

Obraba drsnih površin in notranje puščanje hidravličnih sestavin

Franc Majdič, J. Vižintin, J. Pezdirnik, M. Kalin, A. Kunc

Fakulteta za strojništvo Ljubljana

Povzetek

Uvodoma je podan kratek opis mehanizmov in vrst obrab znotraj hidravličnih sestavin. Sledijo predvsem ugotovitve s področja abrazivne obrabe površin hidravličnih elementov znotraj sestavin.

Prispevek nadalje obsega sledeče tematike:

- SEM posnetki (z elektronskega mikroskopa) batov (novi in obrabljeni) ter ohišja (novo in obrabljeno do neuporabnosti).*
- meritve notranjega puščanja na SEM posnetih batov; meritve notranjega puščanja novega in obrabljenega bata v istem (obrabljenem) ohišju s pomočjo hidravličnega akumulatorja (laboratorijske meritve); primerjalna analiza meritev.*
- analiza vpliva višine reže na notranje puščanje; analitična primerjava rezultatov meritev in rezultatov dobljenih s pomočjo računskega modela.*
- analiza vpliva dolžine reže na notranje puščanje; analitična primerjava rezultatov meritev in rezultatov dobljenih s pomočjo računskega modela.*
- pretakanje mineralnega in rastlinskega hidravličnega olja skozi kolobarjaste reže (lekažni tok) takšnih oblik, ki so značilne za hidravlične sestavine; analitična primerjava razlik v lekažnem toku za eno in drugo olje.*
- ugotovitve glede obrabe drsnih čevljev aksialne batne črpalke z in brez trdih prevlek; rezultati laboratorijskega testa.*
- zaključki*

*Prispevek je napisan kot **pregledni članek** za tisto pomembno področje, ki ga ponazarja že sam naslov prispevka. To je tematika, ki jo je nujno poznati in upoštevati tako pri projektiranju in konstruiranju hidravličnih naprav kot tudi nadalje v uporabi in vzdrževanju le teh.*

1. Uvod

Notranje puščanje hidravličnih sestavin (v nadaljevanju ga bomo kratko imenovali lekaža) je neizogibno prisotno pri vseh ventilih drsniškega tipa. Ne moremo ga izničiti, zato je nujno, da ga poznamo, ga znamo oceniti in po možnosti zmanjšati na minimum. V nadaljevanju so predstavljeni vzroki za notranje puščanje, vzroki za povečanje notranjega puščanja in načini kako ga ugotovljati in ovrednotiti. Redno spremljanje lekaže je ključnega pomena za napovedno vzdrževanje. Ob ugotovitvi povečanja lekaže je potrebno začeti iskati vzroke (slaba čistoča hidravlične tekočine, slaba kemijska zgradba hidravlične tekočine, ...).

Karakteristične prednosti hidravličnih strojev in naprav [1] so: kompaktnost glede na veliko pogonsko moč, odlična možnost krmiljenja itd. Življenjska doba mobilnih hidravličnih strojev je običajno nižja od življenjske dobe stacionarnih hidravličnih strojev in naprav. Razlika v življenjski dobi nastane zaradi različnih obratovalnih pogojev – predvsem različnih stopenj čistoče hidravličnih tekočin. Splošno znana je trditev, da je za okoli 70 % vseh okvar hidravličnih strojev in naprav kriva prekomerna onesnažena hidravlična tekočina ([1] in [2]). Samo filtriranje ne more zagotoviti 100% čiste hidravlične tekočine. Zato filtriranje ni zadostno za preprečevanje obrabe v hidravličnih sestavinah [1]. Velik problem filtriranja se pojavi v hidravličnih napravah, kjer ni kroženja hidravlične tekočine (regulatorji črpalk s spremenljivo iztislino, potni ventili – manjši hidravlični valji,...). V uporabi hidravličnih naprav (HN) v okoljih industrije oz. gospodarstvu je eden od vzrokov za povečanje nečistoč v hidravlični tekočini tudi neupoštevanje signalizacije zamašenosti filtrov hidravlične tekočine. Poleg tega se v praksi še vedno gradijo hidravlične naprave brez signalizacije zamašenosti. Obraba znotraj ventila spremeni karakteristiko le-tega. Zaradi obrabe se v krajnih primerih spremeni tudi nazivna sila oz. moment in hitrost delovanja izvršilne sestavine. Poveča se notranja lekaža, tlačni krmilni signali postanejo nesimetrični (dvostopenjski potni ventili, servo-ventili...) in krmiljenje postane nestabilno [3]. Prav tako pomemben je vpliv onesnaženja hidravlične tekočine z delci, ki povzročijo spremembo reoloških lastnosti tekočine.

1.1. Zmanjšanje učinkovitosti sistema zaradi obrabe

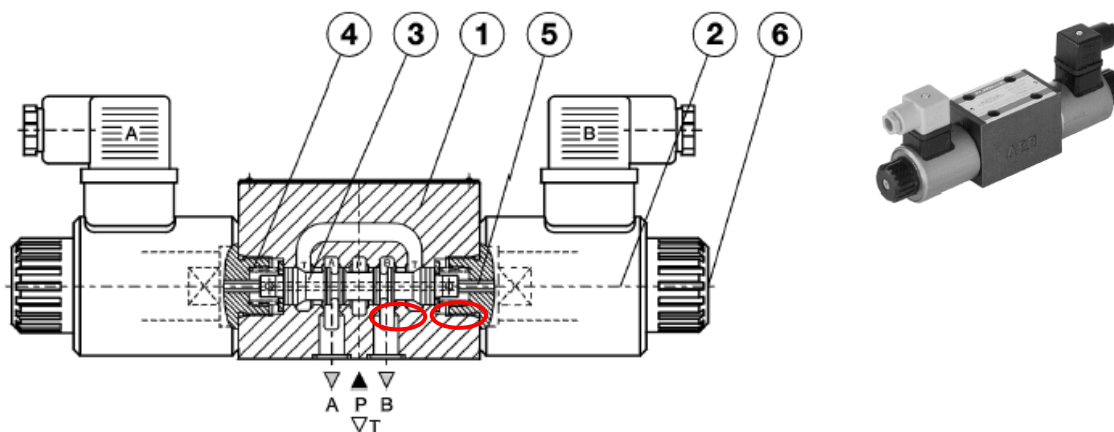
Pri ventilih, kjer je prekritje med batom in ohišjem potnega ventila v ničnem položaju (sl. 1) se po predvidevanjih v večji meri pojavlja tri-telesna abrazija.

Možne posledice zaradi abrazivne obrabe:

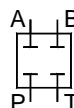
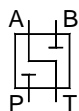
- prekomerno – povečano -posedanje bremen (dvigala, delovni stroji, ...) čeprav je potni ventil v ničelnem položaju (blokiranja priključka A in B),
- zmanjšana delovna hitrost izvršilne sestavine (zaradi povečanja lekaže) → zmanjšan volumetrični izkoristek sistema, ...

1.1.1. Enostopenjski (konvencionalni) potni ventil (EPV - sl. 1):

Običajno so ohišja enaka za različne tipe krmilnega bata. Razlika je le v drugače oblikovanih krmilnih batih.



Slika 1 : Enostopenjski konvencionalni potni ventil 4/3 z označenimi ploskvami, kjer se v največji meri pojavlja 3-telesna abrazija [4]



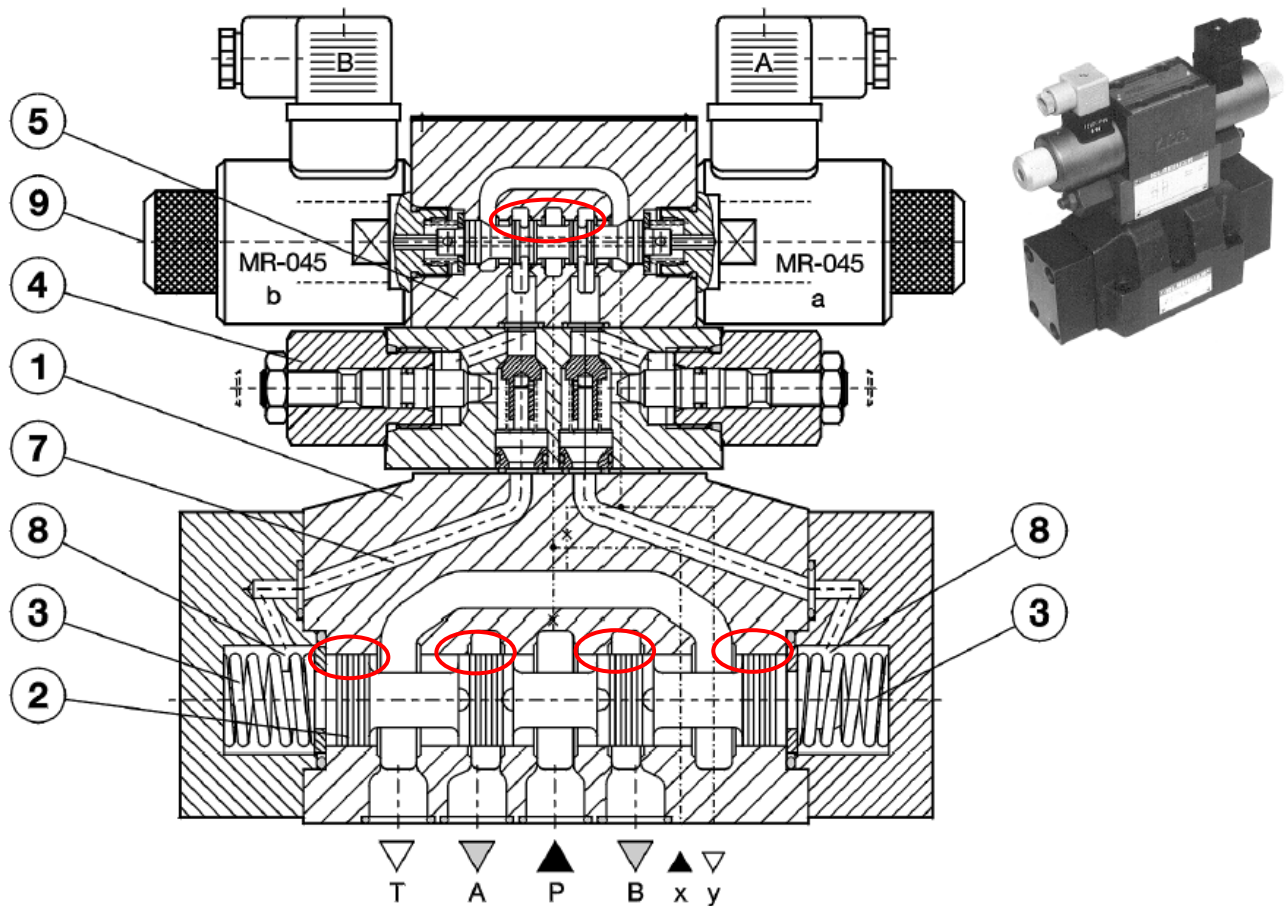
Slika 2 : Ničelni položaj EPV tip 1



Slika 3 : Ničelni položaj EPV tip 2

1.1.2. Dvostopenjski (konvencionalni) potni ventil (sl. 4):

Dvostopenjski potni ventil se uporablja pri večjih pretokih (nad cca. 80 l/min; odvisno od posameznega proizvajalca in projektanta oz. od pogojev delovanja HN). Dvostopenjski potni ventil je bil razvit zaradi povečanih tokovnih sil pri večjih pretokih – predvsem zaradi omejenih sil elektromagnetov. Tako manjši zgornji ventil (enostopenjski elektromagnetni potni ventil) krmili spodnji glavnotočni ventil. Preko krmilnih kanalov in tlačne komore prekrmili glavnotočni bat v željen položaj.

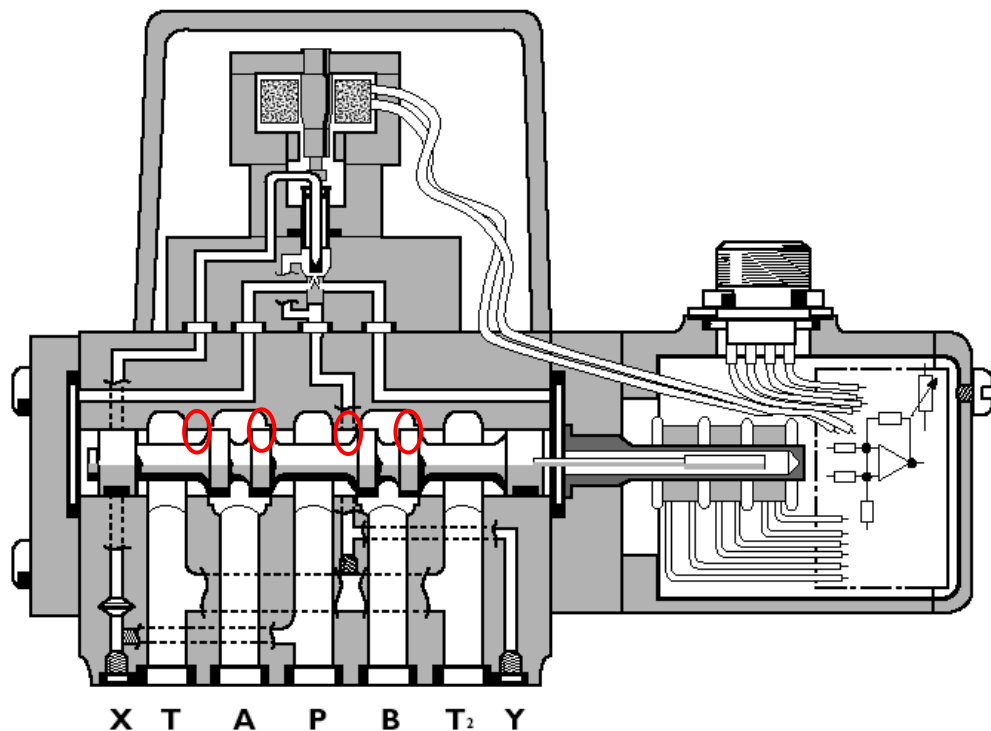


Slika 4 : Dvostopenjski konvencionalni potni ventil 4/3 z označenimi ploskvami, kjer se v največji meri pojavlja 3-telesna abrazija [4]

1.2. Nestabilno stanje pri krmiljenju zaradi obrabe

Ker je "odzivnost" servo – ventilov zelo velika (do 350 Hz in več), je zelo pomembno, da se robovi na krmilnih batih ne obrablajo. Zaradi zahtevane hitre odzivnosti je prekritje med batom in ohišjem v ničelni legi največkrat ničelno, kar povzroča probleme že pri malo obrabljenem robu (že izpod 10 μ m) bata (izvršilna sestavina se začne kljub ničelni legi počasi premikati).

Obstaja več izvedb servo ventilov (SV). V nadaljevanju je prikazana izvedba servo – ventila s sredinsko šobo z odtočnima kanaloma.



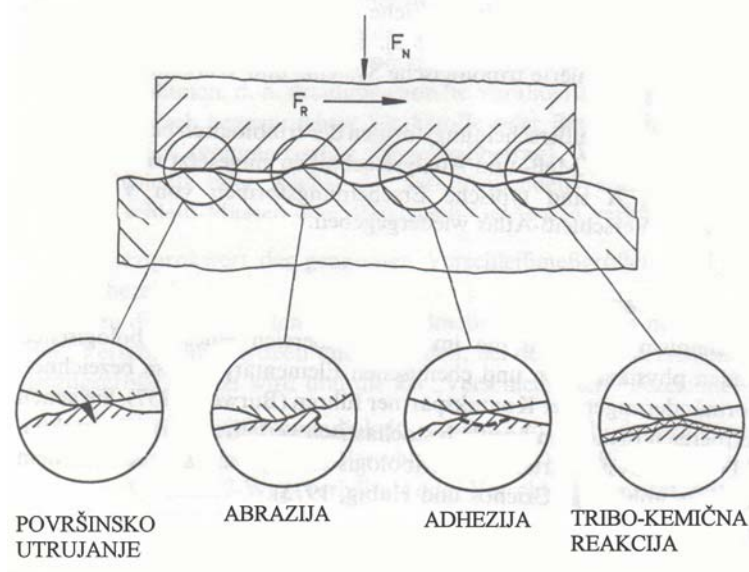
Slika 5: Prerez servo (potnega) ventila z LVDT senzorjem [5]

Izvedba ventila: sredinska šoba z odtočnima kanaloma.

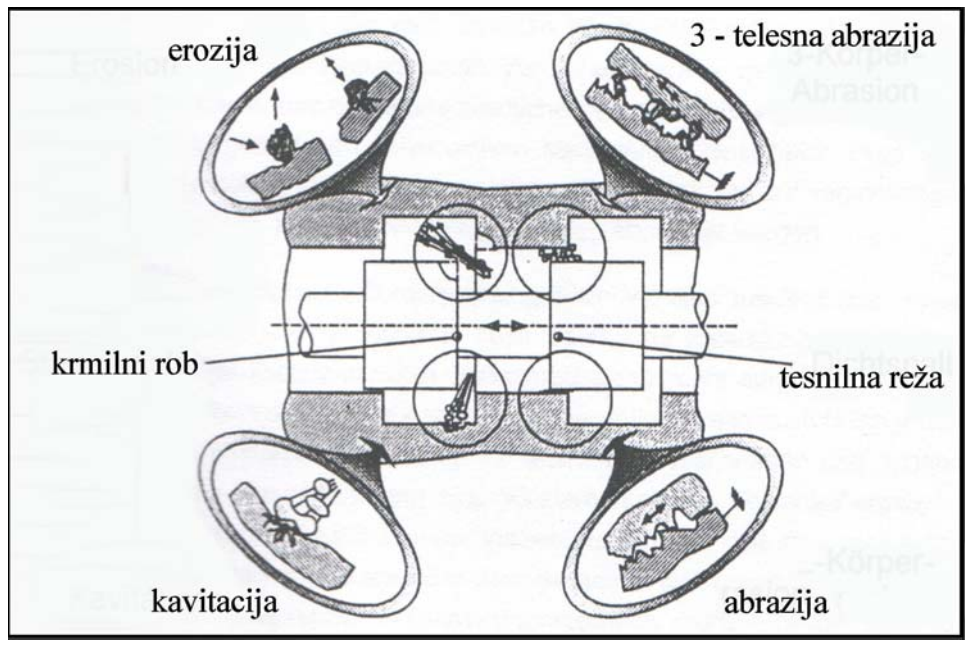
Na ventilu so označeni robovi, kjer se v večji meri pojavlja erozijska obraba.

2. Mehanizmi in vrste obrab znotraj hidravličnih sestavin

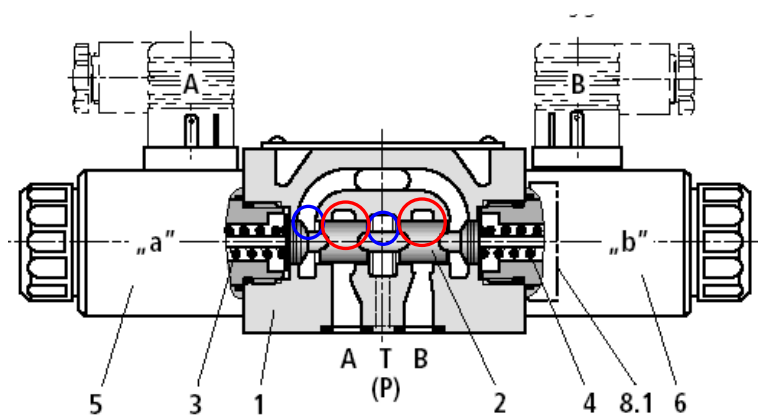
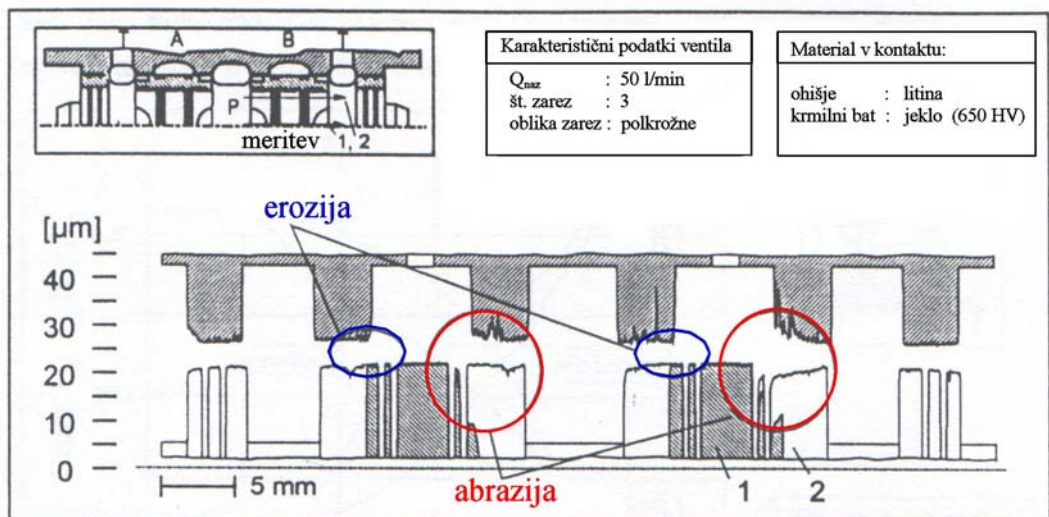
Pri mehanizmih obrabe se dogajajo fizikalni in kemijski procesi. Glede na sl. 6 [1] poznamo štiri mehanizme obrabe: **adhezijo**, **abrazijo**, **površinsko utrujanje** in **tribo-oksidacijo**. Mehanizme obrabe se popiše z vrsto obrabe glede na tribološko obremenitev in vmesni material (mazivo – hidravlična tekočina, delci).



Slika 6: Splošni tribološki prikaz vseh štirih mehanizmov obrabe [6]



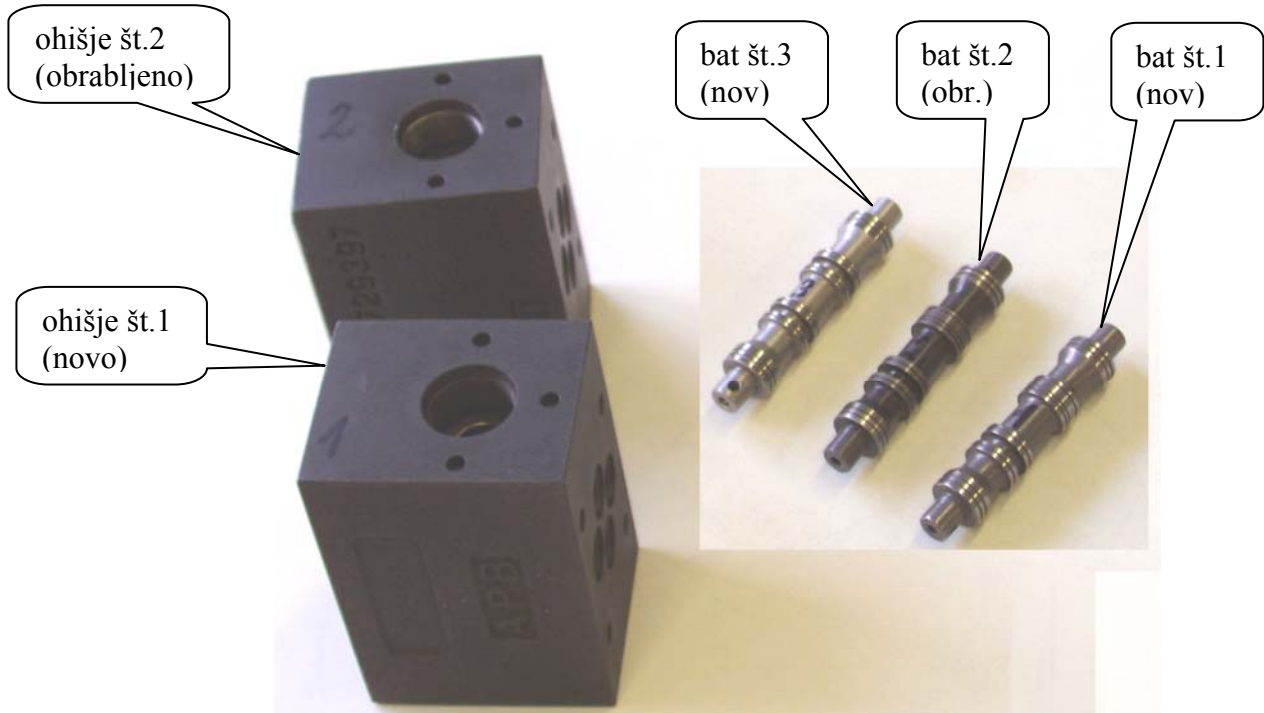
Slika 7: Prikaz vrst obrab na potnem ventilu [3]



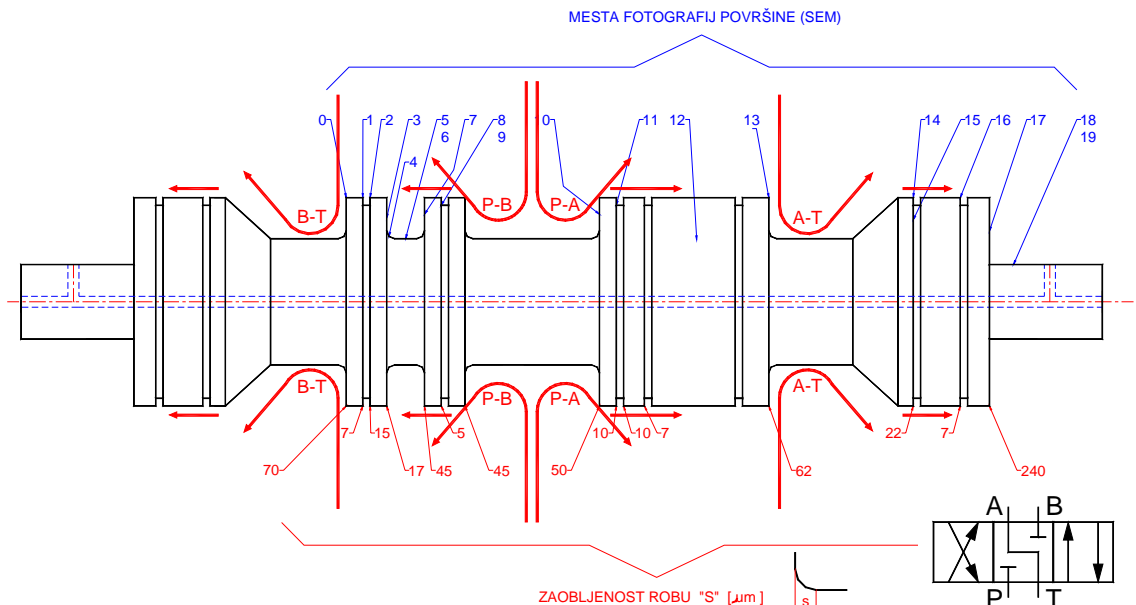
Slika 8: Prikaz površinske topologije ohišja (izvrtine) in bata po obrabnem testu [3], [7]

3. SEM posnetki batov in ohišij (novih in obrabljenih)

Ena od možnih metod za oceno stanja površine je kontrola površine pod elektronskim mikroskopom (SEM). Tu bomo prikazali ključni par (bat in ohišje) v hidravličnem ventilu nazivne velikosti 6. Pogledali si bomo tri krmilne bate (dva nova in enega obrabljenega) ter dve ohišji potnega ventila. Eno ohišje je novo, drugo pa je obrabljeno do neuporabnosti.

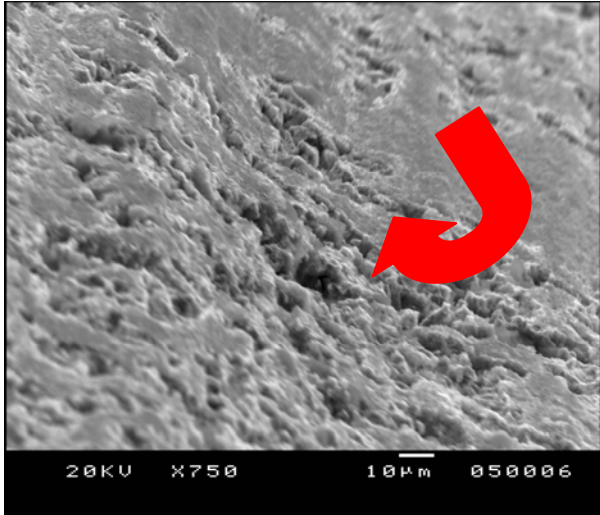


Slika 9: Prikaz elementov potnega ventila uporabljenih v meritvah

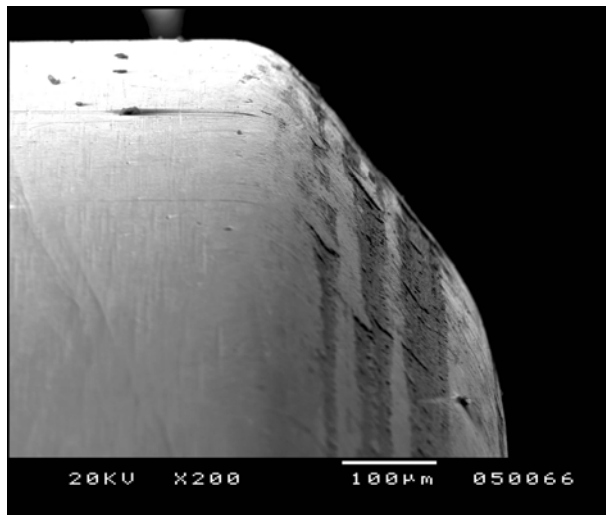
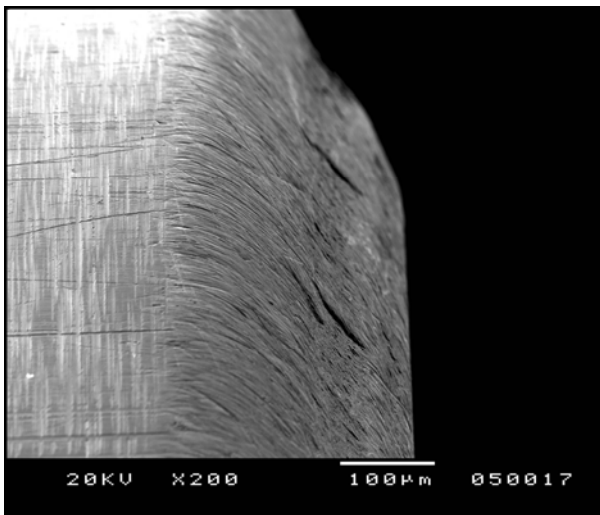
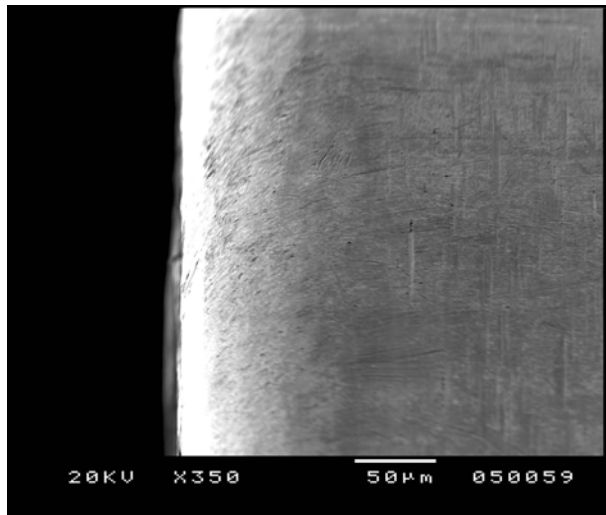
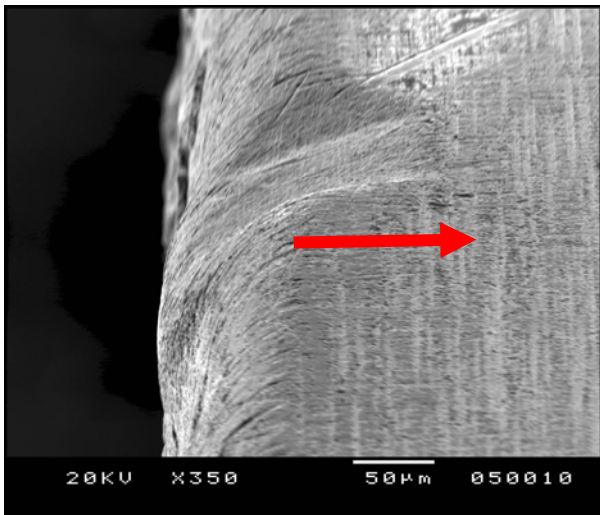
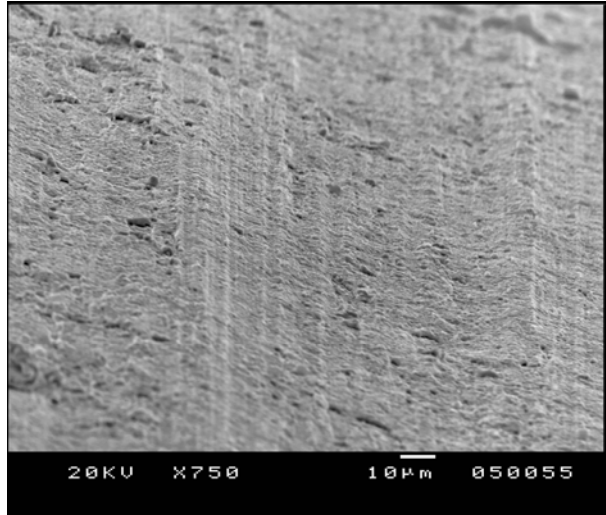


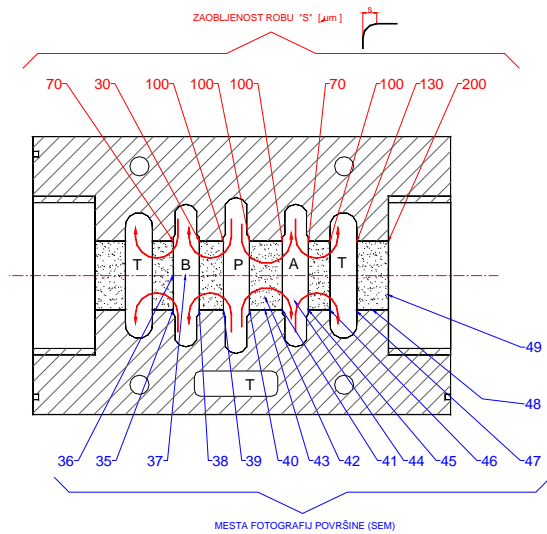
Slika 10: Skica novega (št. 1) in rabljenega krmilnega bata (št. 2) s prikazom položaja slik površine in velikosti zaobljenosti robu

obrabljen bat (izmet)



nov bat



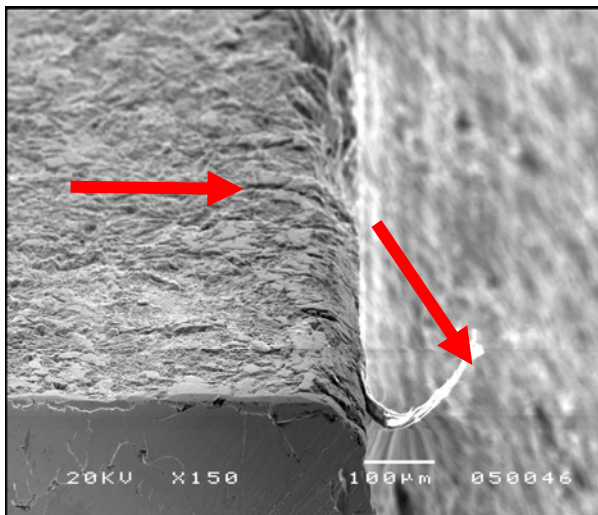
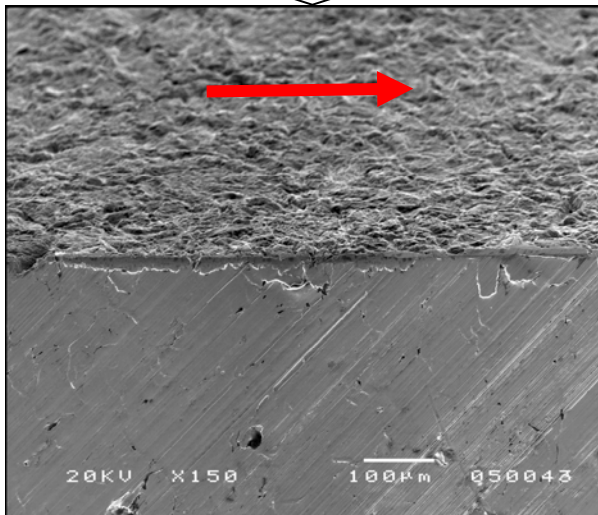


Slika 11: Skica rabljenega ohišja (št. 2) s prikazom položaja slik površine in velikosti zaobljenosti robu

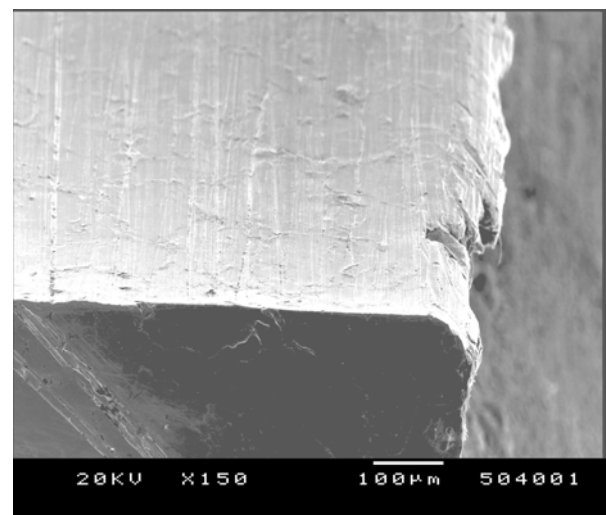
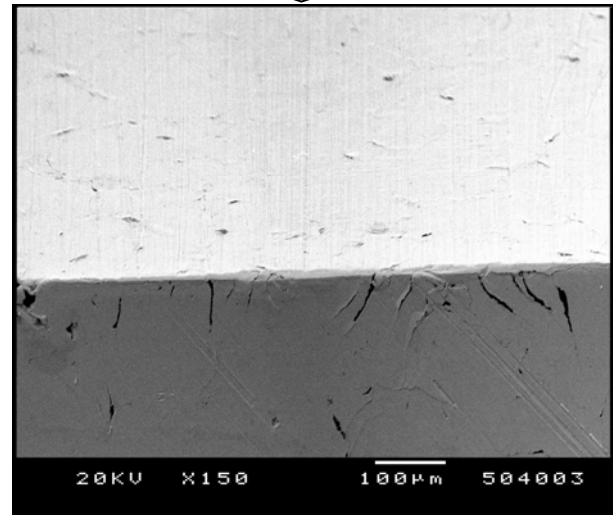


Slika 12: Prerezano ohišje (priprava za pregled)

obrabljeno ohišje (izmet)



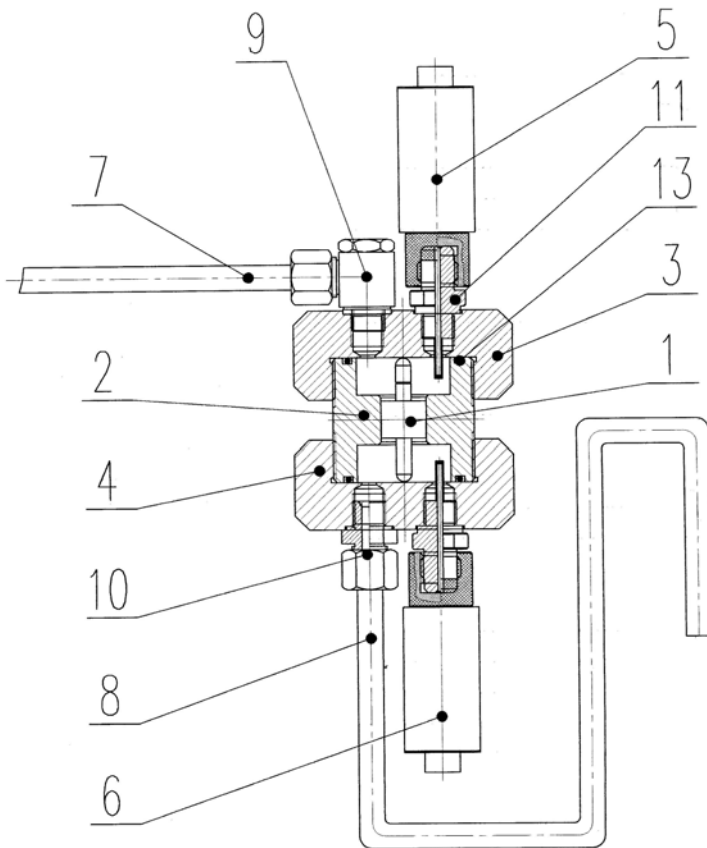
ново ohišje



Iz prikazanih slik so jasno razvidni: abrazivna in erozivna obraba ter kavitacija. Puščice na slikah obrabljenih batov in ohišij prikazujejo smer pretoka.

4. Meritve notranjega puščanja

4.1. Meritve na osnovnem preskuševališču



Slika 13: Prikaz preskuševališča: levo v prerezu, desno slike sestavnih delov preskuševališča [8]

Preskusni bati (poz. 1 na sliki 14) so bili premera $\Phi 18$ z različnimi prekritji in odstopki od idealne konture:

- dva bata z dolžino prekritja 3mm; eden je za režo $5,5 \mu\text{m}$ (3_1), drugi pa za režo $2,5 \mu\text{m}$ (3_2),
- štirje bata z dolžino prekritja 5 mm; 1x reža $15 \mu\text{m}$ (5_1), 1x $4,5 \mu\text{m}$ (5_2), 1x $1,5 \mu\text{m}$ (5_3) in 1x za režo $10,5 \mu\text{m}$ (5_4),
- štirje bata z dolžino prekritja 12 mm; 1x reža $15,5 \mu\text{m}$ (12_1), 1x $10,5 \mu\text{m}$ (12_2), 1x $5,5 \mu\text{m}$ (12_3) in 1x za režo $2,5 \mu\text{m}$ (12_4),
- en konični bat z dolžino prekritja 5mm; je za režo $2,5 \mu\text{m}$ (5_2k_s in 5_2k_z)- bat ima na celotno dolžino prekritja konusno površino nagnjeno v eno smer. Med preskusom je bil obrnjen enkrat na eno in enkrat na drugo stran.

- en konični bat z dolžino prekritja 12mm; je za režo 10,5 μm (12_2k_s in 12_2k_z)- bat ima na celotno dolžino prekritja konusno površino nagnjeno v eno smer. Med preskusom je bil obrnjen enkrat na eno in enkrat na drugo stran.

Za vse poskuse je bilo enotno ohišje s honano izvrtino Φ18,060 .

OPOMBA: Kjer se pojavi izraz reža se smatra tista dimenzija višine reže, ko je bat v centrični legi glede na izvrtino.

Pri vseh meritvah (razen v eni) je bila lega bata izsredna (izmerjene vrednosti v primerjavi z računskimi).

4.2. Meritve lekaže s hidravličnim akumulatorjem (HA)

Metoda je primerna za HA z membrano ali z mehkom, ker spremljanje spremembe prostornine ni možno, kot je to pri batnem ob ustrezni konstrukcijski izvedbi.

Meritve lekaže s HA so zelo preprost in v praksi zelo priporočljiv način ugotavljanja tesnosti hidravličnega sistema oz. posameznih ventilov. Preprostost te metode je v tem, da za ugotavljanje lekaže ne potrebujemo veliko orodja in demontaža posameznih ventilov ni potrebna. Osnovno – potrebno orodje je štoparica. Postopek ugotavljanja lekaže je sledeč: Hidravlični akumulator napolnimo do maksimuma in izklopimo pogonski motor hidravlične črpalke. Nato čakamo vsaj 3 minute, da se plin zaradi hitre kompresije temperira z okolico. Odločimo se za tlačno območje v katerem štopamo čas padanja tlaka (od zgornjega opazovanega tlaka p_2 do spodnjega tlaka p_1).

Za primer preverjanja lekaže s hidravličnim akumulatorjem bomo v nadaljevanju prikazali ustrezne enačbe za določitev lekažnega pretoka. Volumen hidravlične tekočine, ki izteče, ko v hidravličnem akumulatorju pade tlak od p_2 do p_1 pri poznani velikosti HA (V_0), poznanem eksponentu kompresije (n_k) in eksponentu ekspanzije (n_e) je enak:

$$\Delta V_1 = V_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{1}{n_k}} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{n_e}} - 1 \right] \quad (4.1).$$

Hitre termodinamične spremembe v hidravličnem akumulatorju (tlačne korekcije):

Za hitre spremembe se smatrajo spremembne, ki se izvedejo hitreje od 3 minut ($1 < n < 1,4$). Spremembe, ki se izvedejo hitreje od ene minute imajo $n = 1,4$; spremembe, ki pa se izvedejo počasneje od 3 minut pa niso podvržene padcu tlaka (ni potrebne tlačne korekcije) [12].

Pri hitrih termodinamičnih preobrazbah plinov prihaja do segrevanja (hitra kompresija) oz. ohlajanja (hitra ekspanzija) plina in s tem do padanja oz. naraščanja tlaka plina. Zaradi točnosti ugotavljanja lekaže s pomočjo hidravličnega akumulatorja je potrebno upoštevati segrevanje /

ohlajanje plina. Po hitri kompresiji termodinamična teorija predvideva izohorno ohlajanje plina (oddajanje toplote okolici). Teorija torej predvideva, da se po končani hitri kompresiji plin izohorno ohladi (to naj bi trajalo več kot tri minute, šele nato naj bi se začela ekspanzija). Podobno je tudi po hitri ekspanziji.

Sprememba tlaka plina zaradi spremembe temperature po izvršeni hitri kompresiji:

$$\Delta p'_k = p_2 \left[1 - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n_k - 1}{n_k}} \right] \quad (4.2).$$

Tako je realni računski tlak s katerim lahko računamo iztisnjen volumen iz HA enak:

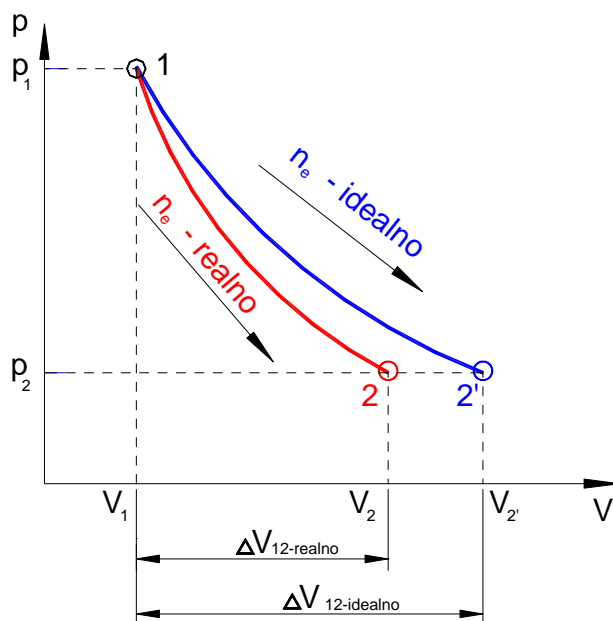
$$p_{2,k,rač} = p_2 - \Delta p'_k \quad (4.3).$$

Hidravlični akumulator po hitri kompresiji in počasni ekspanziji iztisne sledečo količino tekočine:

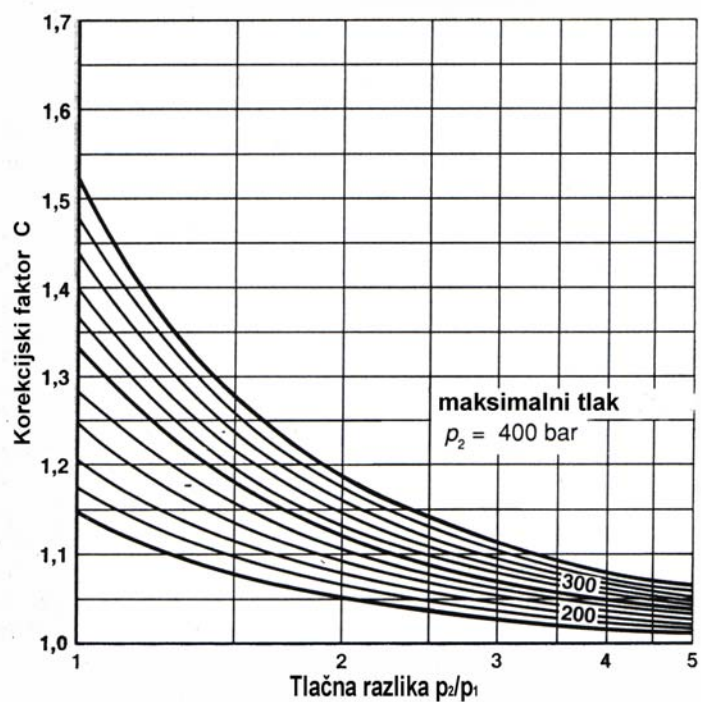
$$\Delta V_{rač,k} = V_0 \cdot \left(\frac{p_0}{p_{2,k,rač}} \right)^{\frac{1}{n_k}} \cdot \left[\left(\frac{p_{2,k,rač}}{p_1} \right)^{\frac{1}{n_e}} - 1 \right] \quad (4.4).$$

V predhodnih enačbah smo upoštevali, da je plin v HA idealen. Ker pa se dejanski plin (N_2) ne obnaša kot idealni, je potrebno upoštevati korekcijo (en. 4.5 in graf korekcije – izoterma sl.16).

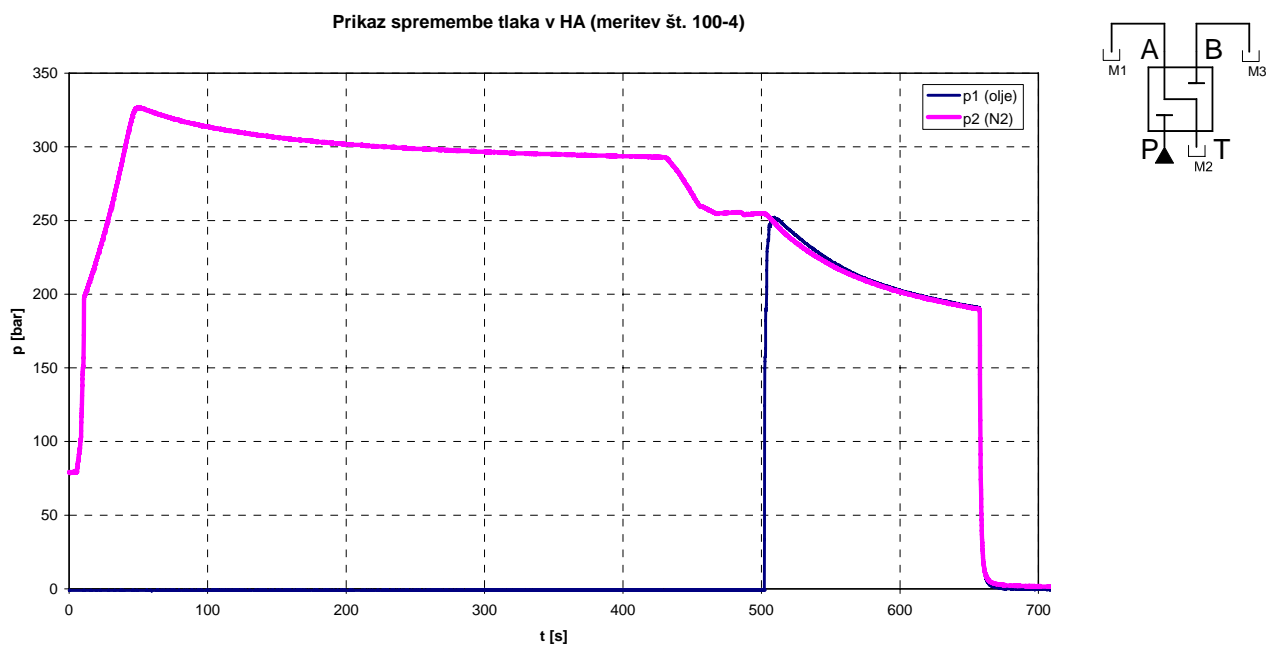
$$\Delta V_{realni} = \frac{\Delta V_{idealni-rač}}{C} \quad (4.5).$$



Slika 14: Grafični prikaz idealne in realne iztisnine iz HA pri ekspanziji

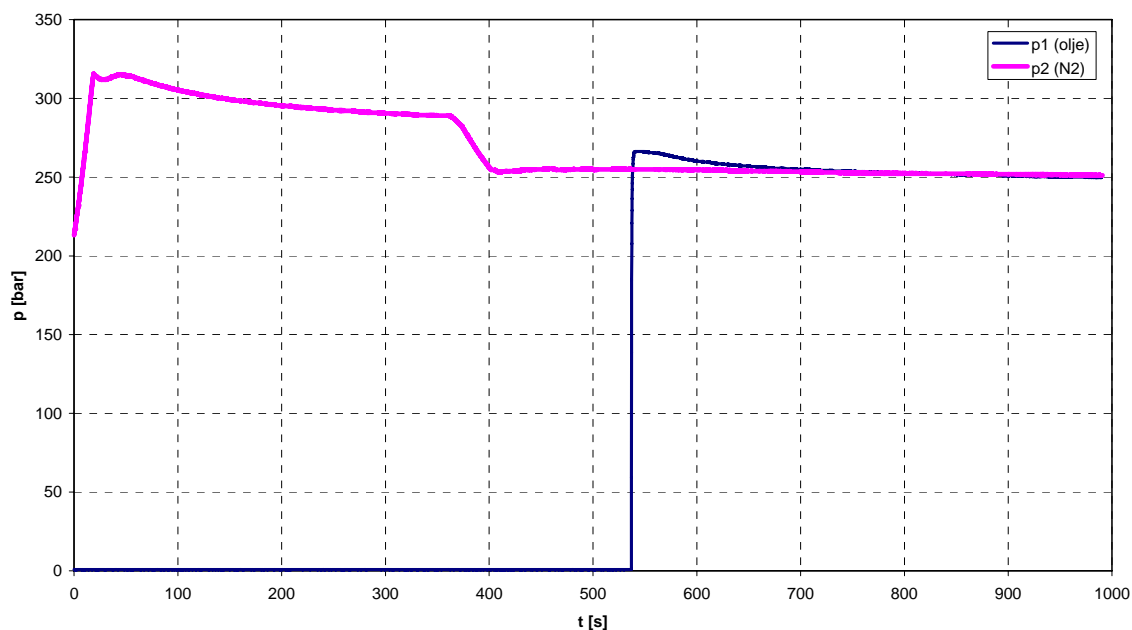


Slika 15: Odvisnost korekcijskega faktorja C od tlačne razlike p_2 / p_1 za izotermno spremembo [10]



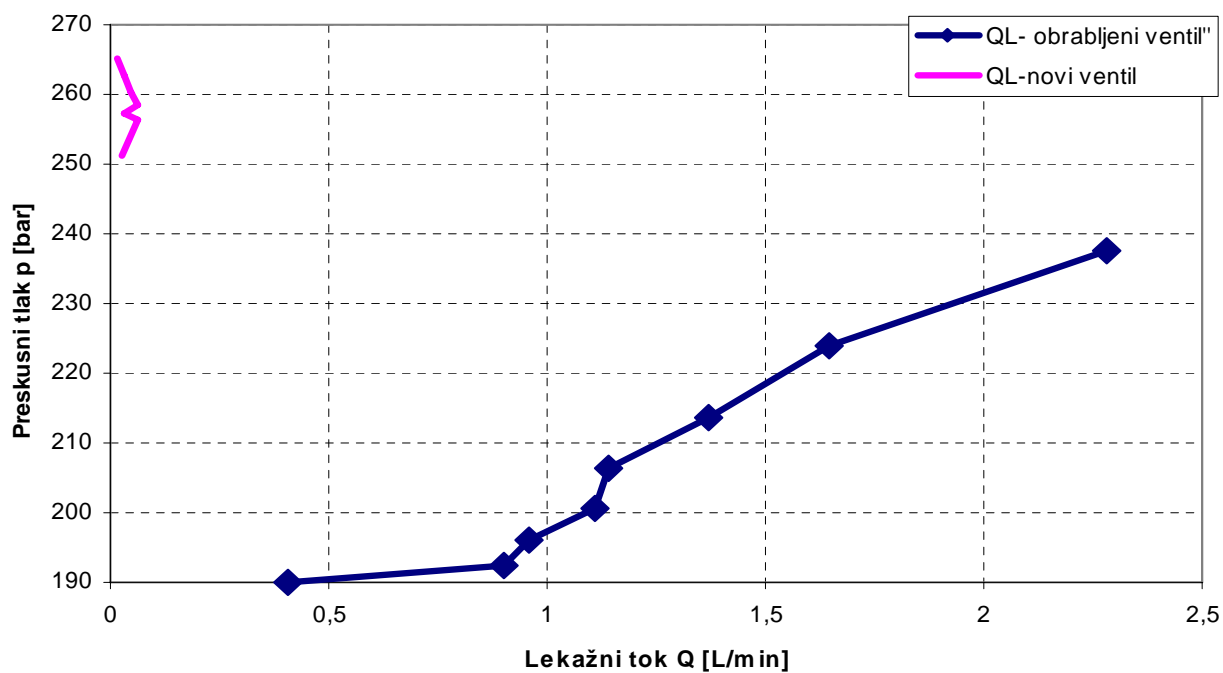
Slika 16: $p - t$ diagram poteka merjenja lekaže s HA (obrabljen ventil)

Prikaz spremembe tlaka v HA (meritev št. 100-15)



Slika 17: p – t diagram poteka merjenja lekaže s HA (novi ventil)

p - Q_L



Slika 18: Diagram p - Q_L pri merjenju lekaže s HA (leva krivulja novi ventil in desna krivulja obrabljeni – izmet)

5. Analiza vpliva višine reže na notranje puščanje

Višina reže s ima po en. za izračun lekaže [9] največji vpliv na lekažo, saj je na tretjo potenco. Za kolikokrat se poveča lekaža, če se reža poveča z višine s_1 na višino s_2 , se izračuna po en. 5.1.

$$\kappa = \frac{s_2^3}{s_1^3} \quad (5.1).$$

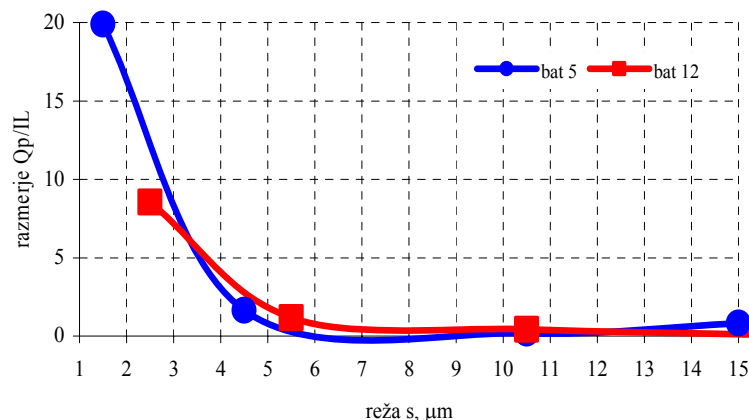
Povečanje višine reže s_1 / s_2 [μm]	Ime bata	Dolžina prekritja L [mm]	Dejansko povečanje	Računsko povečanje (po en. 7.1)	Razlika v povečanju lekaže (računsko / dejansko)
2,5 / 5,5	Bat 3	3	2,22	10,65	4,8
1,5 / 15	Bat 5	5	46	1000	21,7
2,5 / 15,5	Bat 12	12	56,8	238,33	4,2

Tabela št. 1: Vpliv višine reže pri mineralnem olju in tlaku 200 bar

Višina reže s [μm]	Ime bata	Dolžina prekritja L [mm]	Povprečna izmerjena lekaža $Q_{p,M (v-50^\circ\text{C}) \text{ povp}}$ [ml / min]	Računska lekaža – izsredna lega $Q_{L,ra\check{c},eksc}$ [ml / min]	Razlika v povečanju lekaže $Q_{p,M (v-50^\circ\text{C}) \text{ povp}} / Q_{L,ra\check{c}}$
2,5	Bat 3 2	3	23,4	1,73	18,72
5,5	Bat 3 1		51,9	18,37	2,83
1,5	Bat 5 3	5	12,5	0,22	56,81
15	Bat 5 1		576,9	223,5	2,58
2,5	Bat 12 4	12	3,3	0,43	7,67
15,5	Bat 12 1		185,9	102,76	1,81

Tabela št. 2: Vpliv višine reže pri mineralnem olju in tlaku 200 bar

Glede na tabelo št. 2 je razvidno, da največ odstopa lekaža pri majhnih režah v primerjavi z izračunanimi vrednostmi. To se dobro odraža tudi na sliki 21.



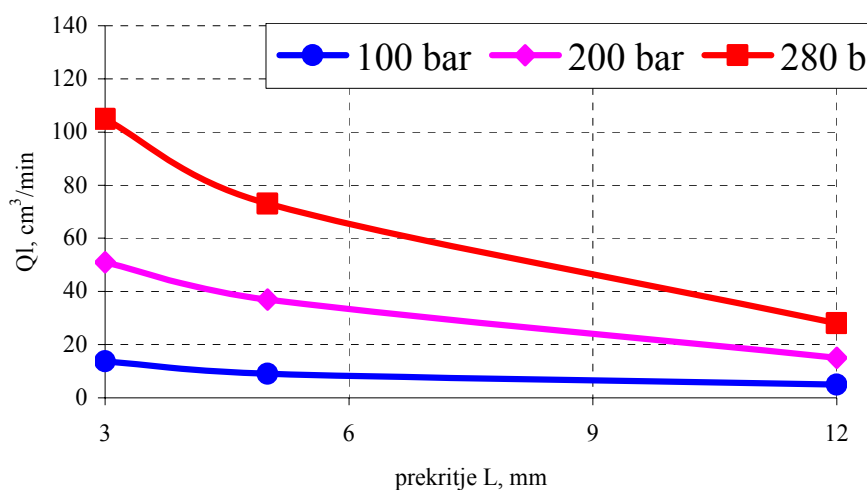
Slika 19: Prikaz merjene lekaže v odvisnosti od reže pri dveh različnih krmilnih batih (5 in 12 mm prekritje)

6. Analiza vpliva dolžine reže na notranje puščanje

Dolžina naleganja ima po literaturi [9] linearni vpliv; in sicer daljše kot je naleganje, manjša je lekaža.

bat	Prekritje [mm]	Višina reže [μm]	tlak [bar]	Povprečna izmerjena lekaža $Q_{p,M (v-50^{\circ}C) \text{ povp}}$ [ml / min]	Računska lekaža – izsrednja lega $Q_{L,rač,eksc}$ [ml / min]
Bat 3_2	3	2,5	100	6,5	0,86
			200	23,4	1,73
			280	49,5	2,4
Bat 5_2k_s	5	2,5	100	15,4	0,52
			200	49,8	1,04
			280	98,2	1,45
Bat 12_4	12	2,5	100	1,2	0,22
			200	3,3	0,43
			280	6,9	0,6

Tabela št. 3: Vpliv dolžine prekritja



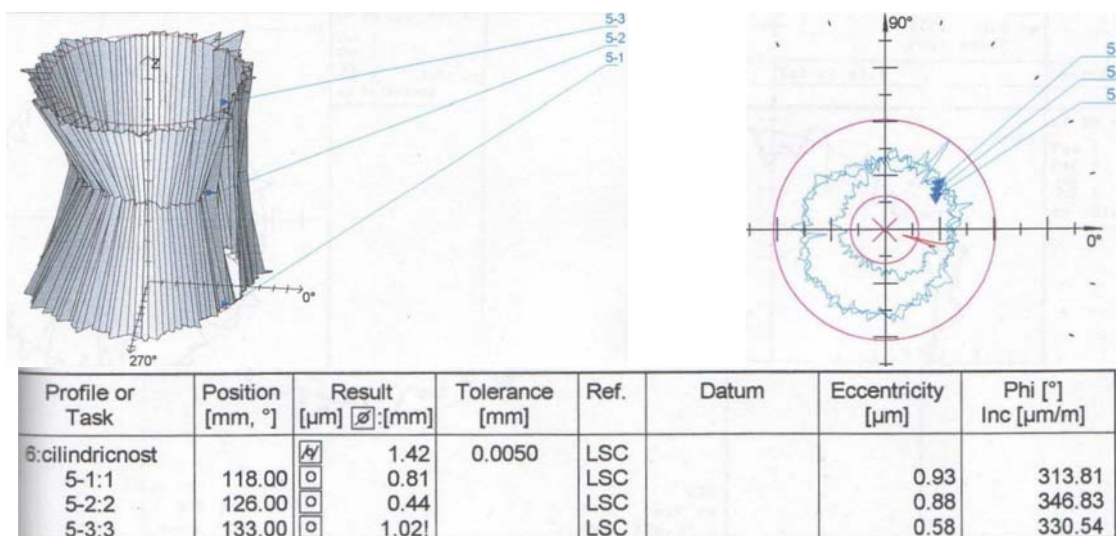
Slika 20: Prikaz odvisnosti notranjega puščanja od dolžine prekritja (meritev)

Če primerjamo lekažo pri batu 3_2 in batu 12_4 v odvisnosti od dolžine naleganja, zaradi linearne odvisnosti pričakujemo 4 x večjo lekažo ($12/3 = 4$) pri batu 3_2 zaradi 4x krajše dolžine naleganja pri istih tlakih in isti reži (tabela št. 3 in 4).

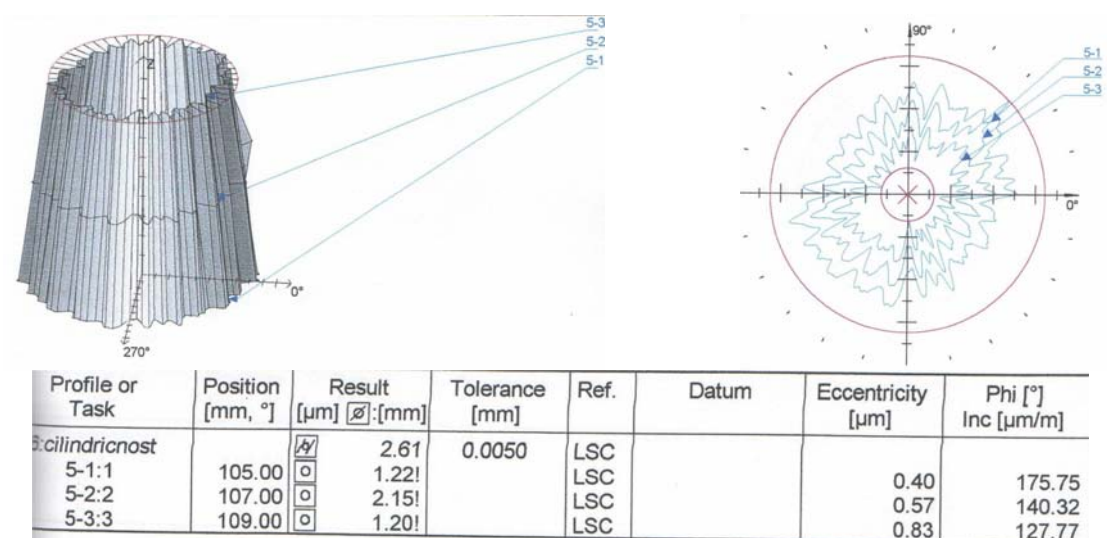
Bat 3_2				
Bat 12_4	tlak	100 bar	200 bar	280 bar
	100 bar	5,42		
	200 bar		7,09	
	280 bar			7,17

Tabela št. 4: Dejansko razmerje med lekažami (**računsko bi moralo biti 4**) pri batu 3_2 in 12_4

Pri batu št. 5_2k_s so na prvi pogled popolnoma nerazložljivi odstopki – pričakovane so manjše lekaže – zaradi krajšega prekritja. Te odstopke (večje lekaže) lahko razložimo le ob upoštevanju nepravilnosti konture valja krmilnega bata in izvrtine (slika 22 in 23).



Slika 21: Prikaz nepravilnosti oblike valja honane izvrtine (poz. 2 na sl.12)



Slika 22: Prikaz nepravilnosti oblike valja preskusnega bata št. 5_2k_s (poz. 1 na sl. 12)

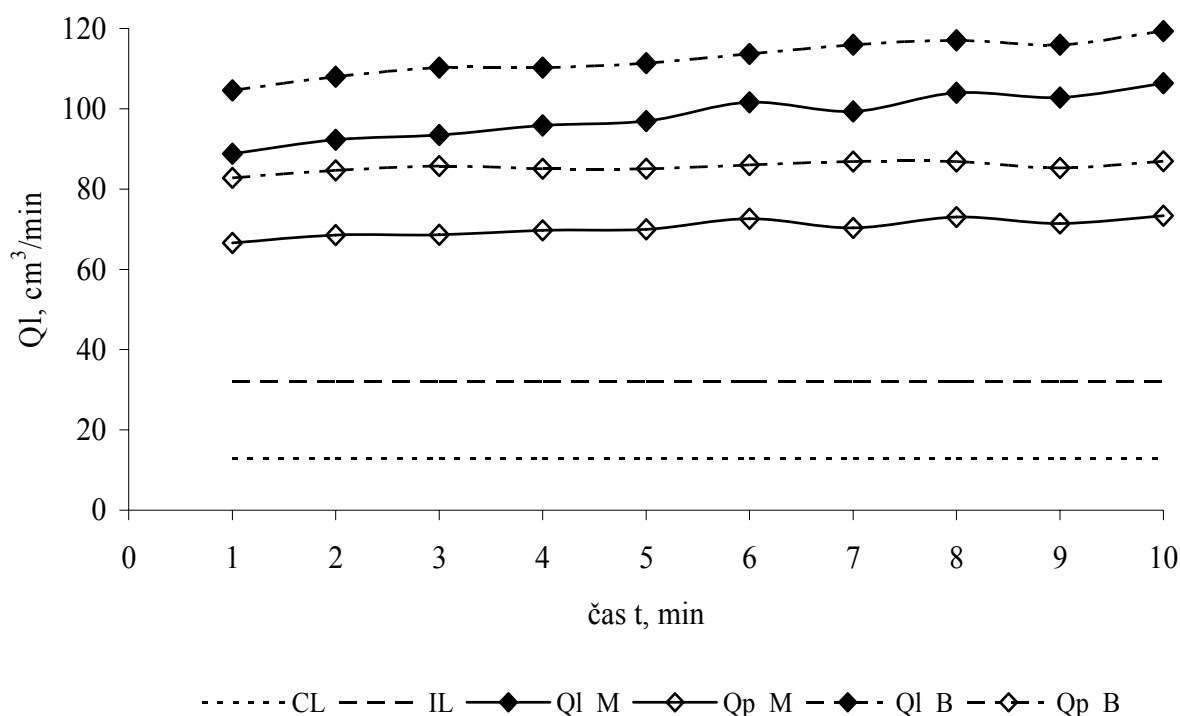
7. Pretakanje rastlinskega in mineralnega olja skozi kolobarjaste reže

Primerjalna analiza nam pokaže, da enako povečanje višine reže bolj poveča lekažni pretok pri rastlinskem kot pri mineralnem hidravličnem olju. Po matematičnem modelu to ni razložljivo
Sklep za bat 3 (3 mm prekritje):

Pri višjem tlaku povečanje reže prinese skoraj enako razmerje povečanja lekaže. Lekaža v primeru povečanja reže za 2,2 krat (s 2,5 μm na 5,5 μm) je pri rastlinskem olju 4,33 krat večja, medtem ko je pri mineralnem olju večja le za 2,12 krat. Pri višjem tlaku povečanje reže prinese skoraj enako razmerje povečanja lekaže (2,18 kratno za mineralno olje in 2,74 kratno pri rastlinskem olju).

Sklep za bat 12 (12 mm prekritje): Pri batu 12 je 4 x daljše prekritje kot pri batu 3, se tu zato pri povečanju reže bistveno ne odraža razlika med rastlinskim in mineralnim oljem. Pri višjem tlaku povečanje reže prinese skoraj enako razmerje povečanja lekaže.

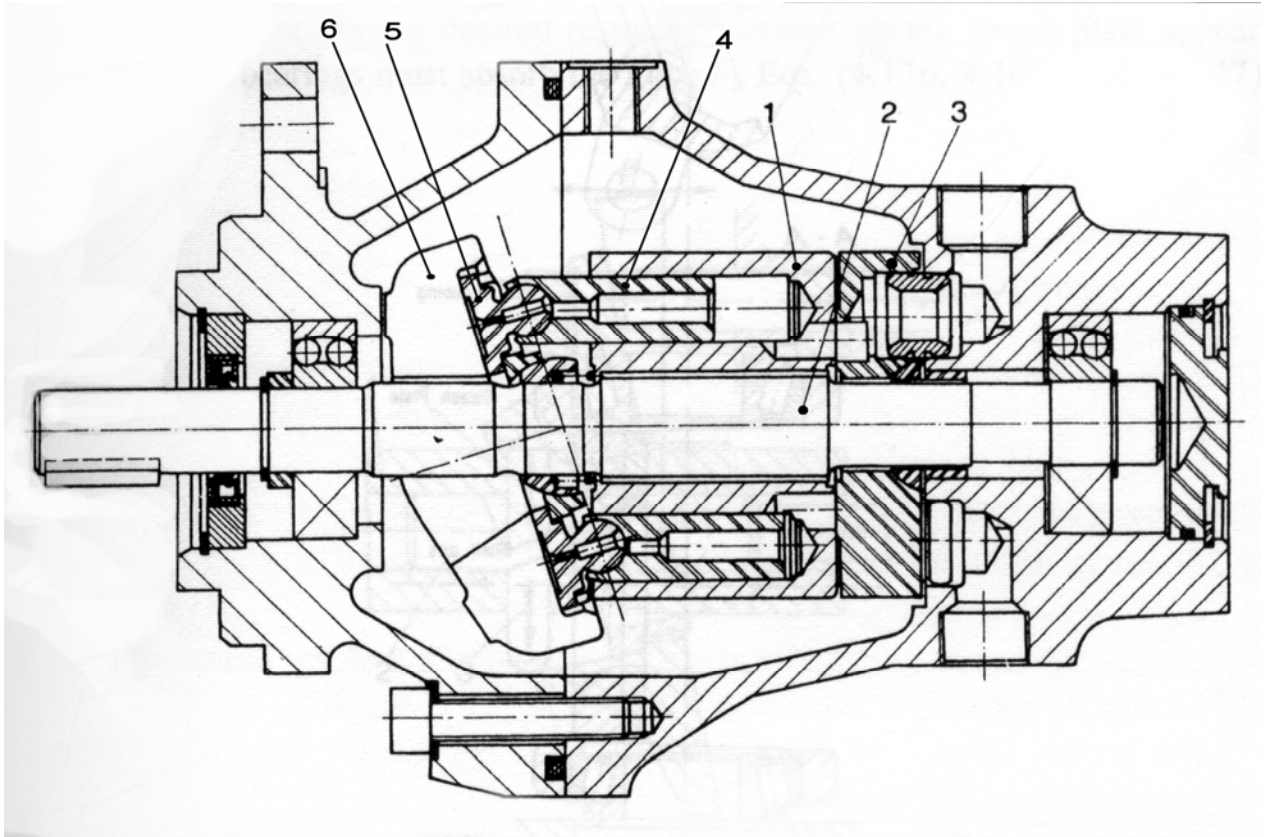
Sklepna ugotovitev: Skoraj v vseh merjenih primerih je lekaža z mineralnim oljem pri enakih pogojih manjša od lekaže z rastlinskim oljem.



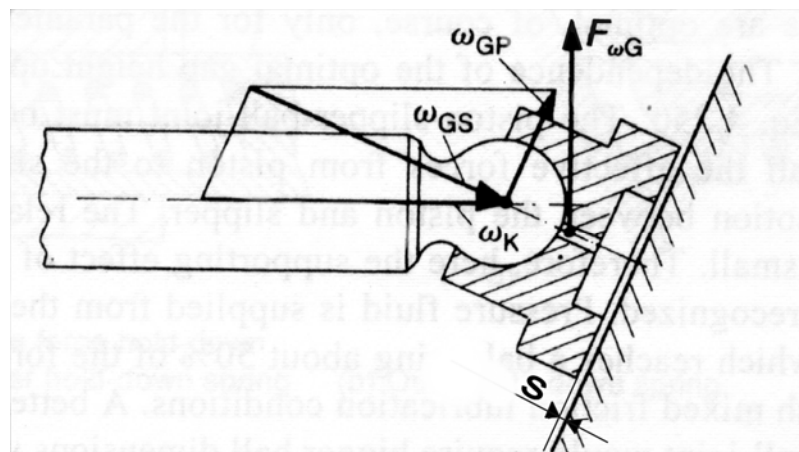
Slika 23: Prikaz lekaže pri mineralnem olju (označeno z M – polna črta) in pri rastlinskem olju (označeno z B – črta/pika). S črtkano črto je prikazana izračunana vrednost lekaže za maksimalno izsredno lego bata v izvrtini (oznaka IL), z pikčasto črto pa so prikazane izračunane vrednosti lekaže za središčno lego bata v izvrtini (oznaka CL), Q_{l_M} ... merjena lekaža za mineralno olje, Q_{l_B} ... merjena lekaža za rastlinsko olje, Q_{p_M} ... preračunana lekaža za mineralno olje na konstantno kinematično viskoznost, Q_{p_B} ... preračunana lekaža za rastlinsko olje na konstantno kinematično viskoznost

8. Trde prevleke v hidravliki

V okviru ene od raziskav na Centru za tribologijo, tehnično diagnostiko in hidravliko (CTD) smo testirali vpliv trdih prevlek na podaljšanje obrabne obstojnosti (predvsem drsnih čevljev) pri aksialnih batnih hidravličnih črpalkah.



Slika 24: Prikaz tipične zgradbe aksialne batne črpalke z nagibno ploščo



Slika 25: Drsní čevljev v kontaktu z nagibno ploščo



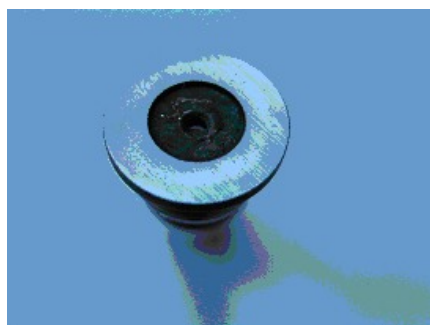
Slika 26: Dvojno hidravlično preskuševališče



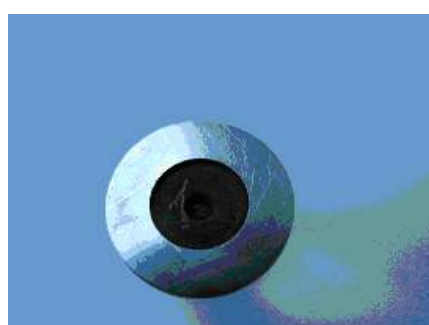
a



b



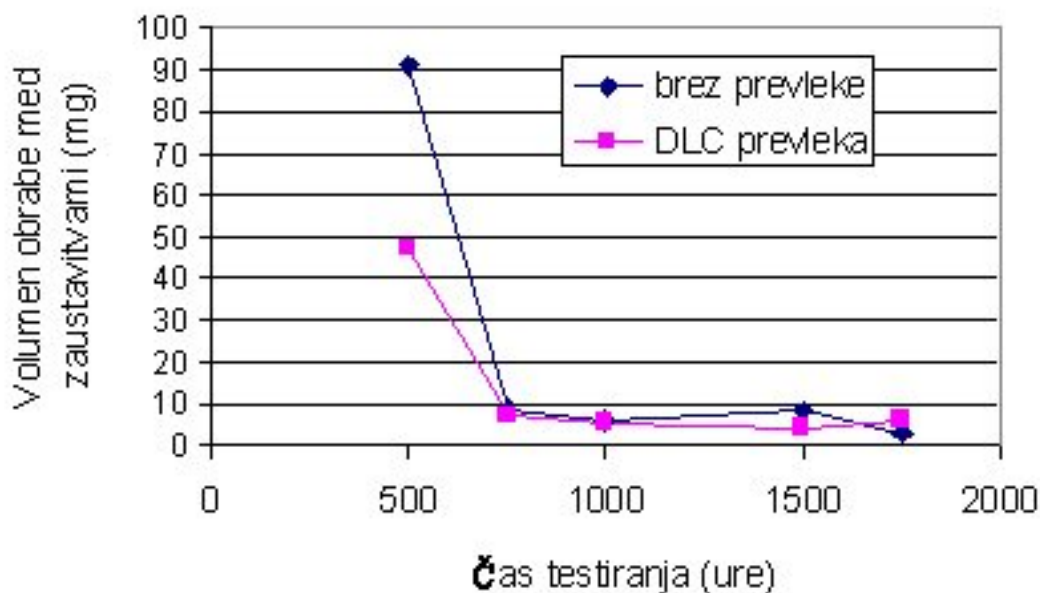
c



d

Slika 27: Fotografija obrabnih površin drsnih čoveljcev batka po 500 urah na (a) DLC-prevlečenem čoveljcu, (b) jeklenem (originalnem) čoveljcu ter po 1750 urah na (c) DLC-prevelečenem čoveljcu, (d) jeklenem čoveljcu

Parametri preskušanja: tlak 180 bar, čistoča NAS 1638 – za 1 do 2 razreda pod zgornjo dovoljeno mejo).



Slika 28: Volumen obrabe na klasičnem jeklenem, neprevlečenem čveljcu ter DLC-prevlečenem čveljcu (razlika v obrabi med posameznimi zaustavitvami) po 500, 750, 1000, 1500 in 1750 urah.

9. Zaključki

Na podlagi prikazanih posnetkov narejenih z elektronskim mikroskopom (SEM), posnetkov oblike in hrapavosti površine ter meritvami lege in dimenzije posameznih robov (v ohišju in na batu) lahko z zadovoljivo natančnostjo napovemo velikost lekaže.

Pokazalo se je, da se ob časovno toliko dolgi uporabi, ko se pokaže znatno povečanje notranjega puščanja pokaže:

- izrazita sprememba topologije površine – z vidika kvalitete površine in
- dimenzijska sprememba bata in predvsem ohišja – obraba.

Primerjalna analiza meritev lekaže in rezultatov pridobljenih s pomočjo računskega modela je pokazala, da je vpliv nepravilnosti konture lahko znatno večji kot vpliv višine reže. Računski model, ki je sicer splošno znan iz literature [8], je namreč izdelan za idealno konturo krmilnega bata in izvrtine. Med izvajanjem matematičnega modela za nepravilno obliko konture, ki smo jo lahko matematično popisali smo ugotovili, da imajo že nepravilnosti konture izpod 1 μm znaten – celo 2 kraten vpliv na velikost prečne sile; primerjano na idealno obliko sicer konične konture.

S preskusom je dokazano, da je možno z zagotovitvijo konstantne temperature hidravlične tekočine glede na notranje puščanje zamenjati mineralno hidravlično olje z rastlinskim, saj se lekaže bistveno ne razlikujejo, čeprav je glede tega rastlinsko olje nekoliko večja.

Laboratorijski poskus na aksialnih batnih črpalkah je dokazal, da uporaba trdih prevlek v hidravliki lahko pripomore k manjši obrabi in posledično daljši življenjski dobi, vendar je treba izrazito upoštevati vrsto spremljajočih parametrov in pogojev v katerih sestavine delajo.

Za sponzorstvo pri raziskavah se zahvaljujemo firmi KLADIVAR Žiri d.o.o.

10. Literatura

- [1]Georg Jacobs: *VERSCHLEISSVERHALTEN HYDRAULISCHER PUMPEN UND VENTILE BEIM BETRIEB MIT FESTSTOFFVERSCHMUTZTEM ÖL*; Aachen, Nemčija, 1993, Fotodruck J. Mainz GmbH
- [2] Heinz Zoehl: *FILTRATIONSTECHNIK*; Renningen – Malmsheim, Nemčija 1996, Expert Verlag
- [3] S. Lehner: *VERSCHLEISSWECHSELWIRKUNGEN IN HYDRAULISCHEN KOMPONENTEN DURCH FESTSTOFFVERSCHMUTZUNG DES DRUCKMEDIUMS*; Aachen, Nemčija, 1996, Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag
- [4]Kladivar d.d.: Katalogi potnih ventilov – <http://www.kladivar.si>,
- [5]Moog: Katalog servoventilov – <http://www.moog.com>,
- [6]Horst Czichos, Karel Heinz Habig: *TRIBOLOGIE HANDBUCH*, Reibung und verschleiss, Berlin, 1992, Verlag Vieweg mbH.
- [7]Bosch – Rexroth : Katalogi hidravličnih sestavin – <http://www.boschrexroth.com>
- [8]Kunc A.: Diplomaska naloga visokošolskega študija – *PRETAKANJE SKOZI REŽE V HIDRAVLIČNIH VENTILIH*, Ljubljana 2003
- [9]J. Pezdinik: *TOK TEKOČINE SKOZI REŽE V HIDRAVLIČNIH SESTAVINAH*, Strojniški vestnik 47, (2001) 5, str 1-7
- [10] Mannesmann Rexroth: Der Hydraulik Trainer, Band 3, *PROJEKTIERUNG UND KONSTRUKTION VON HYDOANLAGEN*, 1988
- [11] <http://ft.fs.uni-mb.si> - Informacije o strokovnem srečanju FLUIDNA TEHNIKA 2005.
- [12] D. Findeisen, F. Findeisen: *ÖL HYDRAULIK*, ISBN 3-540-54465-8, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 1994