

VPLIV ČISTOČE OLJA NA TRAJNOST DELOVANJA HIDRAVLICNEGA POTNEGA VENTILA

Domen Barbiš, Nejc Novak, Ana Trajkovski, Franc Majdič

Izvleček:

Hidravlični sistemi so zelo pogosti v industriji in ostalih tehničnih področjih. Za krmiljenje se najpogosteje uporabljajo drsniški potni ventili, ki pa na krmilnih batih nimajo tesnil. To povzroča notranje puščanje. Stabilnost puščanja je zelo odvisna od čistoče hidravlične tekočine. Raziskava obravnava vpliv čistoče hidravličnega olja na trajnost in notranje puščanje obravnavanega drsniškega potnega ventila. V okviru raziskave je bilo zasnovano in sestavljeno hidravlično preizkuševališče, na katerem smo izvedli tri trajnostne teste hidravličnega 4/3-potnega ventila. Pri posameznem testu smo v hidravlično olje dodali različno količino testnega prahu MTD, ki je priporočen za izvedbo pospešenega testiranja. Ventil smo preklapljali s frekvenco 4 Hz do doseženih 2 milijona ciklov. Na ventilu smo merili notranje puščanje voda A in B s pomočjo dveh merilnih valjev in štoparice. To je ob povečanju količine testnega prahu vidno naraščalo. Po izvedenih testih smo prerezali ohišja in pogledali obrabo drsnih površin ohišij in batov testiranih ventilov.

Ključne besede:

hidravlika, preizkuševališče, čistoča olja, potni ventil, trajnostni testi, testni prah, obraba drsnih površin ventila

1 Uvod

Strojništvo je zelo razširjena tehniška veda, ki je v današnjih časih prisotna skoraj na vsakem koraku našega življenja. Pokriva veliko različnih in zelo širokih področij, kot so konstruiranje, energetika, letalstvo, mehatronika, optimizacija proizvodnih procesov. Zelo pomembno področje pa je tudi hidravlika, ki je prisotna v proizvodnih procesih, avtomobilski industriji, letalski industriji, kmetijstvu, gradbeništvu, transportnih tehnikah, ... Njen osnovni namen je prenos energije z enega na drugo mesto, opravlja pa različne naloge, kot so krmiljenje, vpenjanje obdelovancev, pomiki orodij, rezanje pločevine, sodeluje pri pogonskih sklopih strojev, prenosih moči, kontrolirano poganja različne kmetijske, gradbene, gozdarske, rudarske in druge priključke ipd.

Za delovanje hidravličnega sistema potrebujemo elektromotor ali motor z notranjim zgorevanjem, ki preko pogonske gredi poganja črpalko. S pomočjo hidravlične tekočine se energija prenaša naprej po cevovodih do hidravličnega aktuatorja, kjer se ta spet pretvori v mehansko energijo.

V hidravličnem sistemu je najpomembnejša sestavina hidravlična tekočina, ki skrbi za prenos energije od izvora do porabnika. To je njena primarna fizikalna naloga. Deluje tudi kot mazalno sredstvo in pripomore k manjši obrabi gibajočih se delov sistema, ščiti hidravlične sestavine pred korozijo in drugimi kemičnimi spremembami. Optimalnost delovanja sistema bo zagotovljena, če bo hidravlična tekočina ustrezno čista [1], [2].

2 Čistost hidravlične tekočine

2.1 Kontaminacija

Kontaminacija oz. onesnaženje hidravličnih tekočin je neizogibno. Kontaminanti lahko pridejo v tekočino že v procesu proizvodnje, med transportom, skladiščenjem, pri pretakanju v hidravlične naprave in na koncu tudi med uporabo. Popolna preprečitev kontaminacije je praktično nemogoča. Pomembno pa je, da lahko izmerimo stopnjo čistosti hidravlične tekočine in na ta način določimo, ali je še primerna za uporabo. Stopnjo čistosti hidravlične tekočine vzdržujemo s filtracijo. Tekočina mora imeti ustrezno filtrabilnost, filtri pa morajo biti kakovostni in skrbno izbrani [1].

Sami kontaminanti so lahko v trdnem, tekočem ali plinastem stanju, lahko so raztopljeni v tekočini, lahko so emulgirani. Poznamo organske in anor-

Domen Barbiš, dipl. inž., Nejc Novak, mag. inž., dr. Ana Trajkovski, univ. dipl. inž., doc. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

ganske kontaminante, glede biološkega stanja pa so lahko živi in neživi.

Izvor kontaminantov je pomemben, saj lahko na ta način določimo ustrezne preventivne ukrepe za odstranitev, omejitev ali celo izključitev kontaminantov iz hidravlične tekočine. Izvori so lahko vgrajeni delci – prah, vlakna čistilnih krp, odrezki iz obdelave, lahko pride do nastanka delcev med obratovanjem – obraba kovin in tesnil, rja, delci filtrov in gumijastih cevi, ali pridejo v hidravlično tekočino iz okolice – vstop skozi oddušnike, vstop na slabih tesnilih in drugih odprtinah med obratovanjem ali pa jih vnesemo pri dolivanju tekočine v sistem. V praksi gre največkrat za trdne delce, pogosta kontaminanta pa sta še voda in zrak [3].

2.2 Merjenje čistosti hidravlične tekočine

Za merjenje stopnje čistosti hidravlične tekočine so definirani mednarodni standardi. Na vzorcu tekočine moramo preveriti številčno prisotnost delcev v različnih velikostnih razredih, ki jih predpisuje standard. To se ugotavlja s pomočjo avtomatskih števec delcev.

Najbolj pogost je standard ISO 4406. Uveden je bil leta 1977, kasneje pa večkrat modificiran. V standardu imamo preglednico, v kateri so zapisane stopnje čistosti od razreda 0 do 28 glede na spodnje in zgornje število delcev. Med posameznimi stopnjami se tako minimalno kot maksimalno število delcev razlikujeta za faktor dva. Standard nam podaja podatke o številu delcev treh velikostnih razredov, in sicer o delcih, večjih od 4 μm , 6 μm in 14 μm v enem mililitru kapljevine. Končna oblika zapisa stopnje čistosti po ISO-standardu je npr. 19/18/15, pri čemer prvo število predstavlja delce, večje od 4 μm , drugo delce, večje od 6 μm , in tretje delce, večje od 14 μm [3], [4].

V preteklosti se je uporabljal tudi ameriški standard NAS 1638, ki pa ga je z izboljšavami nadomestil standard SAE AS 4059. Podajanje stopnje čistosti je v tem standardu drugačno. Zapis, ki nam ga poda avtomatski števec delcev, je npr. 9A/8B/8C/6D/4E/1F, pri čemer črke predstavljajo velikostne razrede delcev glede na kalibracijo, številke pa razred števila delcev [3], [5]–[7].

3 Mehanizmi obrabe znotraj hidravličnih sestavin

3.1 Abrazija

Abrazivna obraba se pojavi, ko drsno površino obremenimo z delci, ki imajo enako ali večjo trdoto od osnovnega materiala. Kot primer lahko vzamemo obrabo izkopnih žlic pri delovnih strojih. Tudi v primeru opravka z na prvi pogled mehkiimi materiali lahko pride do abrazivne obrabe, če so v njih trdi delci. Pri nadzoru abrazivne obrabe imamo obi-

čajno težave, saj izraz skoraj vedno združuje več različnih mehanizmov obrabe, ki delujejo hkrati in usklajeno, imajo pa različne lastnosti. Najbolj pogost mehanizem pri abraziji je rezanje.

Mehanizem rezanja je klasični model, kjer ostro zrno reže mehkejšo površino. Odrezani material se odstrani kot ostanek obrabe. Tako odrgnjen material je lahko krhek, npr. keramika, in lahko pride do loma obrabljene površine [8].

3.2 Erozija

Erozivna obraba se kaže kot posledica udarca predvsem trdnih ali tudi tekočih delcev ob površino predmeta. Pojavlja se pri različnih strojih, tipičen primer pa so poškodbe lopatic plinskih turbin pri letenju letala skozi oblake prahu in pa obraba rotorjev črpalke. Pri erozijski obrabi so pomembni dejavniki material delcev, udarni kot, udarna hitrost in velikost delcev. Če so delci trdi in trdni, obstaja možnost, da pride do abrazivne obrabe. Ko imamo opravka s tekočimi delci, do abrazije ne pride, obrabni mehanizmi so takrat posledica ponavljajočih se obremenitev zaradi udarcev.

Veliki udarni koti povzročajo mehanizme obrabe, ki so značilni za erozijo, npr. lom, plastično deformacijo z nastankom kosmičev ali krhki lom. Tudi hitrost erozivnega delca močno vpliva na obrabo. Če je hitrost zelo majhna, so napetosti ob udarcu premajhne za nastanek plastične deformacije, zato nastane obraba, ki je posledica utrujenosti površine. Povečanje hitrosti, npr. 20 m/s, lahko povzroči plastično deformacijo. Do obrabe torej pride zaradi ponavljajoče se plastične deformacije [8].

3.3 Kavitacija

Kavitacija je pojav nastajanja in izginjanja parnih mehurčkov v kapljevini. Tipičen primer kavitacijske obrabe so poškodbe propelerjev in turbinskih lopatic, ki delujejo v mokri pari. Obraba napreduje z nastajanjem serije lukenj ali jam na površini, izpostavljeni kavitaciji. S takim procesom lahko postopoma pride do uničenja celotne komponente stroja. Kavitacijske poškodbe lahko privedejo tudi do močnih vibracij, npr. propelerjev, ki jim s tem omejijo delovanje.

Značilnost kavitacije je ciklično nastajanje in sedanje mehurčkov na trdni površini v stiku s kapljevino. Nastanek mehurčkov povzroči sproščanje raztopljenega plina iz kapljevine, kjer vzdržuje tlak blizu ničle ali podtlak. Ta se običajno pojavi, ko tok kapljevine vstopi v razhajajočo se geometrijo, tj. iz cevi z majhnim premerom v cev z velikim premerom. Posebej nagnjene h kavitaciji so ostre spodnje strani predmetov, ki se premikajo v tekočini, npr. ladijski propeler. Najboljša metoda za preprečevanje kavitacije je izogibanje podtlakom v bližini površin, vendar je v praksi to običajno nemogoče [8].

3.4 Korozija

Korozija je vrsta obrabe, ki privede do razpadanja/razkrajanja površine kovin kot posledica kemičnih reakcij. Korozivna obraba je splošen izraz, ki se nanaša na katero koli obliko obrabe, ki je posledica kemijske reakcije ali korozivnega procesa, medtem ko oksidativna obraba nastane zgolj zaradi atmosferskega kisika. Do kemijske reakcije pride med obrabljenim materialom in korodirajočim medijem, ki je lahko kemijski reagent, reaktivno mazivo ali celo zrak. Tako korozivni kot oksidativni obrabi je skupno, da običajno nastajata ob zmanjšanem koeficientu trenja.

Površinske kemične reakcije so lahko koristne pri preprečevanju adhezivne obrabe, vendar lahko povzročijo znatno izgubo osnovnega materiala, če jih ne nadzorujemo. Če je kovina korodirana (na površini se ustvari film) in hkrati izpostavljena drsečemu stiku, lahko pride do nastanka trajnega mazalnega filma – zavira tako korozijo kot obrabo, šibkega mazalnega filma – zaradi rednega nastajanja in uničenja filma lahko pride do visoke stopnje obrabe ali do obrabe zaščitnih površinskih filmov [8].

3.5 Adhezivna obraba

Adhezivna obraba se najpogosteje pojavi v primeru uporabe obeh drsniških elementov (krmilni bat – ohišje ali puša) iz istega materiala. Visok tlak v skupni kontaktni točki med drsniškim batom in izvrtino lahko povzroči zlepljenje obeh elementov. Povečana aksialna sila povzroči odtrganje materiala enega ali obeh zlepljenih elementov. Tako dobimo poškodbe površine, obrabne delce in povečano notranje puščanje [10].

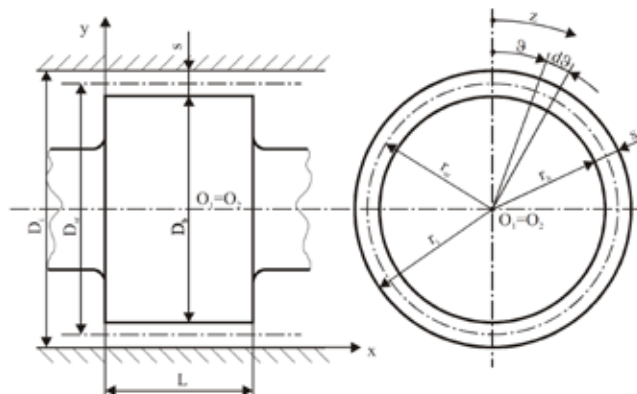
4 Notranje puščanje

Reže so prisotne v skoraj vseh hidravličnih sestavinah, razen v skupini pasivnih sestavin (rezervoarji, cevovodi, filtri ...), kjer takih rež po večini ne zasledimo [9]. V pogonsko-krmilni hidravliki (PKH) imamo z besedo reža v mislih prostor, ki se nahaja med dvema elementoma, največkrat pa imata ta elementa kovinske površine. Njena višina mora biti zelo majhna v primerjavi z njeno dolžino in širino. Elementi, med katerimi se tvori reža, imajo običajno ravne ali ločne oblike [9].

V hidravličnih sestavinah bi bilo idealno in zaželeno imeti čim manjše reže, saj njihova velikost močno vpliva na volumetrični izkoristek HS in posledično tudi na izkoristek celotne hidravlične naprave. Določene reže pa so seveda nujno potrebne in neizogibne zaradi odstopanj oblik dejanskih elementov od idealnih ter zaradi temperaturne razteznosti kot posledice spremembe temperature med obratovanjem.

Če vzamemo primer bata v ohišju, imamo lahko centrično lego bata (*slika 1*), kjer se reža po višini ne

spreminja, lahko pa gre za izsredno lego bata in se v tem primeru višina reže spreminja.



Slika 1 : Centrična in hkrati soosna lega bata v izvrtini [9]

V končni enačbi (1) za notranje puščanje so vključeni naslednji parametri: tlačna razlika v reži (Δp), srednji premer v reži (D_{sr}), višina reže (s), gostota tekočine (ρ), kinematična viskoznost (ν) in dolžin prekritja v reži (L). Poleg omenjenih geometrijskih in fizikalnih lastnosti je v enačbi (1) vključen tudi koeficient ekscentričnosti, ki popisuje lego bata v ohišju. V primeru centrične lege ima koeficient vrednost $f_{c/eksc}=1$, najslabši možni primer pa je vrednost koeficienta $f_{c/eksc}=2,5$, ko gre za največjo možno izsredno lego.

$$Q_L = \frac{\pi \cdot \Delta p \cdot D_{sr} \cdot s^3}{12 \cdot \rho \cdot \nu \cdot L} \cdot f_{c/eksc} \quad (1)$$

5 Pregled dosedanjih raziskav

Kitajski raziskovalci [10] so raziskovali obnašanje hkratnih učinkov adhezivne obrabe in abrazije treh teles na batnem ventilu iz ogljikovega jekla. Pred eksperimentom so nastavili matematični model in z njim ocenili pričakovane rezultate. Testirali so deset ventilov v različnih kontroliranih pogojih. Po izvedenem preizkusu so prišli do zaključka, da sta pri modelu dvojnega načina obrabe ključna dejavnika temperatura olja in tlak, saj znatno vplivata na stopnjo obrabe. Z naraščanjem temperature se povečuje stopnja obrabe, vendar zelo počasi. Veliko večji in opaznejši vpliv na obrabo ima tlak hidravlične tekočine. Z mikroskopskimi posnetki so iz začetne gladke površine bata ventila opazili preoblikovanje materiala zaradi strižnega loma adhezijskih točk. Opazili so tudi raze na površini bata, ki so bile posledica tritelesne abrazije.

Prav tako so kitajski raziskovalci [11] raziskovali vplive erozije na ostrih in zaobljenih robovih bata in ohišja ventila ter kombinacijah le-teh. Izvedli so tudi numerične simulacije pretoka skozi različne kombinacije robov. Ugotovili so, da lahko rob na odprtini

ventila zlahka povzroči nelinearno krmiljenje pretoka ventila in da so glavni vzrok za erozivne poškodbe robov ventila in ohišja neželeni delci v hidravlični tekočini. Raziskali so tudi vplive sklopljene abrazivne in adhezivne obrabe na zračno-hidravlični drsniški ventil [12].

Gregorc je v svoji doktorski disertaciji [13] ugotavljal vpliv trdno-tekočinskih zmesi na karakteristike hidravličnih strojev. Ugotovil je, da povečevanje koncentracije trdih delcev nima vpliva na obratovalne karakteristike turbin.

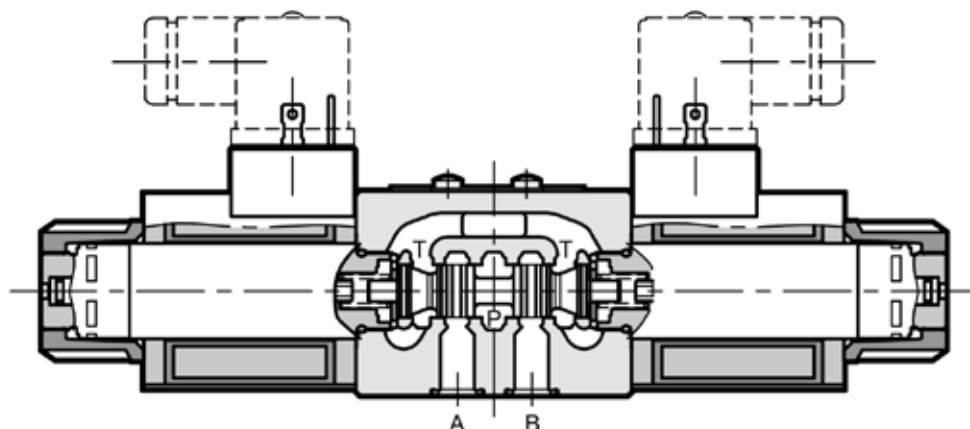
Majdič [14] je s sodelavci zasnoval vodno hidravlično preizkuševališče in testiral proporcionalni vodni ventil iz nerjavečega jekla z destilirano vodo kot hidravlično tekočino. Ugotovili so, da lahko tak ventil v industrijskih pogojih deluje več kot 10 milijonov ciklov, če je vzdrževana ustrezna čistost vode. Majdič pravi, da taki ventili iz nerjavečega jekla dobro delujejo pri blagih in običajnih pogojih delovanja, za zahtevnejše pogoje pa je raziskoval uporabno dobo vodno-hidravličnega ventila, katerega drsniške površine

so bile prevlečene z diamantu podobnim ogljikovim premazom (angl. diamond-like-carbon), ki je znan po lastnostih nizkega trenja [15]. Ugotovljene so bile precej manjše posledice obrabe na batu, notranje puščanje pa je bilo med celotnim testom skoraj konstantno, medtem ko je v primeru jeklenega bata brez protiobrabne prevleke počasi naraščalo.

6 Testirani hidravlični potni ventil in preizkuševališče

6.1 Preizkušane

Za testiranje smo uporabili Duplomaticov 4/3-potni ventil. Največji tlak, ki ga ta ventil dopušča na tlačnem vodu, je 350 bar, največji pretok pa 100 l/min. Drsniški potni ventili na krmilnih batih nimajo tesnil, kar privede do notranjega puščanja. Prerez ventila je prikazan na *sliki 2*, razstavljen ventil pred začetkom testiranja pa na *sliki 3*.



Slika 2 : Prerez testiranega ventila DS3-S1/11N-D24K1 [16]



Slika 3 : Razstavljen testirani ventil DS3-S1/11N-D24K1

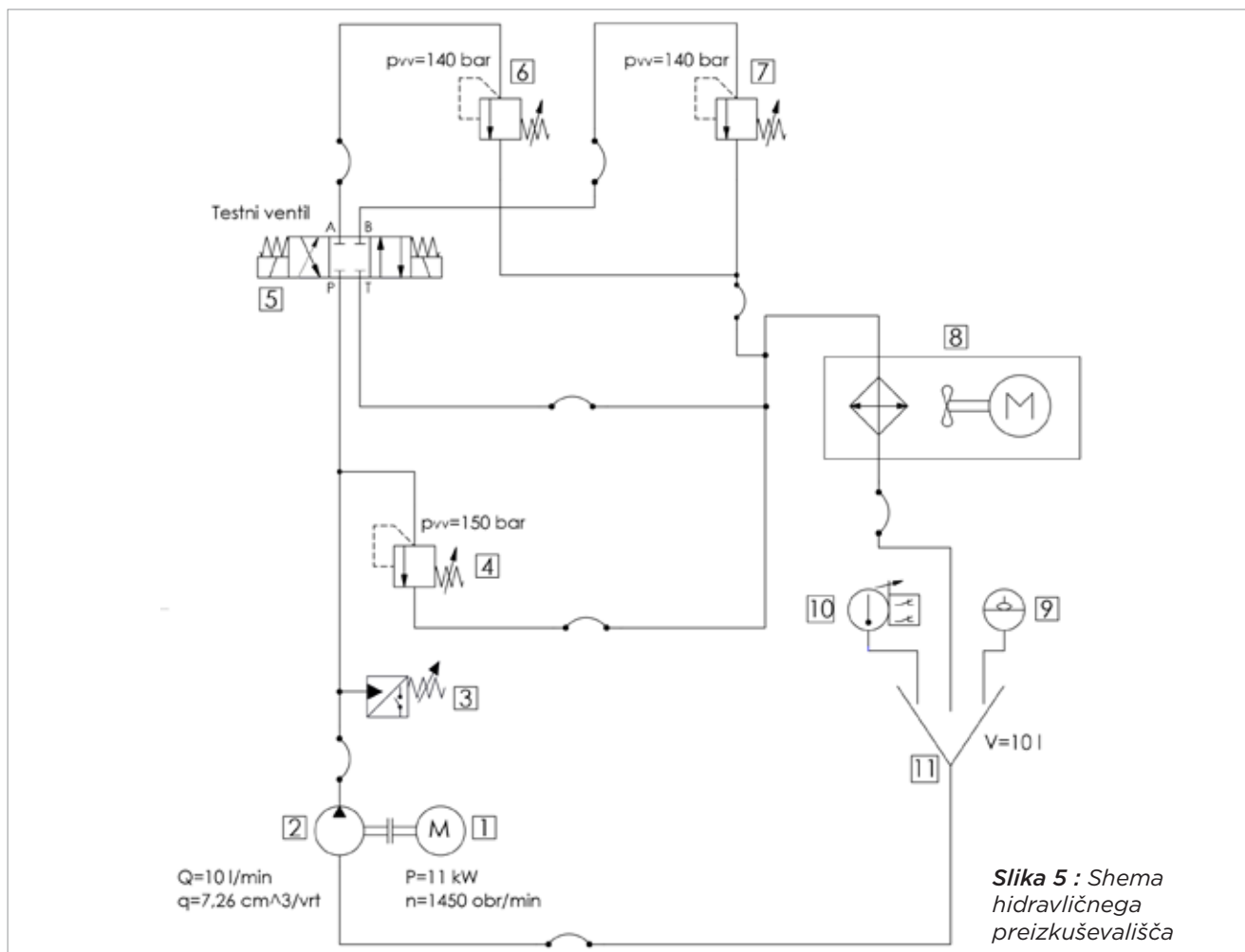
6.2 Preizkuševališče

Najprej smo zasnovali in izdelali hidravlično preizkuševališče. Uporabili smo 11-kilowatni elektromotor, ki preko zobatega jermena poganja hidravlično črpalko. Zaradi zagotavljanja čim boljšega pretoka dodanega testnega prahu v tekočino smo uporabili koničen rezervoar. Preizkuševališče je prikazano na *sliki 4*, njegova hidravlična shema pa na *sliki 5*.

Delovanje hidravličnega sistema je razvidno s sheme na *sliki 5*. Elektromotor (1) preko zobatega jermena poganja batno hidravlično črpalko (2) s keramičnimi bati. Črpalka črpa hidravlično olje iz koničnega rezervoarja (11) in ga potiska po cevovodu mimo tlačnega stikala (3), ki skrbi za izklop v primeru padca tlaka in varnostnega ventila (4), v tlačni vod testnega ventila (5). Olje po cevovodih nadaljuje pot čez vod A ali B potnega ventila preko varnostnih ventilov na posameznem vodu (6 in 7), nato se združi s T-vodom potnega in varnostnega ventila (4) in na koncu vse skupaj preko hladilnika s prisilnim zračnim hlajenjem (8) steče nazaj v konični rezervoar (11). V rezervoarju sta še nivojsko stikalo (9) in temperaturno stikalo (10), ki skrbita za izklop v primeru padca gladine olja oz. previsoke temperature.



Slika 4 : Hidravlično preizkuševališče



Slika 5 : Shema hidravličnega preizkuševališča

6.3 Potek preizkušanja

Po končani sestavi preizkuševališča smo v rezervoar preko filtrirne enote natočili 10 litrov mineralnega hidravličnega olja ISO VG 46. Zanimalo nas je, kakšno stopnjo čistosti bomo dosegli po filtraciji. Iz ogretega in delujočega sistema smo najprej vzeli vzorec olja, iz katerega je treba izločiti zrak, saj naprava za merjenje čistoče zračne mehurčke prepozna kot nečistoče v olju in meritev ni verodostojna. To smo izvedli tako, da smo vzorec olja v steklenički postavili v komoro, v kateri smo ustvarili vakuum. Na *sliki 6* sta prikazana odstranjevanje zraka in meritev čistoče vzorca hidravličnega olja.

Cilj naše raziskave je bil testirati tri 4/3-potne ventile istega tipa in velikosti. Testirali smo jih pri sistemskem tlaku 150 bar in pretoku 10 l/min. Varnostna ventila na vodu A in B testnega potnega ventila sta služila kot tlačno breme in sta bila na-



Slika 6 : Odstranjevanje zraka in meritev čistoče vzorca hidravličnega olja



Slika 7 : Toplotne razmere na hidravličnem preizkuševališču med testiranjem

stavljena na 140 bar. Temperatura olja v sistemu je bila med 70 °C in 75 °C, ventil pa smo neprestano preklapljali s frekvenco 4 Hz, dokler nismo pri vsakem dosegli 2 milijona ciklov.

Za testiranje potnih ventilov smo pri posameznem testu v olje dodali različne količine srednjega standardnega testnega prahu (MTD – Medium Test Dust). Pri testu drugega ventila je bila v olju dvakratna količina glede na test prvega ventila, pri testu tretjega ventila pa je bila dodana dvakratna količina glede na test drugega ventila in štirikratna količina glede na test prvega ventila.

Testni prah (MTD) smo v ogret delujoč sistem dodali tako, da smo preko merilnega priključka iz sistema vzeli približno 3 dl olja, vanj stresli določeno količino prahu za posamezen test, mešanico dobro pretresli, da se je tesni prah premešal, in vlili nazaj v sistem. Količina testnega prahu MTD v hidravlični kapljevini pri prvem testu je bila 0,167 g, pri drugem testu 0,333 g in pri tretjem 0,670 g.

Meritve notranjega puščanja smo izvajali za A- in B-vod ventila s pomočjo štoparice in dveh merilnih valjev. Merili smo dvakrat na dan, enkrat v dopoldanskem, drugič v popoldanskem času in pri vsakem merjenju postopek ponovili trikrat.

Med obratovanjem sistema smo toplotne razmere preverili tudi s termo kamero (*slika 7*) in ugotovili, da so temperature take, kot smo planirali.

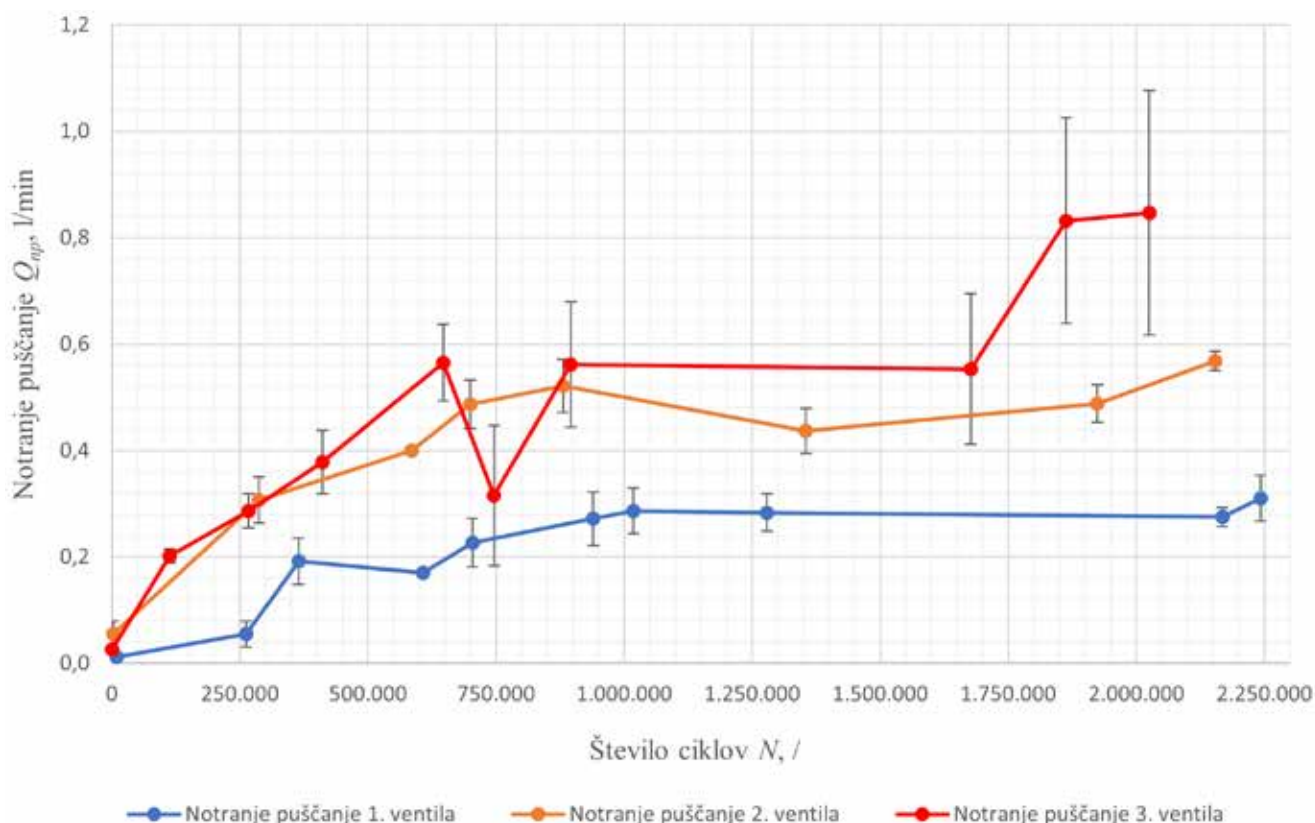
7 Rezultati testiranja

V okviru raziskave je bilo pridobljenih veliko rezultatov [17], nekaj pomembnejših je predstavljenih v nadaljevanju prispevka.

7.1 Meritve notranjega puščanja

Zanimal nas je vpliv različnih količin testnega prahu MTD na hitrost obrabe in posledično na večanje notranjega puščanja ventila. Primerjavo rezultatov meritev notranjega puščanja prikazuje *slika 8*.

Slika 8 prikazuje vsoto izmerjenega notranjega puščanja A- in B-voda za posamezni ventil. Opazi se, da je količina dodanega testnega prahu ključnega pomena pri naraščanju notranjega puščanja. To dejstvo je posebej opazno do 750.000 preklapov ventila. Med enim milijonom preklapov in zaključkom testiranja prvega in tretjega ventila lahko opazimo, da se pri prvem notranje puščanje poveča za majhno vrednost, medtem ko se pri tretjem poveča še za skoraj polovico. Končno notranje puščanje drugega ventila je v primerjavi s prvim skoraj dvakratno. Najvišje notranje puščanje na koncu testiranja tretjega ventila pa je skoraj trikratno v primerjavi s puščanjem prvega ventila.



Slika 8 : Primerjava izmerjenega notranjega puščanja vseh testiranih ventilov

Glede na to, da je količnik med količino testnega prahu MTD med tretjim in prvim testom enak 4, količnik notranjega puščanja pa malo manj kot 3, lahko trdimo, da notranje puščanje ne narašča sorazmerno glede na količino dodanega testnega prahu MTD.

Pri tretjem testu, s količino testnega prahu 0,670 g, smo se glede na meritve na opisanem preizkuševališču približali vrednosti puščanja enega litra na minuto, vendar ga še nismo dosegli. Ta vrednost še vedno ni kritična za odpoved ventila.

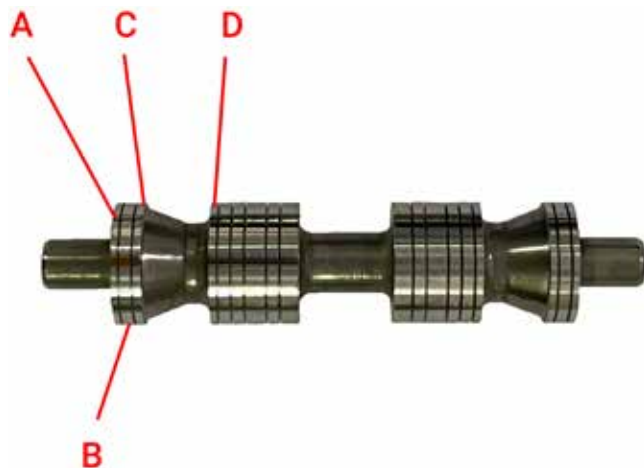
7.2 Obraba znotraj ventilov

Po končanih testih smo pod mikroskopom pogledali karakteristične površine na krmilnem batu testiranega ventila. Za lažjo predstavbo so na *sliki 9* prikazane označene površine bata. *Slika 10* prikazuje slike površin A, B in C vseh testiranih ventilov in enega novega ventila.

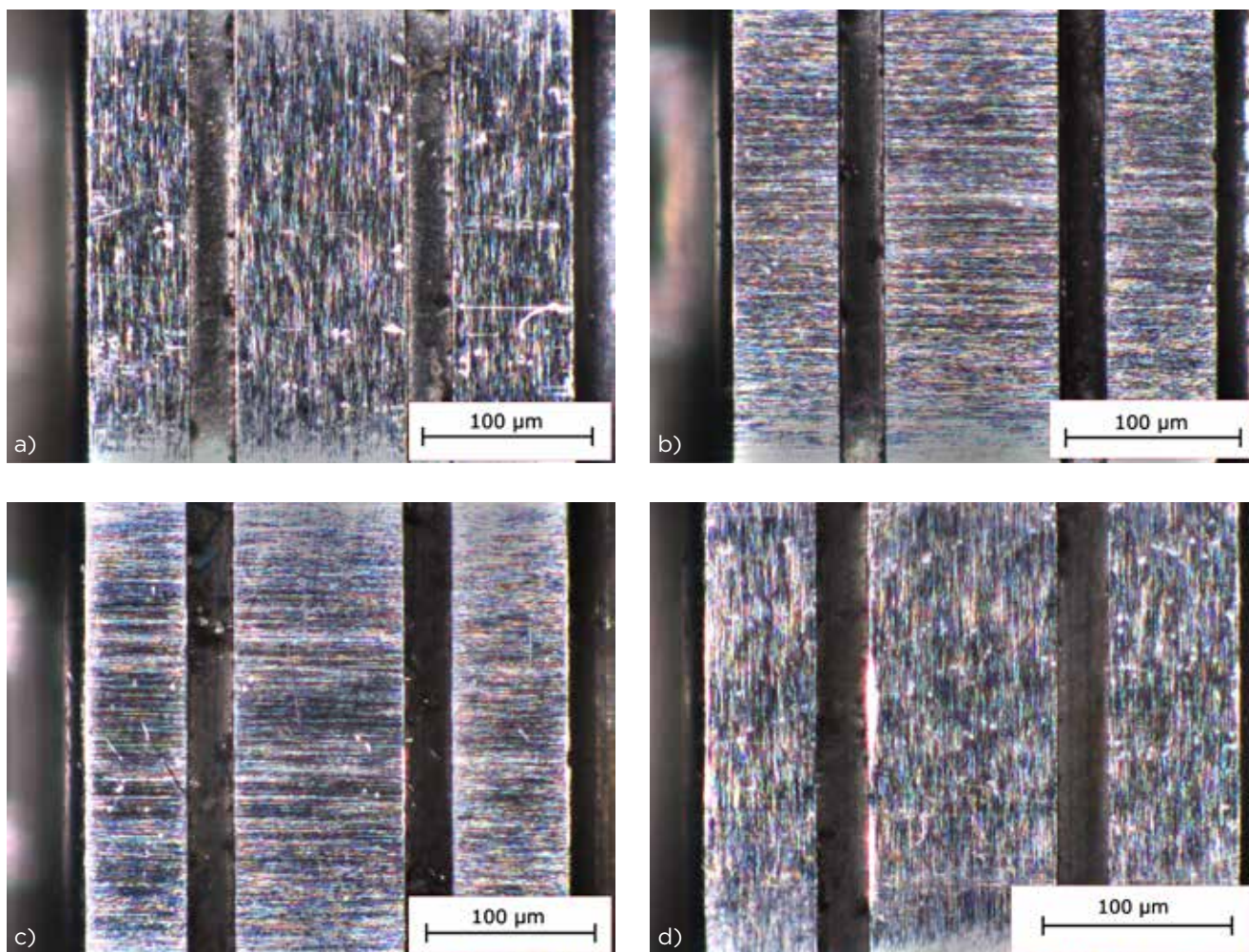
Na *sliki 10a* so prikazane površine prvega testiranega ventila pri dodanem testnem prahu 0,167 g in doseženih 2,25 milijona preklapov. Vidne so vertikalne raze kot posledica izdelave bata in nekaj horizontalnih raz, ki so posledica abrazije med batom in testnim prahom. Opazimo tudi nekaj luknjic v režah bata, ki so posledica erozije in/ali kavitacije.

Slika 10b prikazuje drugi bat, testiran pri 0,333 g dodanega testnega prahu v hidravličnem olju. S tem batom smo dosegli približno 2,15 milijona preklapov. Vertikalne raze, ki so posledica izdelave, niso več vidne. Opazne so goste horizontalne raze kot posledica abrazije med batom in testnim prahom MTD zaradi preklapljanja. Kot posledico erozije opazimo le nekaj luknjic na površini A.

Na *sliki 10c* je prikazan tretji bat z 0,670 g dodanega testnega prahu v hidravličnem olju. Enako kot pri drugem ventilu vertikalne raze, nastale zaradi



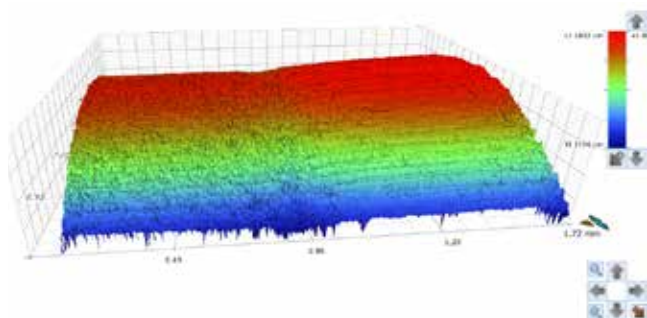
Slika 9 : Krmilni bat z označenimi opazovanimi površinami



Slika 10 : Površine testiranih batov A, B in C pri 80-kratni povečavi: a) prvega ventila, b) drugega ventila, c) tretjega ventila, d) novega ventila

izdelave, niso več vidne. Goste horizontalne raze so posledica abrazije med MTD testnim prahom in batkom. Vidno je tudi precej luknjic na vseh treh površinah, ki so najverjetneje posledica erozije. Opazimo jih tudi v režah bata.

Slika 10d prikazuje neobrabljen bat, vzet iz novega ventila. Na površinah opazimo vertikalne raze kot posledico izdelave in nekaj blagih horizontalnih raz, ki so najverjetneje nastale pri jemanju bata iz ohišja ventila.



Slika 11 : Površina D tretjega testiranega ventila – 3-prikaz

Z drugim mikroskopom in njegovim pripadajočim programom smo pogledali še površino D na batu po tretjem testu. Opazimo mejo približno na sredini, ki površino I deli še na dva dela. Leva površina je bolj obrabljena in je nižja od desne. To je dobro vidno na 3D-prikazu v programu Vision64.

8 Zaključki

Hidravlika in hidravlični sistemi se zelo pogosto uporabljajo v industrijah in ostalih tehničnih sistemih. Drsniški potni ventili so najpogostejše uporabljeni za krmiljenje. Ker na krmilnih batih ni tesnil, pride do pojava notranjega puščanja skozi reže v ventilu. Stabilnost notranjega puščanja je v veliki meri odvisna od čistoče hidravlične kapljevine, zato smo v raziskavi sestavili hidravlično preizkuševališče, pokazali, da čistoča hidravlične kapljevine ključno vpliva na količino notranjega puščanja ventila, in s pomočjo slik, zajetih pod mikroskopom, določali mehanizme obrabe karakterističnih površin bata testiranega ventila.

Največje notranje puščanje, 0,85 l/min, je bilo izmerjeno po doseženih 2,02 milijona preklonov ventila. Za ta test smo v hidravlično kapljevino dodali 0,670 g testnega prahu MTD, test pa smo izvajali pri 150 bar sistemskega tlaka. Ugotovljen je bil torej velik vpliv majhne količine testnega prahu v hidravlični tekočini na obrabo drsno tesnilnih površin testiranega ventila pri ne tako visokem tlaku. S povečanjem tlaka bi se povečala tudi obraba in notranje puščanje.

Noben izmed ventilov ni odpovedal in ni dosegel notranjega puščanja niti enega litra na minuto, kar pomeni, da količine dodanega testnega prahu še niso bile kritične. Vsi trije ventili so po končanih testih še vedno normalno delovali in se med preklapljanjem niso zatikali, največje notranje puščanje pa ni preseglo enega litra na minuto.

Literatura

- [1] V. Savič, *Uljna hidraulika 1 – Hidraulične komponente i sistemi*. Zenica: Dom štampe, 1986.
- [2] F. Majdič and J. Pezdirnik, *Pogonsko-krmilna hidraulika*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2011.
- [3] D. Lovrec and M. Kambič, *Hidravlične tekočine in njihova nega*. Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2007.
- [4] ISO 4406:2017. *Hydraulic fluid power—Fluids—Method for coding the level of contamination by solid particles*.
- [5] NAS 1638, *Cleanliness requirements of parts used in hydraulics*.
- [6] M. Day, J. H. Hong: The AS4059 Hydraulic System Cleanliness Classification System: Replacement of NAS1638. *Journal of Drive and Control*, 9 (2012) str. 39–45.
- [7] V. Savič, L. Zirojevič: *Uljna hidraulika 3 – Hidraulički fluidi, tehnika filtriranja, zaptivanje*. IKOS, Novi Sad, 2003.
- [8] G. W. Stachowiak, A. W. Batchelor: *Engineering Tribology: Fourth Edition*. University of Western Australia, Australia 2013.
- [9] J. Pezdirnik: Tok tekočine skozi reže v hidravličnih sestavinah. *Strojniški Vestnik* (2001) str. 175 - 191.
- [10] W. Gong, Y. Chen, M. Li, R. Kang: Coupling fractal model for adhesive and three-body abrasive wear of AISI 1045 carbon steel spool valves. *Wear*, 418-419 (2019), str. 75–85.
- [11] X. Liu, H. Ji, W. Min, Z. Zheng, J. Wang: Erosion behavior and influence of solid particles in hydraulic spool valve without notches. *Engineering Failure Analysis*, 108 (2020) str. 104262.
- [12] C. Yunxia, G. Wenjun, K. Rui: Coupling behavior between adhesive and abrasive wear mechanism of aero-hydraulic spool valves. *Chinese Journal of Aeronautics*, 29 (2016) str. 1119–1131.
- [13] B. Gregorc: *Vpliv trdno-kapljevitih zmesi na obratovalne karakteristike hidravličnih strojev: doktorska disertacija*. Maribor, 2011.
- [14] F. Majdič, J. Pezdirnik, M. Kalin: Experimental validation of the lifetime performance of a proportional 4/3 hydraulic valve operating in water. *Tribology International*, 44 (2011), str. 2013–2021.
- [15] F. Majdič, I. Velkavrh, and M. Kalin: Improving the performance of a proportional 4/3 water-hydraulic valve by using a diamond-like-carbon coating. *Wear*, 297 (2013) str. 1016–1024.
- [16] Duplomatic Motion Solutions: DS3 SOLENOID OPERATED DIRECTIONAL CONTROL VALVE. Dostopno na: https://duplomaticmotionsolutions.com/docs/2021/41150-ed-121_c84c2271fb.pdf, ogled: 31. 1. 2023.
- [17] D. Barbiš, *Vpliv čistoče olja na hidravlični 4/3 potni ventil: diplomsko delo*. Ljubljana, 2022.

Impact of oil cleanliness on sustainability of hydraulic directional control valve

Abstract:

Hydraulic systems are very common in industry and other technical fields. The most frequently used valves for control are sliding directional control valves, which do not have seals on the control pistons. This causes internal leakage. The stability of the leakage is highly dependent on the purity of the hydraulic fluid. The thesis deals with the influence of the purity of the hydraulic oil on the durability and volumetric efficiency of the sliding directional control valve under consideration. As part of the thesis, a hydraulic test rig was designed and assembled, on which three durability tests of a hydraulic 4/3 directional control valve were performed. For each test, a different amount of MTD test powder recommended for accelerated testing was added to the hydraulic oil. The valve was switched at a frequency of 4 Hz until 2 million cycles were reached. At the valve, the internal leakage of the A and B lines was measured using two measuring cylinders and a stopwatch. The leakage increased visibly with an increase in the amount of test dust. After the tests were carried out, the casings were cut open and the sliding surfaces of the casings and pistons of the tested valves were inspected for wear.

Keywords:

hydraulics, testing ground, oil cleanliness, directional control valves, sustainability tests, medium test dust, wear of valve sliding surfaces