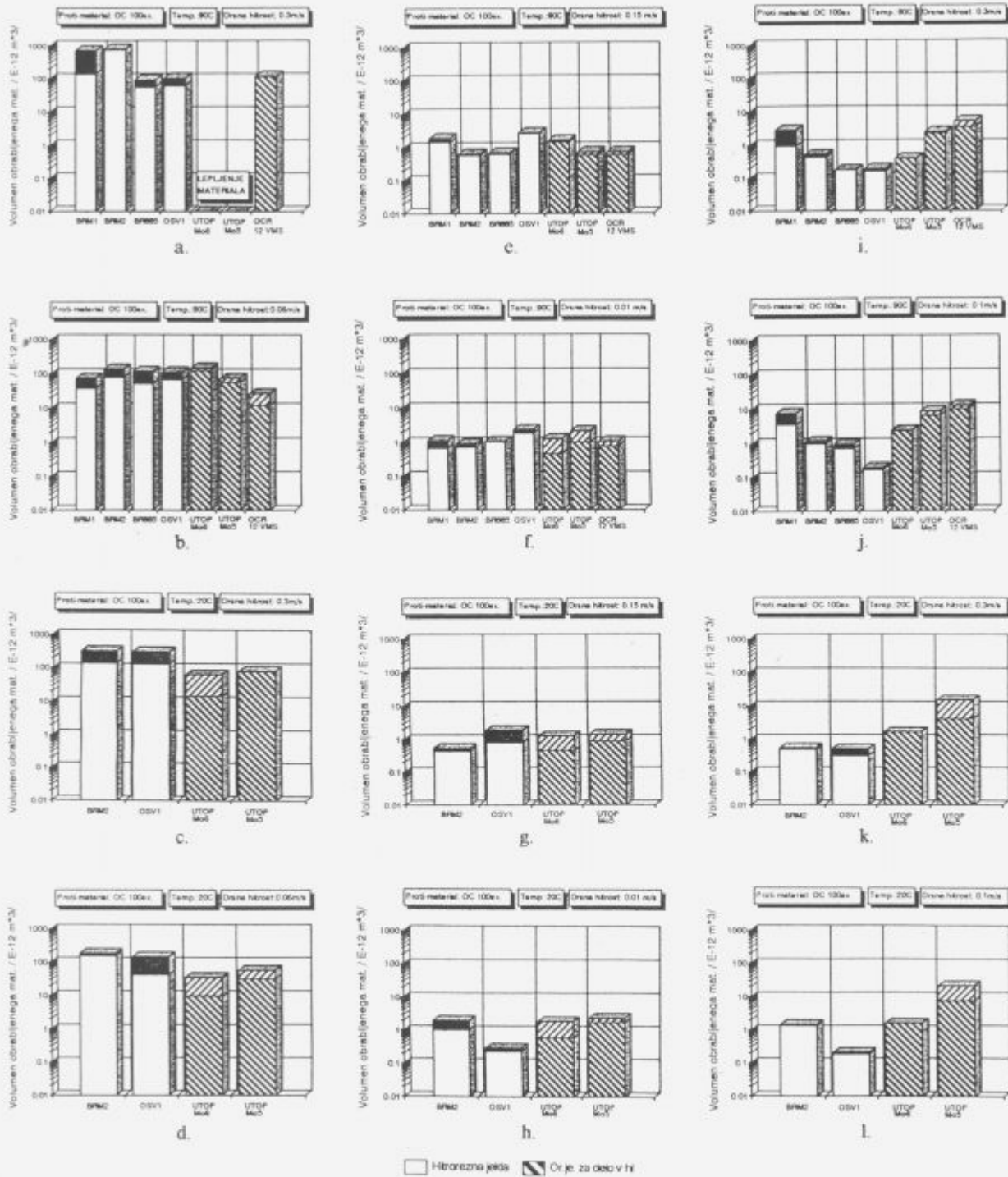
Slika 4 prikazuje volumen obrabljenega materiala v m³ pri 20000 ciklih za orodna in hitrorezna jekla v paru z mate-

rialom valjanca OC 100ex.

Na slikah **4a, b, c in d** je prikazan volumen obrabljenega materiala za različne obremenitvene kolektive pri preizkušanju na modelu valjanja. Največji volumen obrabljenega materiala smo na modelu valjanja izmerili za hitrorezno jeklo BRM1 in BRM2 pri drsni hitrosti 0.3 m/s in temperaturi preizkušanja 90°C, slika **4a**. Pri ostalih hitroreznih jeklih smo ugotovili, da drsna hitrost in temperatura preizkušanja nimata posebnega vpliva na volumen obrabljenega materiala (**slika 4a, b, c in d**). Pri jeklu Utop Mo5 in Utop Mo6 se je pri temperaturi preizkušanja 90°C in drsni hitrosti 0.3 m/s pojavilo lepljenje materiala valjanca (**slika 4a**). Za ostale drsne hitrosti in temperature smo ugotovili, da nimajo vpliva na volumen obrabljenega materiala pri orodnih jeklih. **Sliki 4c in d** nam prikazata, da je volumen obrabljenega materiala pri temperaturi preizkušanja 20°C za hitrorezna jekla večji kot za orodna jekla.

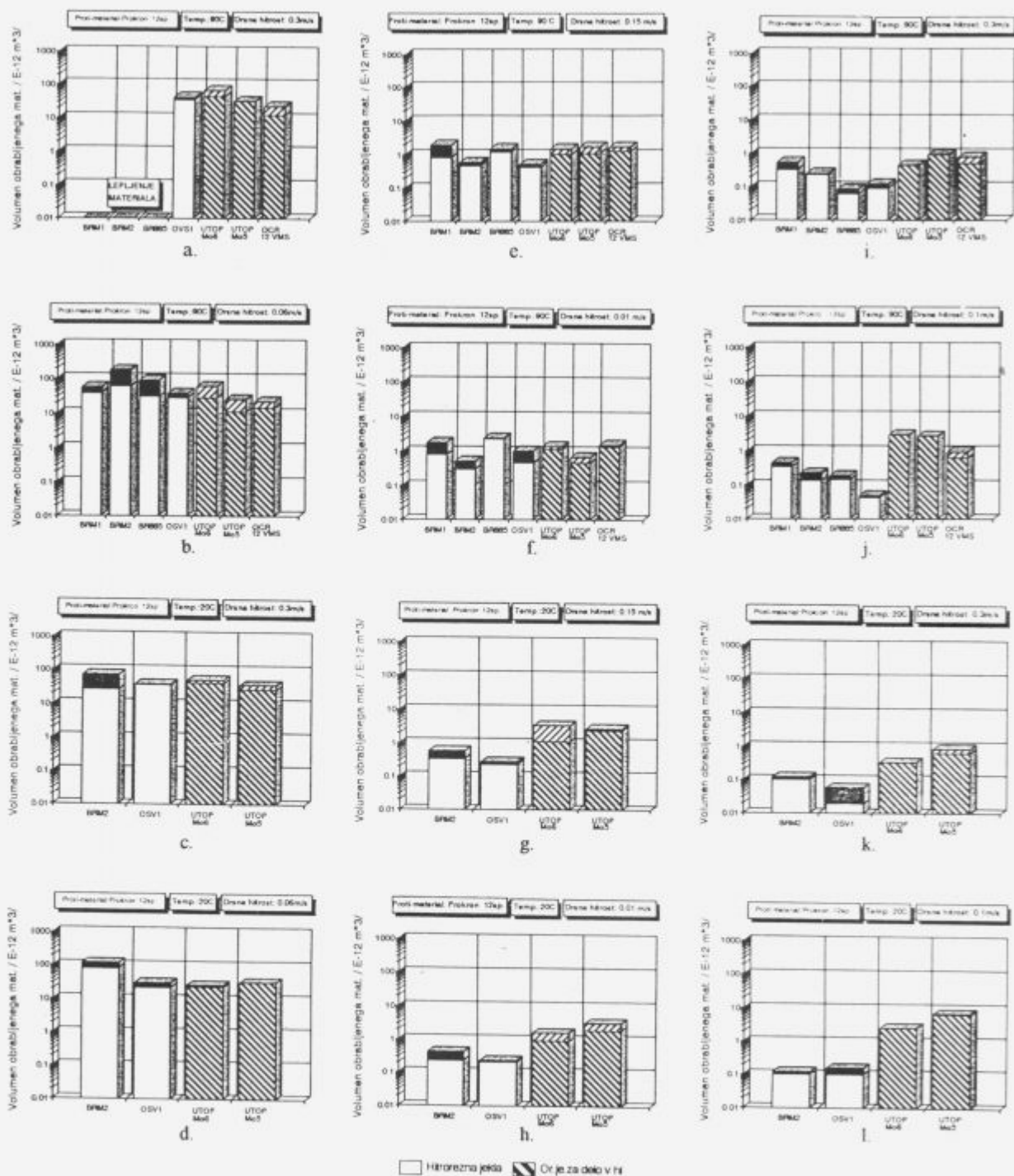
Pri preizkušanju na modelu čistega izmeničnega drsenja je bil volumen obrabljenega materiala za orodna in hitrorezna jekla pri vseh obremenitvenih kolektivih zelo podoben (**slika 4e, f, g in h**).

Slike 4i, j, k in l nam prikazujejo volumen obrabljenega materiala za orodna in hitrorezna jekla, ki smo ga izmerili na modelu čistega drsenja pri različnih obremenitvenih kolektivih. Pri vseh obremenitvenih kolektivih se je volumen obrabljenega materiala zmanjševal od hitroreznega jekla BRM1 proti OSV1 in nato naraščal od orodnega jekla Utop Mo6 do orodnega jekla OCR 12vms. Najmanjši volumen obrabljenega materiala smo izmerili za hitrorezno jeklo OSV1, največjega pa za orodno jeklo OCR 12vms. Pri manjši drsni hitrosti smo izmerili večji volumen obrabljenega materiala, kot pri večji drsni hitrosti. Temperatura preizkušanja ni posebno vplivala na volumen obrabljenega materiala.



Slika 4. Volumen obrabljenega materiala za orodna in hitronzna jekla pri materialu valjanca OC 100ex. in 20000 ciklov a+d. Model valjanja, e+h. Model čistega izmeničnega drsenja, i+l. Model čistega drsenja.

Figure 4. Wear volume of material of the tool and high speed steels at strip from OC 100ex. and 20000 cycles. a+d. Rolling model, e+h. Oscilating model, i+l. Sliding model(Pin on disc).



Slika 5. Volumen obrabljenega materiala za orodna in hitroreznna jekla pri materialu valjanca Prokron 12sp. in 20000 ciklih. a+d. Model valjanja, e+h. Model čistega izmeničnega drsenja, i+l. Model čistega drsenja.

Figure 5. Wear volume of material of the tool and high speed steels at strip from Prokron 12sp. and 20000 cycles. a+d. Rolling model, Oscilating model, i+l. Sliding model (Pin on disc).

Slika 5 prikazuje volumen obrabljenega materiala v m^3 pri 20000 ciklih za orodna in hitorezna jekla v paru z materialom valjanca Prokron 12sp..

Na slikah 5a, b, c in d je prikazan volumen obrabljenega materiala za različne obremenitvene kolektive pri preizkušanju na modelu valjanja. Pri drsni hitrosti 0.3m/s in temperaturi preizkušanja 90°C se je pojavilo lepljenje materiala valjanca iz Prokron 12sp., na hitorezna jekla BRM1, BRM2 in BR885 (slika 5a). Pri istih pogojih smo za hitorezno jeklo OSV1 in vsa orodna jekla izmerili podoben volumen obrabljenega materiala. Pri ostalih obremenitvenih kolektivih je bil za orodna in hitorezna jekla podoben volumen obrabljenega materiala razen za hitorezno jeklo BRM2 (slika 5b, c in d).

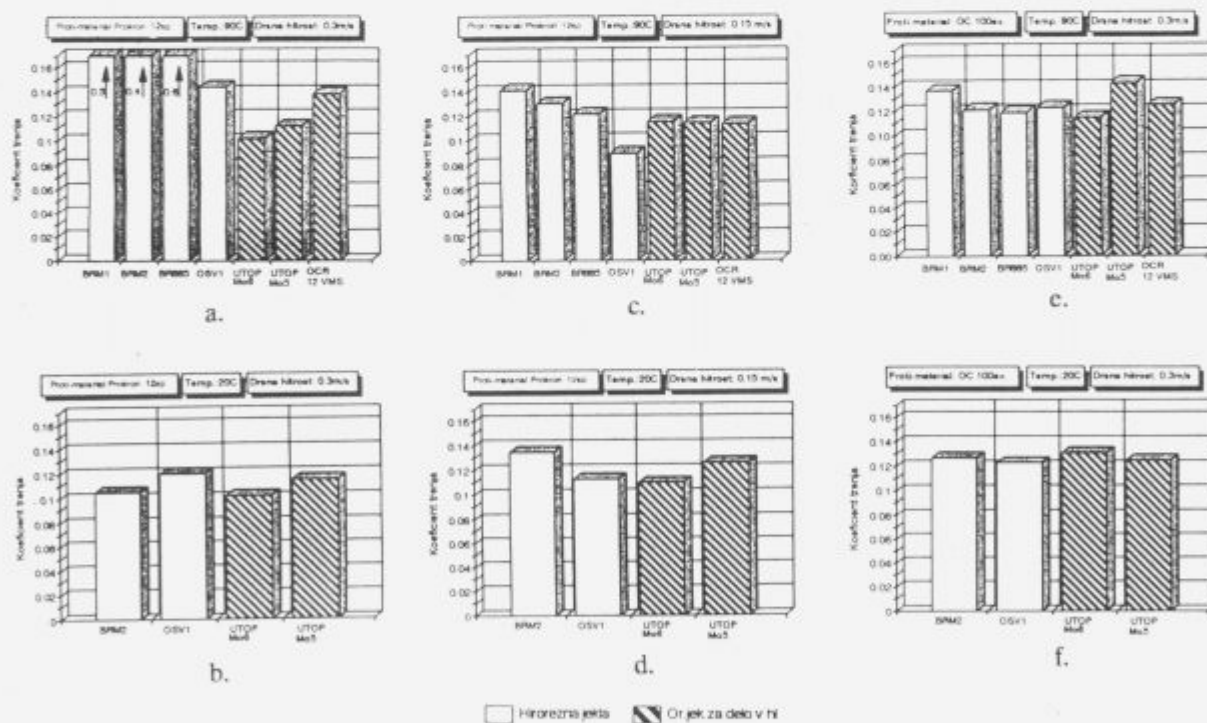
Pri preizkušanju z modelom čistega izmeničnega drsenja smo za vse obremenitvene kolektive izmerili najmanjši volumen obrabljenega materiala za hitorezni jekli BRM2 in OSV1 (slika 5e, f, g in h). Ostala hitorezna jekla in tudi vsa orodna jekla imajo večji volumen obrabljenega materiala.

Slike 5i, j, k in l prikazujejo volumen obrabljenega materiala, ki smo ga izmerili na modelu čistega drsenja. Pri vseh obremenitvenih kolektivih smo izmerili pri hitoreznih jeklih manjši volumen obrabljenega materiala kot pri orodnih jeklih.

Slika 6 prikazuje povprečni koeficient trenja za nekatere obremenitvene kolektive. Pri temperaturi preizkušanja 90°C se je koeficient trenja pri vseh modelih spreminjal od 0.1 do 0.15. Pri temperaturi preizkušanja 20°C pa se je koeficient trenja spreminjal od 0.1 do 0.12 za vse modele. Za preizkusne pare, pri katerih smo ugotovili lepljenje materiala valjanca na valj (Slika 4a in 5a) je koeficient trenja narasel do vrednosti 0.6 (slika 6a).

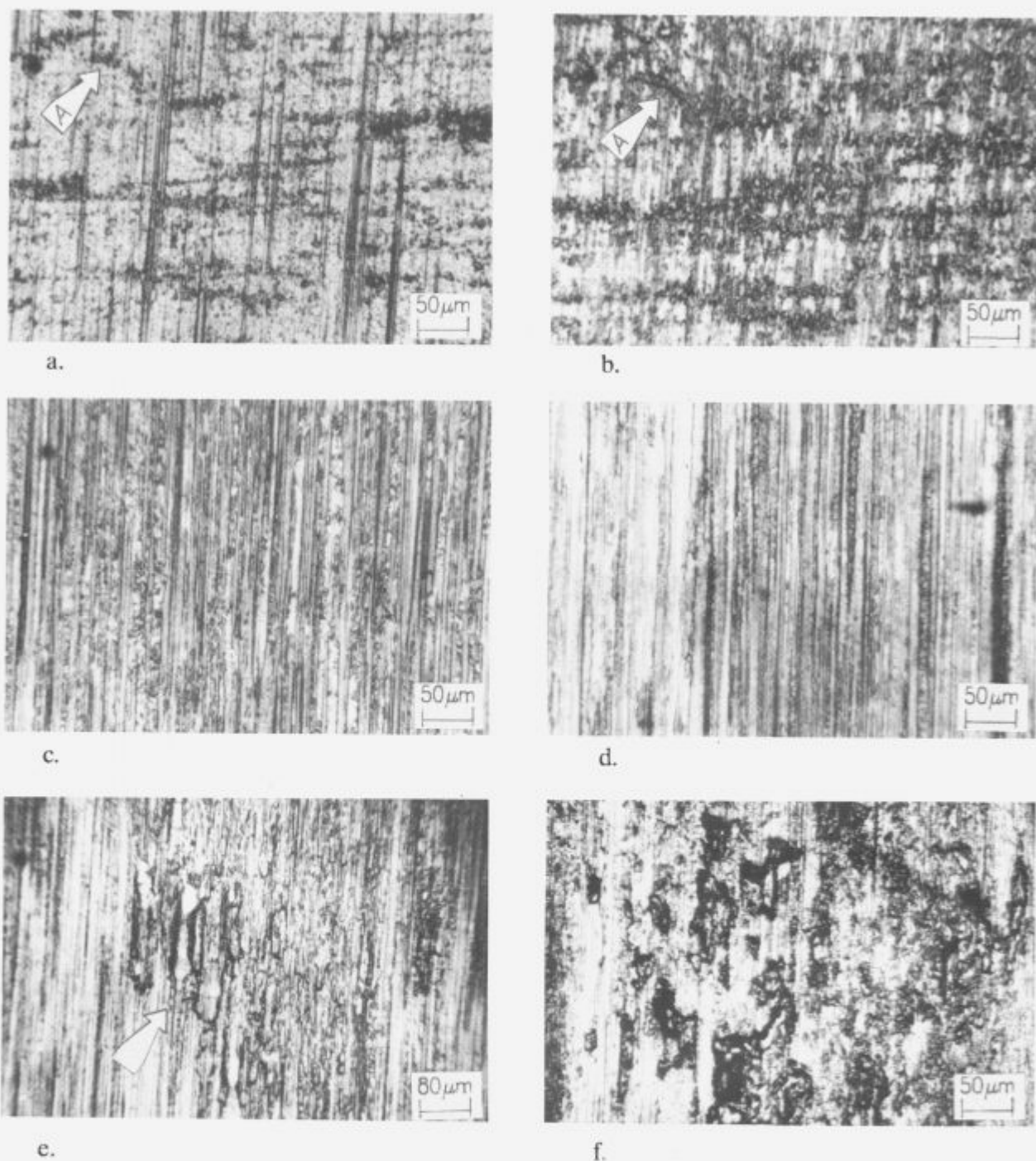
6 Diskusija

Slika 7 prikazuje poškodbe kontaktnih površin valjev iz hitoreznega jekla BRM2 in orodnega jekla Utop Mo5, ki smo jih preizkušali na modelu valjanja. Na sliki 7a, b je prikazan delček kontaktne površine valja iz hitoreznega



Slika 6. Koeficienti trenja a+b. Model valjanja, c+d. Model čistega izmeničnega drsenja, e+f. Model čistega drsenja.

Figure 6. Friction coefficient a+b. Rolling model, c+d. Oscilating model, e+f. Sliding model(Pin on disc).



Slika 7. Poškodbe kontaktnih površin valjev, ki smo jih preizkušali na modelu valjanja. **a.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca OC 100ex., po 2000 ciklih, **b.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca OC 100ex., po 20000 ciklih, **c.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca OC 100ex., po 20000 ciklih, **d.** Utop Mo5, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca OC 100ex., po 20000 ciklih, **e.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca Prokron 12sp., po 2000 ciklih, **f.** Utop Mo5, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca OC 100ex., po 20000 ciklih.

Figure 7. Damages of contact surfaces of rolls at testing by rolling model. **a.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel OC 100ex., after 2000 cycles, **b.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel OC 100ex., after 20000 cycles, **c.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel OC 100ex., after 20000 cycles, **d.** Utop Mo5, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel OC 100ex., after 20000 cycles, **e.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel Prokron 12sp., after 2000 cycles, **f.** Utop Mo5, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel OC 100ex., after 20000 cycles.

jekla BRM2, za katerega smo na modelu valjanja izmerili največji volumen obrabljenega materiala pri temperaturi preizkušanja 90°C, drsni hitrosti 0.3m/s in materialu valjanca OC 100ex. (slika 4a). Slika 7a prikazuje izgled kontaktne površine pri 2000 ciklih, slika 7b pa izgled iste kontaktne površine pri 20000 ciklih. Iz primerjave obeh slik vidimo, da se je kontaktna površina sčasom preizkusa obrabljala. Raze od mehanske obdelave so na sliki 7b manj vidne, kot pa na sliki 7a. Po opravljenih 20000 ciklih se je površina črno obarvanih površin močno povečala. Puščica A na sliki 7a in b nam prikazuje primer povečanja črno obarvane površine. Menimo, da so črno obarvane površine posledica adhezije in povišane kontaktne temperature. Pri ostalih drsnih hitrostih in temperaturah so bile poškodbe kontaktne površine manj izrazite. Slika 7c prikazuje kontaktno površino hitroreznega jekla BRM2 pri temperaturi preizkušanja 20°C in drsni hitrosti 0.3m/s. Po izgledu površine ocenjujemo, da se je poleg abrazije pojavila tudi adhezija, ki pa sta imeli manjši učinek kot v prejšnjem primeru, saj je bil volumen obrabljenega materiala hitroreznega jekla BRM2 bistveno manjši (slika 4c).

Na sliki 7d je prikazana kontaktna površina valja iz orodnega jekla Utop Mo5 pri temperaturi preizkušanja 20°C in drsni hitrosti 0.3m/s. Iz primerjave slik 7c in 7d vidimo, da je mehanizem obrabe kontaktne površine orodnega jekla Utop Mo5 podoben, vendar manj izrazit kot pri hitroreznem jeklu BRM2.

Pri preizkušanju orodnega jekla BRM2 v paru z materialom valjanca Prokron 12sp., temperaturi 90°C in drsni hitrosti 0.3m/s se je pojavilo lepljenje (slika 5a). Puščica na sliki 7e prikazuje mesto lepljenja materiala med valjancem iz Prokron 12sp. in valjem iz BRM2 po opravljenih 2000 ciklih. Pri isti drsni hitrosti in temperaturi preizkušanja, vendar pri materialu valjanca OC 100ex., pa se je pojavilo lepljenje materiala med valjancem in orodnim jeklom Utop Mo5 (slika 4a in 7f). Iz slike 7e in 7f vidimo, da ima na nastanek in mehanizem lepljenja materiala vpliv izbira materiala delovnega valja v kombinaciji z materialom valjanca.

Na sliki 8 so prikazane poškodbe obrabnih kalot na valjčkih, ki smo jih preizkušali na modelu čistega izmeničnega drsenja. Slika 8a prikazuje obrabno kaloto valjčka iz hitroreznega jekla BRM2 po opravljenih 20000 ciklih, pri temperaturi preizkušanja 90°C, drsni hitrosti 0.15m/s in materialu valjanca OC 100ex.. Iz slike 8a sklepamo, da je bila prisotna abrazija in adhezija. Na sliki 8b je prikazana obrabna kalota na valjčku iz BRM2, pri temperaturi preizkušanja 20°C, drsni hitrosti 0.15m/s in materialu valjanca OC 100ex.. Pri temperaturi preizkušanja 20°C (slika 8b) se je poleg abrazije pojavila tudi adhezija. Puščica na sliki 8b prikazuje adhezijsko področje v obrabni kaloti.

Na sliki 8c je prikazana obrabna kalota valjčka iz BRM2 pri preizkušanju v paru z materialom valjanca Prokron 12sp. in temperaturi preizkušanja 20°C po opravljenih 10000 ciklih, slika 8d pa prikazuje isto obrabno kaloto po opravljenih 20000 ciklih. Opazili smo, da se je poleg abrazije pojavilo tudi začetno utrujanje površine

obrabne kalote. Na površini obrabne kalote so se pojavile začetne jamice (puščica A). Iz primerjave slik tudi vidimo, da se je obraba valjčka povečala saj je širina obrabne kalote po opravljenih 20000 ciklih večja kot po 10000 ciklih.

Na valjčku iz Utop Mo6 (slika 8e) smo pri istem obremenitvenem kolektivu ocenili, da je bila obraba valjčka posledica abrazije, saj so v obrabni kaloti dobro vidne globoke raze. Iz širine obrabnih kalot se vidi, da je bila obraba valjčka iz Utop Mo6 (slika 8e) večja kot pri valjčku iz BRM2 (slika 8d in 5g).

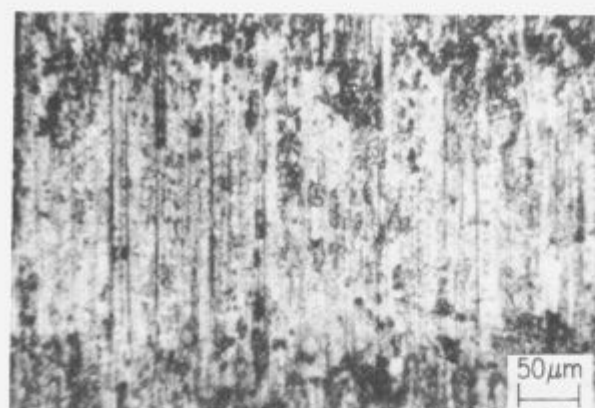
Slika 9 prikazuje poškodbe obrabnih kalot valjčkov, ki smo jih preizkušali na modelu čistega drsenja. Slika 9a prikazuje obrabno kaloto valjčka iz BRM2 po opravljenih 20000 ciklih, pri temperaturi preizkušanja 90°C, drsni hitrosti 0.3m/s in materialu valjanca OC 100ex. V obrabni kaloti vidimo globoke raze, ki so posledica abrazije in majhne poškodbe, ki so posledica adhezije. Pri isti temperaturi preizkušanja in drsni hitrosti, vendar pri materialu valjanca Prokron 12sp. pa je bila površina obrabne kalote bolj gladka (slika 9b). Pri preizkušanju v paru z materialom valjanca Prokron 12sp., temperaturi preizkušanja 20°C in po opravljenih 10000 ciklih smo zasledili zanimiv mehanizem obrabe. Na osnovi slike 9c bi lahko zaključili, da se je pojavilo lepljenje materiala valjanca na valjček. Pri večji povečavi delčka površine obrabne kalote (slika 9d) smo ugotovili, da so se na površini obrabne kalote pojavile tanke plasti. Izmerili smo mikrottrdoto osnovnega materiala (slika 9d, puščica A) in mikrottrdoto plasti (slika 9d, puščica B). Ker sta bili mikrottrdoti skoraj enaki, sklepamo, da so plasti produkt utrujanja kontaktne površine. Na sliki 9e je prikazana obrabna kalota valjčka Utop Mo6 po opravljenih 20000 ciklih, pri temperaturi preizkušanja 90°C, drsni hitrosti 0.3m/s in materialu valjanca Prokron 12sp.. V primerjavi z valjčkom iz BRM2 (slika 9b) so se v obrabni kaloti pojavile zelo globoke raze zaradi abrazije. V razi, ki jo na sliki 9e prikazuje puščica, smo opazili tudi znake adhezije. Vidimo tudi, da je bila obraba valjčka iz Utop Mo6 večja od obrabe valjčka iz BRM2 (slika 5i).

Na slikah od 9a do 9e so v obrabni kaloti vidne temne površine, za katere ocenjujemo, da so posledica visokih kontaktnih temperatur in adhezije. Sliki 9f in g prikazujeta izgled temne površine.

V obrabnih kalotah valjčka iz OCR 12vms smo v obrabni kaloti opazili bele površine različnih velikosti (slika 9h). Z merjenjem mikrottrdote belih površin (puščica A na sliki 9h) in osnovnega materiala (puščica B na sliki 9h), smo ugotovili, da so bele površine verjetno karbidi, saj smo jim izmerili bistveno večjo mikrottrdoto kot za osnovni material. Na sliki od 4i do 4l in od 5i do 5l vidimo, da je bila obraba OCR 12vms velika kljub velikemu številu na kontaktni površini prisotnih karbidov.

7 Zaključki

Na osnovi rezultatov preizkušanja obrabne obstojnosti orodnih in hitroreznih jekel smo ocenili, da so model valjanja, model čistega izmeničnega drsenja, model čistega drsenja primerni za simulacijo obremenitvenega kolektiva, ki smo ga izračunali za primer hladnega valjanja pločevine.



a.



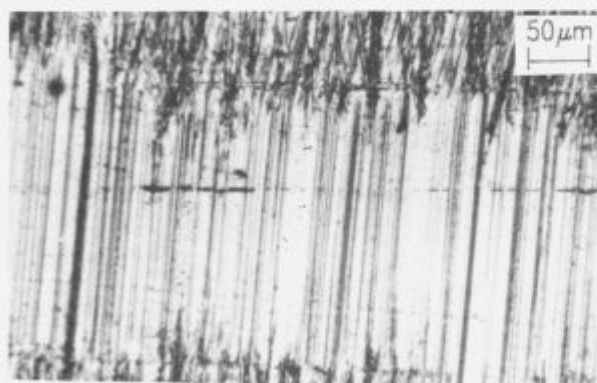
b.



c.



d.



e.

Slika 8. Poškodbe kontaktnih površin valjčkov, ki smo jih preizkušali na modelu čistega izmeničnega drsenja. **a.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, mat. valjanca OC 100ex, po 20000 ciklih, **b.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, mat. valjanca OC 100ex, po 20000 ciklih, **c.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, mat. valjanca Prokron 12sp, po 10000 ciklih, **d.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, mat. valjanca Prokron 12sp, po 20000 ciklih, **e.** Utop Mo6, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, mat. valjanca Prokron 12sp, po 20000 ciklih.

Figure 8. Damages of contact surfaces of cylinders at testing by oscillating model. **a.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, strip steel OC 100ex, after 20000 cycles **b.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, strip steel OC 100ex, after 20000 cycles, **c.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, strip steel Prokron 12sp, after 10000 cycles, **d.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, strip steel Prokron 12sp, after 20000 cycles, **e.** Utop Mo6, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.15\text{m/s}$, strip steel Prokron 12sp, after 20000 cycles.

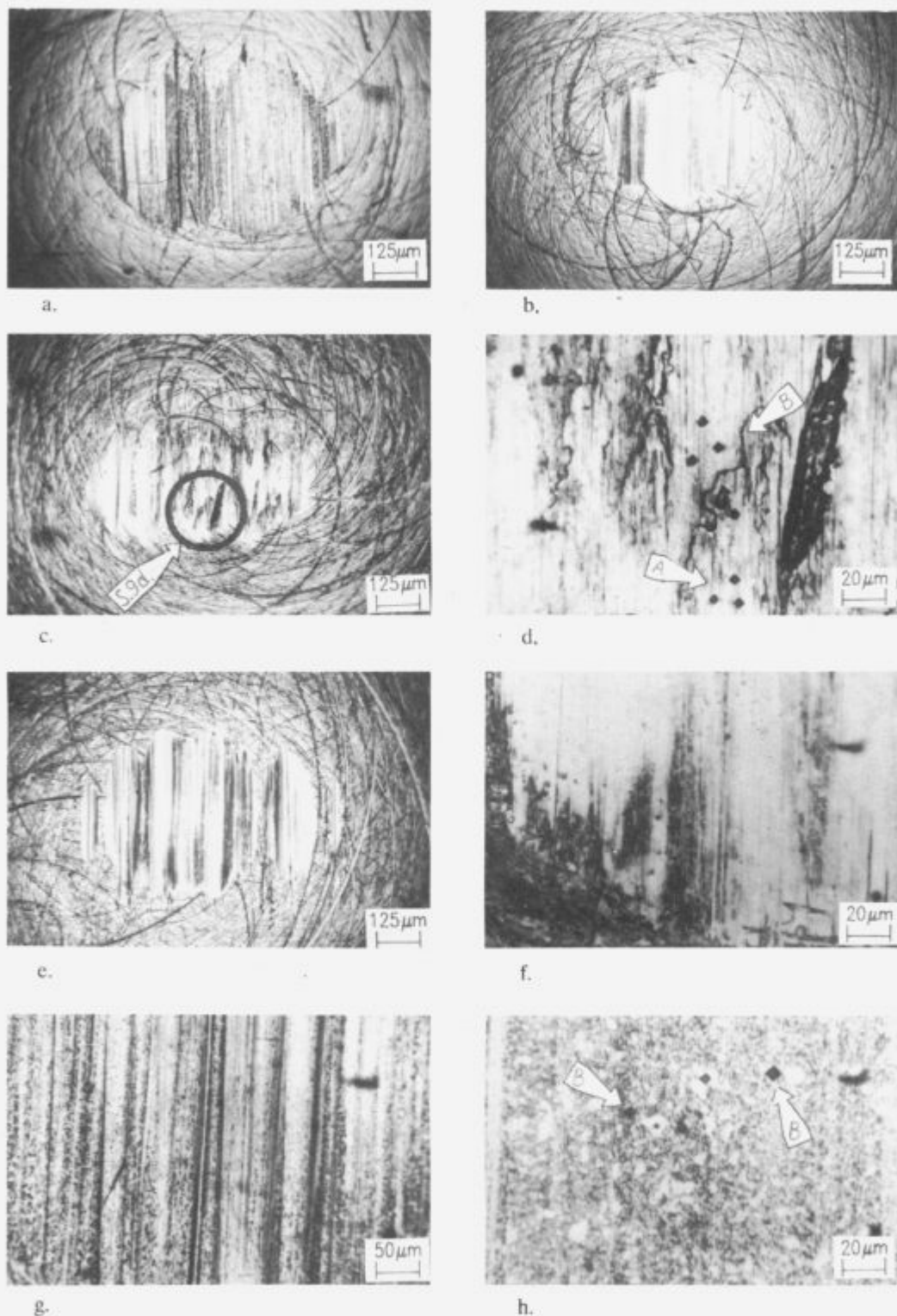
Ugotovili smo, da je imela temperatura preizkušanja vpliv na obrabo orodnih in hitroreznih jekel pri preizkušanju na modelu valjanja pri drsni hitrosti 0.3m/s. Pri preizkušanju orodnih in hitroreznih jekel na modelu čistega izmeničnega drsenja in modelu čistega drsenja temperatura preizkušanja ni imela posebnega vpliva na obrabo. Kombinacija materiala za delovni valj in materiala valjanca ter drsna hitrost so imeli pri vseh modelnih preizkušanja velik vpliv na obrabo orodnih jekel in hitroreznih jekel.

Za popolno predstavo o obrabni obstojnosti jekel, ki se

uporabljajo za delovne valje bi bilo potrebno v nadaljnjih raziskavah raziskati še vpliv hladilno mazalnega sredstva in vpliv kontakta delovnega valja s podpornimi valji.

8 Literatura

- ¹ S.-E. Lundberg: Comparison of Roll Wear in Rolling of Stainless Steel and Carbon Steel in a High Temperature Test Rig; Proceedings of the 6th International Congress on Tribology Eurotrib '93, 1993 Budapest, Vol. 3, str.446-451.



Slika 9. Poškodbe kontaktnih površin valjčkov, ki smo jih preizkušali na modelu čistega drsenja. **a.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca OC 100ex., po 20000 ciklih. **b.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca Prokron 12sp., po 20000 ciklih. **c,d.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca Prokron 12sp., po 10000 ciklih. **e.** Utop Mo6, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, mat. valjanca Prokron 12sp., po 20000 ciklih. **f,g.** Izgled temnih površin. **h.** Obrabna površina valjčka iz OCR 12vms.

Figure 9. Damages of contact surfaces of pins at testing by sliding model. **a.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel OC 100ex., after 20000 cycles. **b.** BRM2, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel n12sp., after 20000 cycles. **c,d.** BRM2, $T=20^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel Prokron 12sp., after 10000 cycles. **e.** Utop Mo6, $T=90^{\circ}\text{C}$, $V_d=0.3\text{m/s}$, strip steel Prokron 12sp., after 20000 cycles. **f, g.** Dark surfaces. **h.** Wear surface of a pin from OCR 12vms.

- ² Poškodbe in obstojnost Sendzimir valjev, prevod-Železarna Ravne 1992.
- ³ B.M.Shukla, P.C.Nautiyal, V.R.K.Sastry: A Study of The Plastically Deformed Lubricated Contacts Using Scanning Electron Microscope; Proceedings of the 6th International Congress on Tribology Eurotrib'93, 1993 Budapest; Vol. 5, str.446-451.
- ⁴ I. Tselikov, G. S. Nikitin, S. E. Rokotoyan: The Theory of Lengthwise Rolling; Mir Publishers; 1981.
- ⁵ John A.Schey: Tribology in Metalworking, American society for metals, 1983.
- ⁶ M. Čaušević: Obrada metala valjanjem; Veselin Masleša; Sarajevo 1983.