

TRAJNOSTNI TESTI 3D NATISNJENIH VODNO-HIDRAVLIČNIH PROPORCIONALNIH POTNIH VENTILOV

Žan Spačal, Franc Majdič, Mitjan Kalin, Ana Trajkovski

Izvleček:

Čeprav se voda redko uporablja v pogonsko-krmilni hidravliki (PKH), pa napredne tehnologije odpirajo nove možnosti za širšo uporabo vodne hidravlike (vodne PKH). 3D-tisk kovinskih komponent omogoča izdelavo kompleksnih notranjih geometrij, kakršne s tradicionalnimi postopki niso dosegljive. Z njim lahko ventilom znatno zmanjšamo maso in hkrati izboljšamo pretočne karakteristike. V tej raziskavi smo zasnovali in preizkusili potni ventil, izdelan s 3D-tiskom, ter preizkusili alternativne materiale za krmilne bate, ki so ključni za delovanje vodno-hidravličnih sistemov PKH. Tribološki testi so nam omogočili, da smo preučili različne materialne pare in izmerili koeficiente trenja ter obrabe, s čimer smo določili primerne materiale za uporabo v vodni hidravliki. Poleg tega smo razvili merilno mesto za trajnostno testiranje ventilov. Z njim smo preizkusili njihovo vzdržljivost in zanesljivost v realnih obratovalnih pogojih. Naša raziskava odpira nove možnosti za razvoj boljših vodno-hidravličnih sistemov (v PKH), kar prispeva k nadaljnjemu napredku te redko uporabljene, a potencialno pomembne tehnologije.

Ključne besede:

vodna hidravlika, trajnostni preizkusi, tribološki preizkusi, notranje puščanje, obraba, proporcionalni ventil, 3D-tisk kovin

1 Uvod

Hiter napredek tehnologije je omogočil intenziven razvoj inovativnih materialov in proizvodnih tehnologij, kar ima velik vpliv na področje uporabe oziroma ekonomičnosti izdelave in učinkovitosti posameznih komponent in sistemov. Uvedba 3D natisnjenih komponent je pokazala izjemen potencial zlasti v hidravliki. Omogoča hitro modeliranje novih komponent z značilno nižjo maso. Zgodovinsko gledano je bila izbira najustreznejših materialov pogosto vodena z empiričnim pristopom. Z napredkom tehnologije pa se je razumevanje lastnosti materialov, kot sta vzdržljivost in odpornost proti obrabi, izboljšalo in omogočilo učinkovitejšo uporabo, zlasti v inženirskih aplikacijah.

Z razvojem proizvodnih procesov se je 3D-tiskanje uveljavilo kot uporabna alternativa tradicionalnim metodam izdelave komponent. Zlasti izdelava hidravličnih komponent, kot so ventili, je pridobila prednosti s 3D-tiskanjem, saj to omogoča manjšo maso komponent in manjše tokovne izgube. Kljub

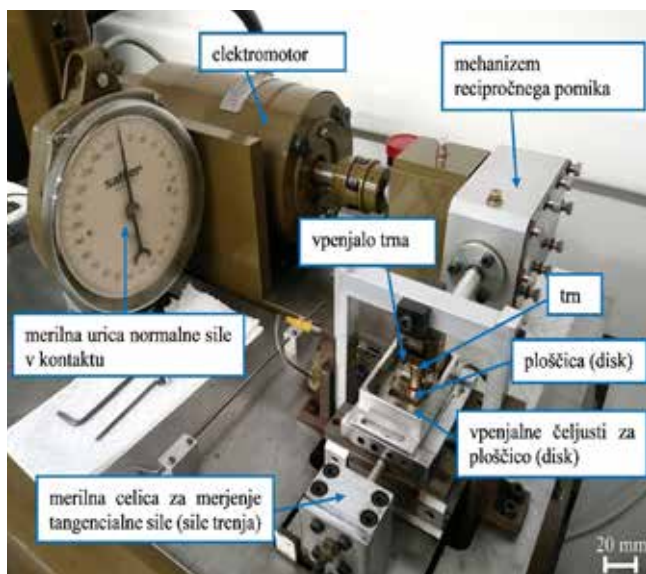
hitremu razvoju so mehanske in tribološke lastnosti 3D natisnjenih hidravličnih komponent, zlasti v vodni hidravliki, precej neraziskane. Zato smo se osredotočili na tribološke teste različnih materialnih parov, ki so bili kasneje uporabljeni kot krmilni bati in pa ohišja 3D natisnjenih ventilov, ki se uporabljajo v vodni hidravliki. V prispevku sta predstavljeni tudi zasnova in izvedba trajnostnega testa na treh obravnavanih ventilih.

2 Metodologija raziskave

2.1 Tribološki testi

Tribološke teste smo izvedli z metodo, imenovano trn proti disku, na drsnem recipročnem preizkuševališču, imenovanem CAMERON-PLINT – TE77 (*silika 1*). Frekvenca nihanja trna je bila 10 Hz. Pomik ročice je bil približno 2,5 mm, kar je pomik bata v drsniškem 4/3-potnem ventilu velikosti CETOP 3. V takšen velikostni razred sodijo tudi preizkušeni 3D natisnjeni ventili, ki jih obravnavamo v tej raziskavi. Testirali smo s konstantno pritisko normalno silo 65 N. Razlog za tako normalno silo je bil v želji, da bo obraba vidna tudi na materialu, ki bo obrabno najbolj odporen. Poleg tega je takšna normalna pritiska sila običajen rang pritisknih sil v tovrstnih ventilih, kar so ugotovitve tudi drugih raziskav in svetovne znanstvene literature.

Žan Spačal, študent., izr. prof. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., prof. dr. Mitjan Kalin, univ. dipl. inž., dr. Ana Trajkovski, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 1 : Postavitev trna in ploščice na tribometru CAMERON-PLINT - TE77



Slika 2 : Trni pred tribološkimi testi (Φ10 mm x 20 mm)

Diske smo izdelali iz staranega martenzitnega jekla 1, iz katerega je tudi ohišje ventila. To jeklo je bolj poznano s tržnim imenom »maraging jeklo 1« oz. MS1. To predstavlja ohišje ventila. Trne pa smo izdelali iz nitriranega jekla AISI440C, bronu CuAl10Fe3Mn2 in aluminija 6082, materialov, primernih za izdelavo krmilnih batov. Trni so bili pred tribološkim testom polirani in očiščeni v etanolu (*slika 2*). Osnovne mehanske lastnosti izbranih materialov so predstavljene v *preglednici 1*.

Tekom preizkusov smo merili trenutne vrednosti koeficienta trenja različnih materialnih parov v vodi in mineralnem hidravličnem olju. Na osnovi dimenzij obrabnih kalot in parametrov preizkusa smo tudi preračunali specifično obrabo materiala.

2.2 Izdelava krmilnih batov in dodelava elektromagnetov

Za krmilne bate smo uporabili enake materiale kot za trne tekom trajnostnega testa. Za prvi krmilni bat

smo izbrali nerjavno jeklo za kaljenje z oznako 1.4125 oz. x105CrMo17. Ta bat smo po izdelavi še nitrirali. Drugi bat je bil izdelan iz bronu 2.0936 oz. CuAl10Fe3Mn2. Zadnji, ki smo ga testirali, je bil izdelan iz aluminija z oznako AlSi1MgMn oz. 3.2315. Vse drsne površine batov smo po struženju še brusili. Krmilni bati pred testiranjem so prikazani na *sliki 3*.

Za potni ventil v vodni hidravliki so že bila razvita nerjavna elektromagnetna jedra, ki so v celoti odporna proti koroziji [2]. V okviru tega dela so bila obstoječa jedra dodelana za redno uporabo v standardnih hidravličnih potnih ventilih velikosti 3 po standardu CETOP. Posebna pozornost pri zasnovi je bila namenjena preprečevanju poškodb kotve in splošnemu zagotavljanju vzdržljivosti komponent v dolgotrajni uporabi. Da smo lahko dimenzionirali trde vzmeti, ki vračajo krmilni bat v nevtralno lego, smo morali pomeriti, kakšne potisne sile premorejo nerjavna jedra. Te smo pomerili s pomočjo merilne naprave s silomerom [3]. Na *sliki 4* je prikazan polovično sestavljen obravnavan ventil s testiranimi jedri.

Preglednica 1 : Mehanske lastnosti analiziranih materialov

Material	Gostota ρ [g/cm ³]	Modul elastičnosti E [GPa]	Natezna trdnost Rm [MPa]	Trdota [HV]
Trn				
AISI440C	7,67	200	760–1960	~ 695
CuAl10Fe3Mn2	7,6	120	560–690	~261
Al 6082	2,7	70	260	~132
Disk				
MS1	8–8,1	180	2080	~460



Slika 3 : Izdelani drsniški krmilni bati (Φ 12 mm x 75 mm) po brušenju

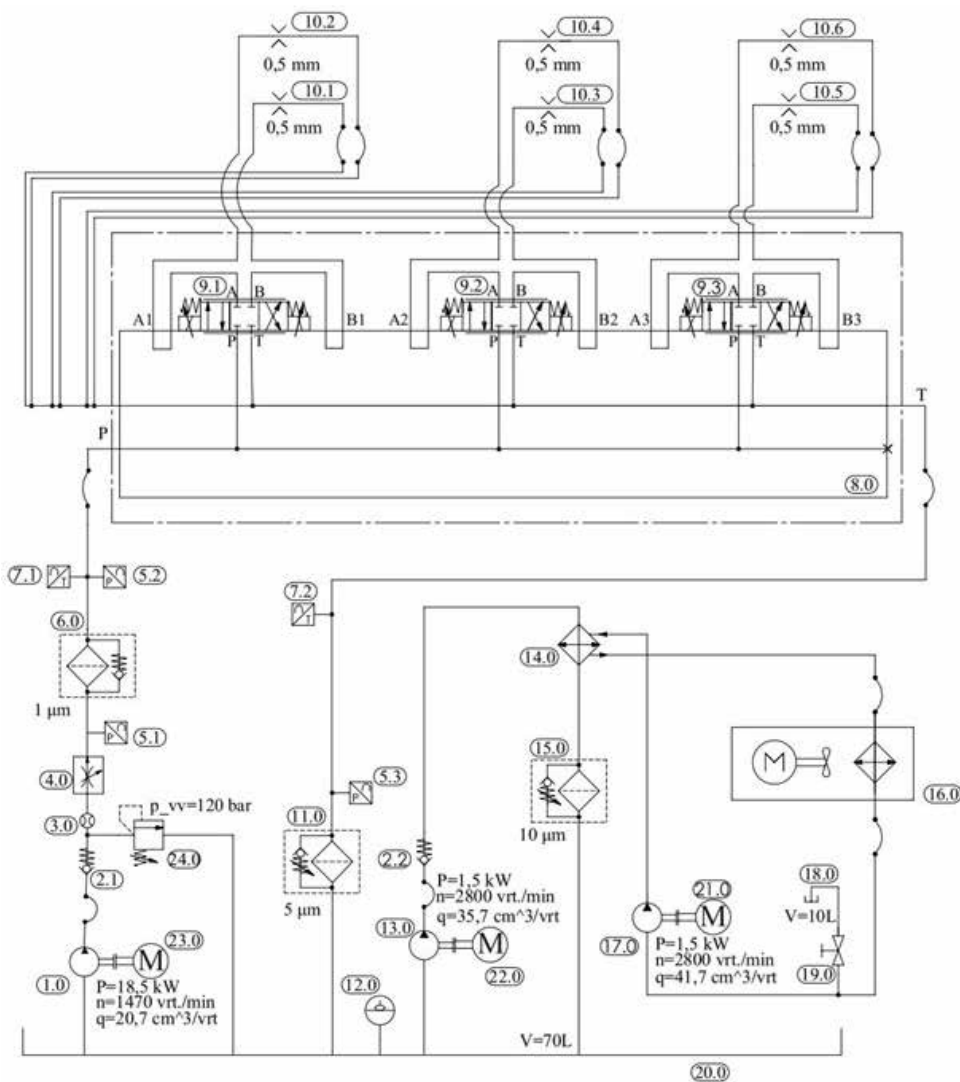
2.3 Izdelava preizkuševališča za izvedbo trajnostnega testa

Na *sliki 5* je prikazana hidravlična shema vodnega preizkuševališča, ki je bila uporabljena za izvedbo trajnostnega testa. Elektromotor (poz. 23.0) poga-

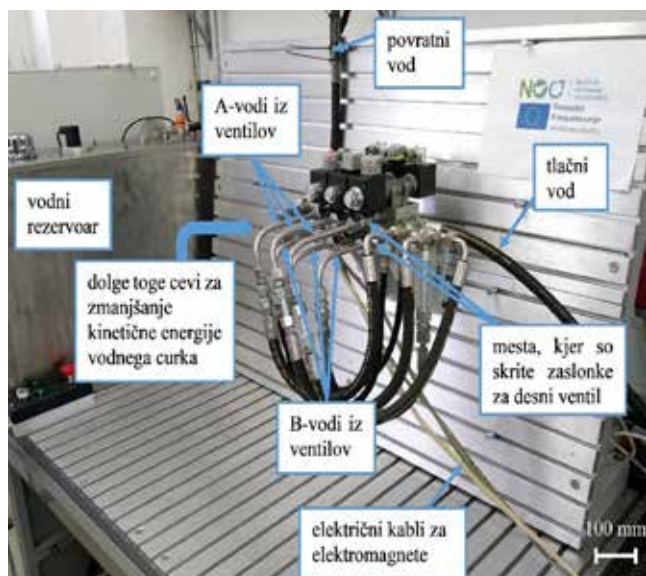


Slika 4 : Polovično sestavljen obravnavan potni ventil
(258 mm x 55 mm x 45 mm)

nja visokotlačno črpalko (poz. 1.0), ki črpa vodo iz glavnega vodnega rezervoarja (poz. 20.0). Iz visokotlačne črpalke in skozi protipovratni ventil (poz. 2.1) voda teče skozi merilnik pretoka (poz. 3.0). Nato nadaljuje pot skozi nastavljen tokovni ventil s tlačno kompenzacijo (poz. 4.0). Temu sledi tlačni filter z nazivno prepustnostjo 1 µm (poz. 6.0). Po tlačnem filtru voda nadaljuje pot naprej v hidravlični blok (poz. 8.0), na katerega so pritrjeni trije 3D



Slika 5 : Hidravlična shema vodno-hidravličnega preizkuševališča (PKH) za izvajanje trajnostnega testa



Slika 6 : Postavitev hidravličnega bloka s tremi testiranimi ventili za trajnostni test

natisnjeni proporcionalni hidravlični ventili (poz. 9.1, 9.2 in 9.3), na katerih smo izvajali trajnostni test. Iz P-voda teče voda naprej ali na A- ali B-vod posameznega ventila (odvisno od pozicije preklopa ventila). Nato voda izteka iz ventila in nadaljuje pot do zaslonk (poz. 10.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5 in 10.6), ki povzročajo obremenitev v hidravličnem sistemu. Od tu naprej voda potuje naprej v skupni povratni T-vod, od koder teče preko 5-mikrometrskega povratnega filtra (poz. 11.0) nazaj v vodni rezervoar. Če bi tlak v hidravličnem sistemu narasel preko nastavljenih 150 bar, bi voda stekla preko varnostnega ventila (poz. 24.0) nazaj v rezervoar.

Poleg teh komponent sta na preizkuševališču še dve črpalki, ki skrbita za uravnavanje ustrezne temperature vode v rezervoarju. Črpalka (poz. 13.0) je gnana preko elektromotorja (poz. 22.0) in črpa vodo iz glavnega rezervoarja v izmenjevalnik toplote (poz. 14.0). Preko izmenjevalnika toplote teče voda skozi 10-mikrometrski filter (poz. 15.0) nazaj v glavni rezervoar. V hladilniku je hladilno sredstvo glikol. To potiska črpalka (poz. 17.0), ki je gnana preko elektromotorja (poz. 21.0). Glikol se hladi preko zunanjega izmenjevalnika toplote (poz. 16.0). Ima tudi svoj manjši rezervoar (poz. 18.0). Ta služi zagonu črpalke (poz. 17.0), ker mora biti ta zalita s kapljevino pred začetkom obratovanja. Dovod glikola do črpalke pa omogočimo preko ventila (poz. 19.0). V hidravličnem sistemu so nameščeni še merilniki tlaka (poz. 5.1, 5.2 in 5.3) in merilnika temperature (poz. 7.1 in 7.2) ter nivojsko stikalo (poz. 12.0).

Na vodno preizkuševališče (slika 6) smo na konzolni nosilec postavili hidravlični blok, na katerega smo pritrčili obravnavane ventile. Na hidravlični blok je na desni strani preko gibke cevi pritrjen skupni tlačni vod. Na levi strani bloka pa je pritrjen skupni povratni vod. Vsi priključki na hidravlični blok in priključki na hidravličnih ceveh so izdelani iz ner

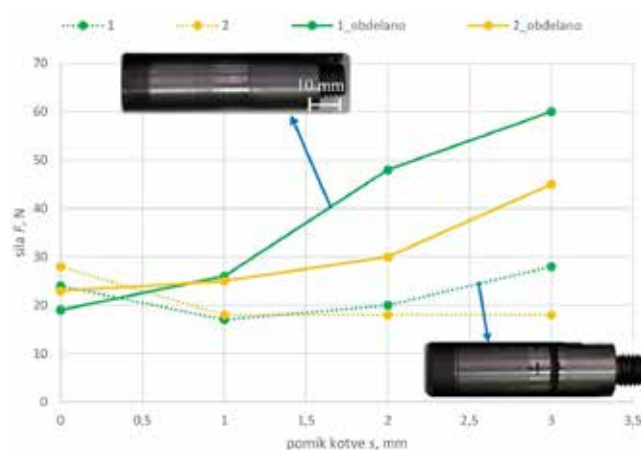
javnega jekla. Tudi vse toge cevi so bile izdelane iz nerjavnega jekla.

Preizkuševališče deluje tako, da se vsi trije ventili preklaplajo hkrati. Za izvajanje trajnostnega testa smo uporabljali tlak varnostnega ventila 150 bar. Termostat vode v rezervoarju je bil nastavljen na 50 °C. Postavitev za trajnostni test v laboratoriju je prikazana na sliki 6.

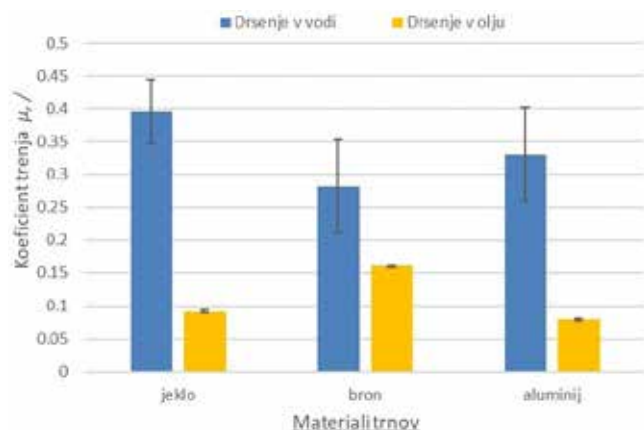
3 Rezultati

3.1 Potisne sile elektromagnetov

Izmerjene potisne sile elektromagnetov (EM) v odvisnosti od pomika kotve so prikazane na sliki 7 (primer dveh jeder; 1 in 2). Pri merjenju potisnih sil elektromagnetov smo opazili, da je zelo pomembno, kako hrapavo je ohišje jedra elektromagneta. Ker so bila jedra namenjena vodni hidravliki, so bila izdelana iz dveh različnih nerjavnih jekel. Nerjavno jedro je bilo magnetno. Le na sredini je imelo nemagnetni kolobar. Med njim sta bila laserska vara. S tako kombinacijo se ustvari ustrezne magnetne silnice, ki potisnejo kotvo v jedru [2]. Pri dveh jedrih je po struženju ostal precej velik kanal. Ta jedra nikakor niso dala dovolj velike potisne sile elektromagneta. To lahko vidimo iz meritev jeder 1 in 2 (slika 7). Zato smo si postavili vprašanje, ali je to zaradi utorov, ki so nastali pri slabi zavaritvi. S tem namenom smo uture na jedrih naknadno povarili. Nato smo zunanji del jedra postružili, da je postala zunanja površina jedra gladka. Po opravljeni meritvi sile obdelanega elektromagneta smo ugotovili, da je bil predhodni vzrok za majhno potisno silo v tem, da so imela jedra uture, na katerih so se magnetne silnice verjetno uklanjale in tako tuljava ni mogla doseči dovolj velike potisne sile kotve. Izboljšanje karakteristike jeder je s polno črto prikazano na sliki 7. Na tej sliki sta prikazani tudi jedri tako pred varjenjem, ko je jedro imelo uture, kot po obdelavi, ko je bilo jedro povarjeno in postruženo.



Slika 7 : Povečanje potisne sile jeder po obdelavi



Slika 8 : Izmerjene povprečne vrednosti koeficientov trenja za različne materiale trnov

3.2 Tribološki testi

Koeficienti trenja so bili izmerjeni za različne materiale trnov. Poleg vode smo za drsni medij uporabili še mineralno hidravlično olje ISO-VG 46, da bi lahko primerjali razliko med obrabo v vodi in v olju. Povprečne ustaljene vrednosti koeficientov trenja so prikazane na *sliki 8*.

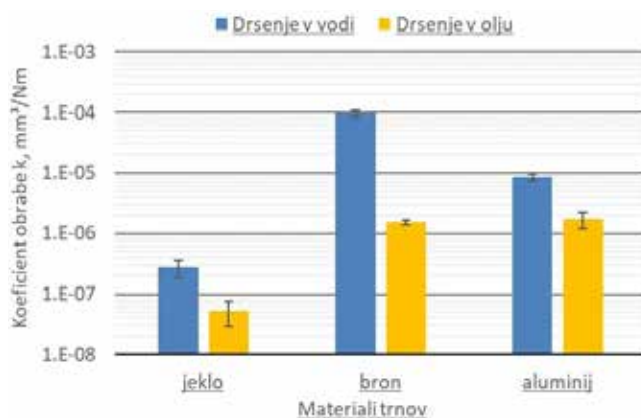
Iz rezultatov je razvidno, da je imel trn iz brona najnižji koeficient trenja v vodi, vendar najvišji v olju. Povprečne vrednosti koeficientov trenja so prikazane na *sliki 8*. S tem testom se je bron izkazal za material z najboljšimi lastnostmi za vodno hidravliko zaradi nizkega koeficienta trenja v vodi.

Meritve volumna obrabe trnov smo prav tako izvedli za trne, ki so drsili v vodi in olju. Rezultati meritev, prikazani na *sliki 9*, kažejo, da je imel trn iz brona največjo obrabo v vodi, medtem ko je imel trn iz nitriranega jekla najmanjšo obrabo. Obraba aluminijastih trnov in trnov iz brona je bila znatno večja v vodi kot v olju.

3.3 Trajnostni test in meritve notranjega puščanja na ventilih

Med trajnostnim testom se je pojavila težava: ohišja, ki so bila izdelana iz staranega martenzitnega jekla 1, so rjavela. Zaradi rjavenja so se krmilni bati v ventilu zatikali. Zato smo morali ventile redno razstavljati in čistiti. S tem se pojavi vprašanje, koliko preklapov so zares naredili krmilni bati, ker so se nekateri zatakneli veliko prej kot drugi. Poleg tega vzroka menimo, da je zatikanje batov lahko posledica različnih temperaturnih raztezkov med materialom ohišja in materiali krmilnih batov. Zaradi omenjenega lahko pride do zmanjšanja reže, ki je potrebna za nemoteno drsenje bata v ohišju.

Trajnostni test se je izvajal do 4,213.220 preklapnih ciklov krmilnih batov. En preklapni cikel pomeni iz ničelnega položaja preklapljen krmilni bat v prvi



Slika 9 : Koeficienti obrabe trnov, ki so drsili v vodi in olju

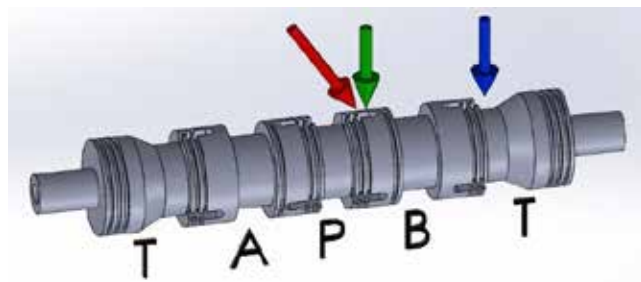
delovni (vzporedni) položaj, nato sledi preklap preko ničelnega v drugi delovni (križni) položaj ter vračanje krmilnega bata nazaj v ničelni (sredinski) položaj. Med potekom smo test štirikrat prekinili in pomerili notranje puščanje na ventilih. Kot lahko vidimo na *sliki 10*, se je daleč največ povečalo notranje puščanje na ventilu, ki je imel krmilni bat izdelan iz aluminija. Povečalo se je za 6.940 ml (6,94 l/min). Najmanj se je puščanje povečalo na krmilnem batu iz brona. Po koncu testa se je povečalo le za 11 ml/min. Na batu iz jekla pa se je notranje puščanje povečalo za 172 ml/min.

3.4 Stanje površin krmilnih batov

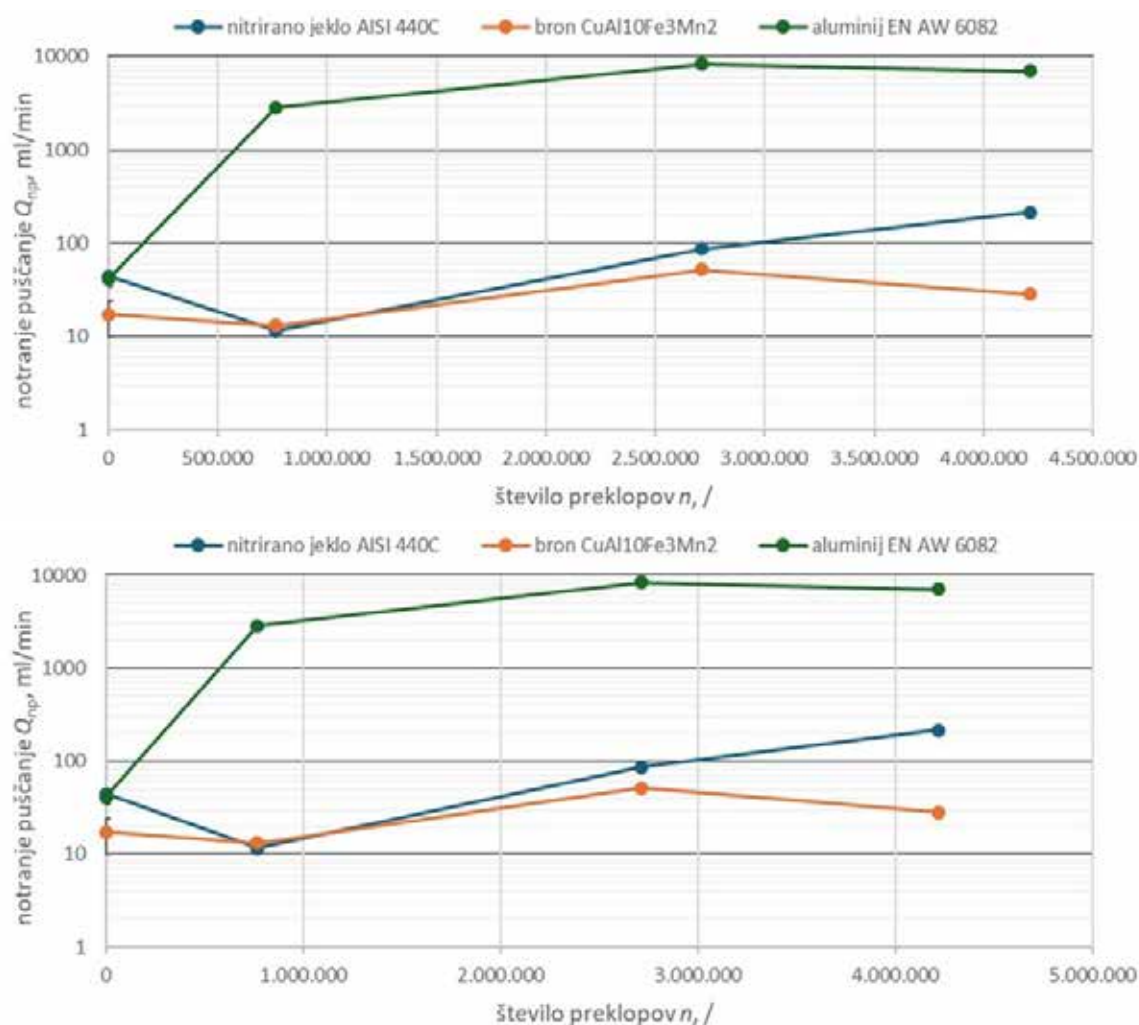
Pogledi, pod katerimi smo opazovali krmilne bate pod mikroskopom, so s puščicami označeni na *sliki 11*.

Pred začetkom trajnostnega testa smo pod mikroskopom pogledali stanje površin, da bi lahko po trajnostnem testu lažje ovrednotili obrabo na krmilnih zarezah batov. Opazili smo, da so bili robovi in zareze na batih pred testom precej ostri in enakomerno brušeni, kar je prikazano na *sliki 12*. Ta pogled prikazuje rdeča puščica na *sliki 11*.

Robovi in krmilne zareze po trajnostnem testu so prikazani na *sliki 13*. Če jih primerjamo s sliko pred



Slika 11: Pogledi preučevanih površin na krmilnih batih, označeni s puščicami različnih barv

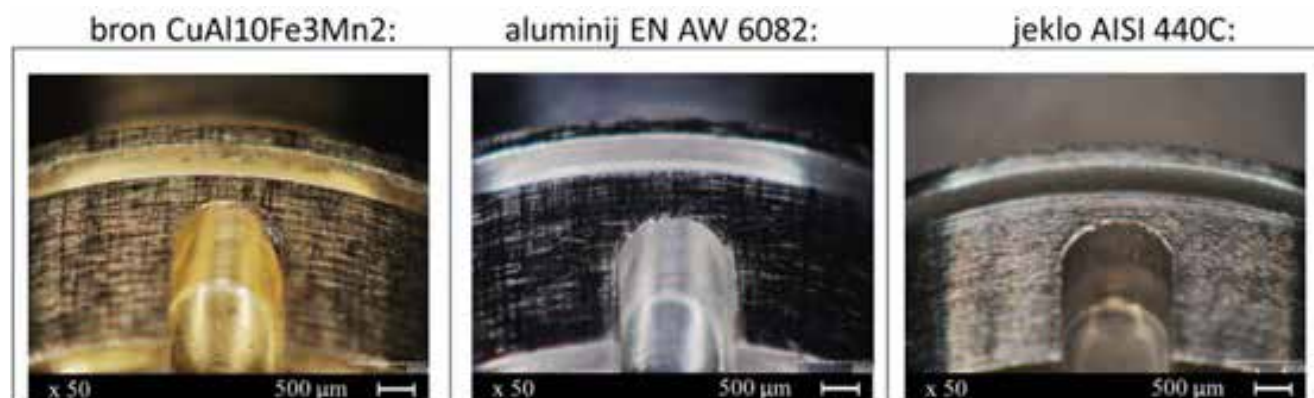


Slika 10 : Izmerjeno notranje puščanje v odvisnosti od števila opravljenih preklpnih ciklov ventilov s tlakom na P-vodu med izvedbo in po izvedbi trajnostnega testa treh ventilov

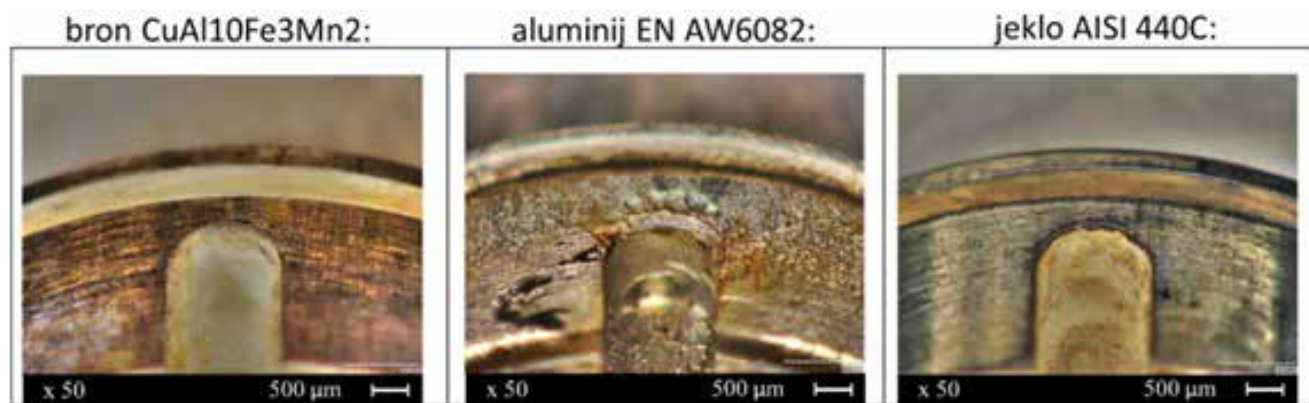
trajnostnim testom (slika 12), lahko rečemo, da so krmilne zareze na batu iz brona in jekla le malo bolj obrabljene kot na začetku. Površina bata sicer ni bila več tako svetleča, a ostrina krmilnih robov se je ohranila. Tega pa ne moremo reči za krmilni bat iz aluminija, na katerem se je zelo jasno videla obraba na robu krmilne zareze (slika 13 na sredini). Na kr-

milni zarezi bata je najverjetneje prišlo do erozijske obrabe, ker je voda, ko je pod visokim tlakom tekla čez zarezo, hkrati odnašala še material z bata.

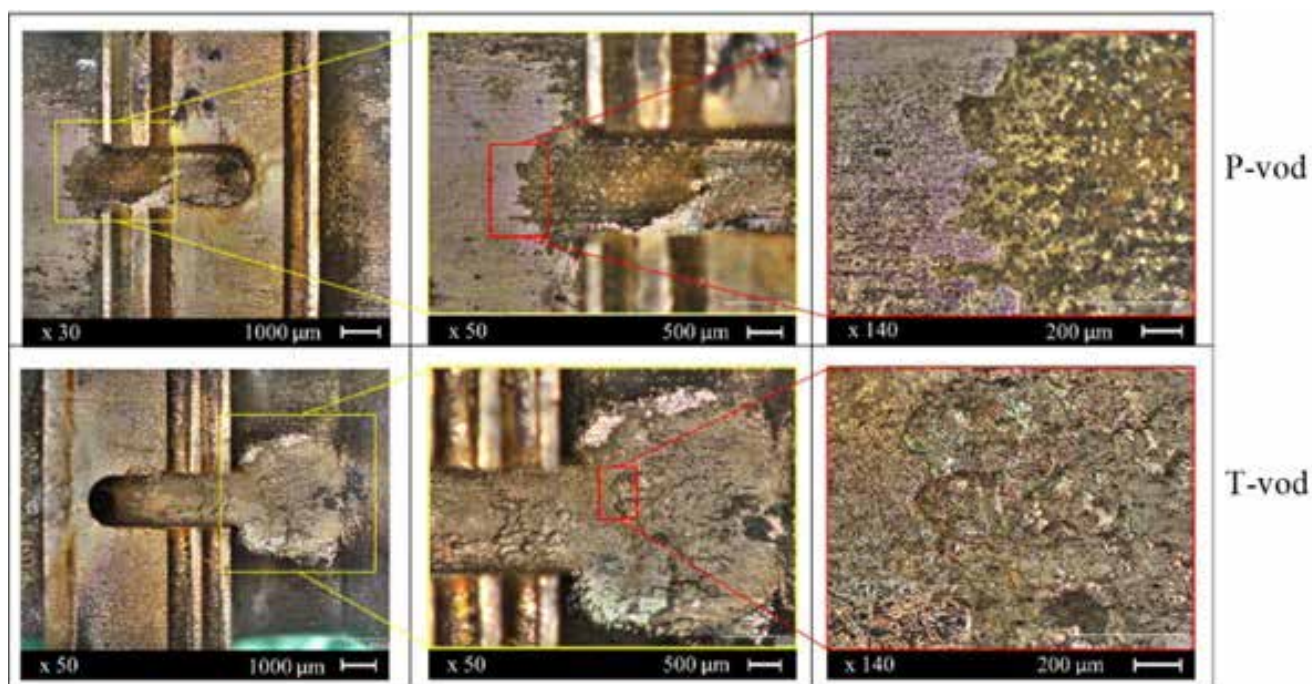
Na sliki 14 je še dodatno prikazana obraba na aluminijastem krmilnem batu. Krmilno zarezo na P-vodu prikazuje zelena puščica (slika 11). Krmilno zarezo



Slika 12: Krmilne zareze na batih pred trajnostnim testom



Slika 13: Obraba krmilnih zarez batov na strani P-voda po izvedenem trajnostnem testu



Slika 14: Obraba na aluminijastem krmilnem batu

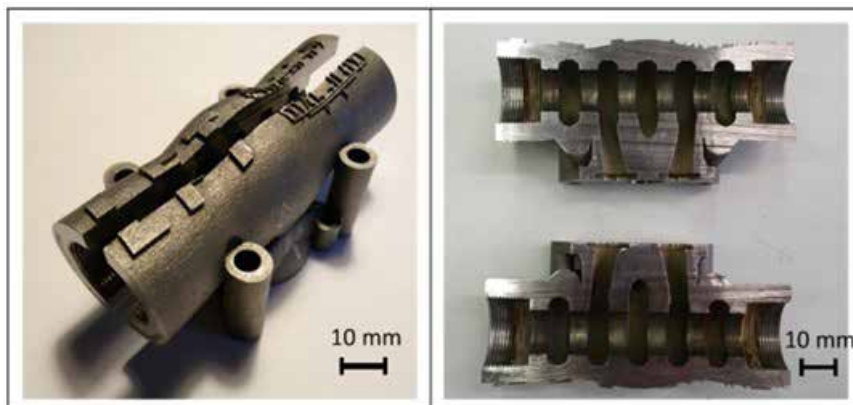
na T-vodu pa modra puščica s *slike 11*. Težko bi presodili mehanizem obrabe na *sliki 14*, ker se pri večjih povečavah ni jasno videlo stanja površine. Lahko pa sklepamo, da sta bili na teh mestih delno prisotni erozija in kavitacija, ker je na površini bata vidno luščenje aluminija, ki je značilno za utrujanje materiala. Utrujenje se je verjetno zgodilo zaradi nenehnih tlačnih sunkov, ki nastanejo med udarjanjem kapljevine na površino zaradi erozije in kavitacije.

3.5 Stanje površin ohišja

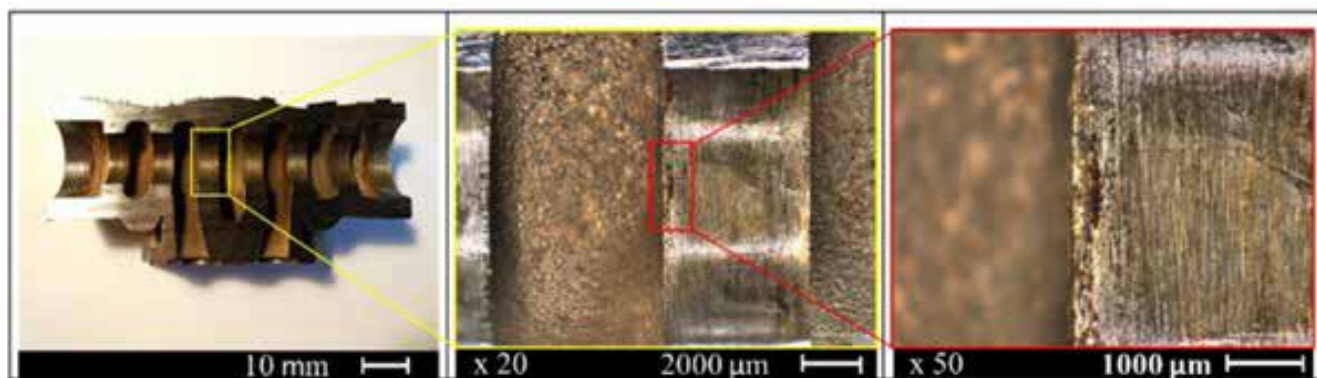
Da bi lahko analizirali obrabo na ohišju ventila, smo se odločili, da

bomo eno ohišje po dolžini prerezali. Izbrali smo ohišje, v katerem je med trajnostnim testom

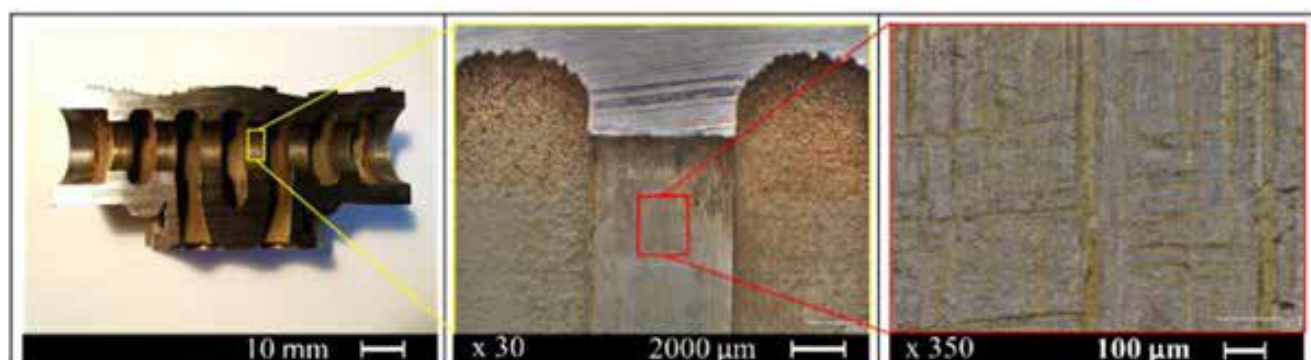
preklapljal aluminijast bat. Na *sliki 15* je prikazano prerezano ohišje ventila.



Slika 15: Rjavenje ohišja med trajnostnim testom



Slika 16: Obraba na robu kolobarja znotraj ohišja ventila



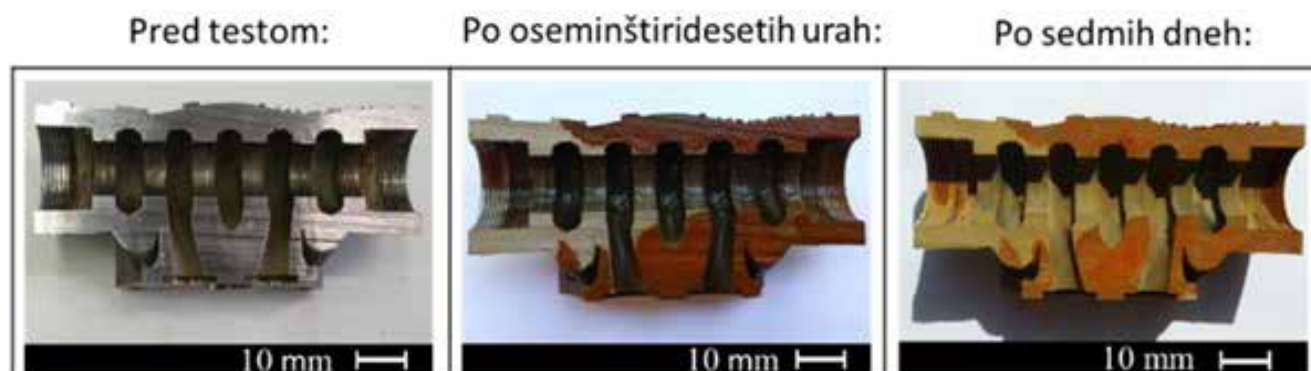
Slika 17: Abrazijska obraba na ohišju ventila

Obrabo na kolobarju ohišja med vodi P in A oz. B lahko opazimo na *sliki 16*. Tukaj je najverjetneje šlo za erozijsko obrabo roba ohišja. Na *sliki 17* pa je vidna abrazijska obraba na ohišju ventila. Ta je lahko nastala zaradi samega drsenja bata ob ohišje, še večja verjetnost pa je, da je kakšen trd delec drsel med ohišjem in batom, ko se je izvajal trajnostni test oz. ko smo razstavljali zataknjene bate iz ohišij.

3.6 Spremljanje rjavenja ohišja

Kot smo že omenili, smo se med izvajanjem trajnostnega testa soočili s težavami rjavenja ohišja iz

martenzitnega jekla (MS1), ki je pripomoglo k zatikanju batov. Zato smo izvedli dodaten enostaven test, da bi preverili, v kolikšni meri je ohišje res nerjavno. Najprej smo razrezano ohišje očistili. Po čiščenju rja sploh ni bila več tako izrazita. Nato smo ohišje potopili v vodo iz pipe. Že po nekaj urah so se pojavili prvi znaki rje, po 48 urah je rja že močno napredovala, vendar se po sedmih dneh ni več bistveno razširila. To pripisujemo dejstvu, da je ohišje izdelano iz 3D natisnjenega martenzitnega jekla. To sicer vsebuje nikelj, vendar ne vsebuje kroma, ki je glavni element za preprečevanje rjavenja. Če jeklo ne vsebuje vsaj 11 % kroma, ne bo povsod nerjavno, ker se na površini ne tvori dovolj velik zaščitni



Slika 18: Spremljanje rjavenja razrezanega ohišja ventila pri namakanju v vodo

oksidni film Cr_3O_3 , ki preprečuje rjavenje [4]. Na-stale spremembe ohišja, potopljenega v vodo, so razvidne s *slike 18*.

4 Zaključki

Spoznali smo, da je za ustrezno potisno silo elektromagnetov zelo pomembno, da je površina jeder čim bolj gladka. Dokazali smo, da ima najnižji koeficient trenja med drsenjem v vodi bron, najmanjši obrabni volumen pa nitrirano nerjavno jeklo, ki je imelo tudi največjo trdoto. S spremljanjem notranjega puščanja med trajnostnim testom smo ugotovili, da se je notranje puščanje najbolj povečalo na ventilu, ki je imel aluminijast krmilni bat, najmanj pa na ventilu s krmilnim batom iz brona. Ugotovili smo, da 3D natisnjeno starano martenzitno jeklo 1 ni popolnoma nerjavno in ob izpostavljenosti vodi iz vodovoda rjavi.

Čeprav so se krmilni bati med testiranjem zatikali, verjamemo, da bi to težavo zlahka odpravili z manjšimi prilagoditvami in zamenjavo materiala ohišja ventila. Prepričani smo, da imajo 3D natisnjeni ventili za vodno hidravliko velik potencial za uspešno uporabo v prihodnosti. Z uporabo alternativnih materialov pa smo dokazali, da obstajajo tudi alternativni materiali za izdelavo krmilnih batov. Nekateri alternativni materiali so celo boljši od klasičnih materialov, ki se uporabljajo za serijsko izdelane krmilne bate.

Literatura

- [1] J. Bartolj: Razvoj 4/3 proporcionalnega potnega ventila za izdelavo s postopkom 3D tiska kovin: diplomsko delo Visokošolskega strokovnega študijskega programa I. stopnje Strojništvo, [J. Bartolj], Ljubljana, 2022. [Na spletu]. Dostopno na: <https://repozitorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=134346>.
- [2] M. Omejc: Razvoj proporcionalnega elektromagneta za vodno hidravliko: zaključna naloga. Ljubljana, junij 2018.
- [3] S. Cvijanović: Nov vodno-hidravlični proporcionalni potni ventil. Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študijskega programa I. stopnje Strojništvo, 2017.
- [4] D. R. Askeland: The Science and Engineering of Materials, 6th ed. London: Chapman & Hall, 2011. na T-vodu pa modra puščica s *slike 11*. Težko bi presodili mehanizem obrabe na *sliki 14*, ker se pri večjih povečavah ni jasno videlo stanja površine. Lahko pa sklepamo, da sta bili na teh mestih delno prisotni erozija in kavitacija, ker je na površini bata vidno luščenje aluminija, ki je značilno za utrujanje materiala. Utrujanje se je verjetno zgodilo zaradi nenehnih tlačnih sunkov, ki nastanejo med udarjanjem kapljevine na površino zaradi erozije in kavitacije.

Durability tests of 3D printed water-hydraulic proportional directional control valves

Abstract:

Despite the fact that water is rarely used in power-control hydraulics (PCH), advanced technologies such as 3D printing of metal components are opening new possibilities for the wider adoption of water PCH. With metal 3D printing, valve mass can be significantly reduced while improving flow characteristics, thanks to the ability to produce complex internal geometries not achievable with traditional methods. In this study, we designed and tested a spool valve produced using 3D printing and explored new materials for control pistons, which are crucial for the operation of water-hydraulic systems. Tribological tests allowed us to examine various material pairs and measure friction and wear coefficients, helping us identify the most suitable materials for use in water hydraulics. Additionally, we developed a testing rig for durability testing of valves, which allowed us to evaluate their longevity and reliability under real operating conditions. Our research opens new avenues for the development of improved water-hydraulic systems, contributing to the advancement of this rarely used but potentially significant technology.

Keywords:

water hydraulics, durability tests, tribological tests, internal leakage, wear, proportional valve, metal 3D printing