

SMERNICE ZA KONSTRUIRANJE NESTANDARDNIH ČEPOV

Anže Čelik, Boris Jerman, Franc Majdič

Izveček:

Prispevek prikazuje in pojasnjuje eksperimentalne aktivnosti, izvedene z namenom vrednotenja mehanskega odziva nestandardnega čepa kot posledice različnih vrst obremenitev. Poglobljeno razumevanje mehanskega odziva pripomore k pravilni določitvi smernic za načrtovanje tovrstnih komponent.

V prvem koraku so bile izbrane različne velikosti obstoječih nestandardnih čepov (upoštevanje učinka velikosti). Izbrani so bili tudi različni materiali, in sicer z namenom analize vpliva vrste materiala. Za eksperimentalno vrednotenje (vgradnja merilnih lističev) in primerjave z numeričnim pristopom so bili čepi konstrukcijsko nekoliko spremenjeni.

Številne eksperimentalne aktivnosti so bile izvedene zaradi vrednotenja notranjih napetosti in spenjalnih sil (kot posledice zateznega momenta), kontaktnih sil in krmilnega tlaka, ki služi za aktivacijo bata itd. Analiza je razkrila številne podrobnosti glede mehanskega odziva čepa, ki prej niso bile poznane. Novo pridobljeno znanje tako pripomore k ustrežnejši postavitvi smernic za konstruiranje čepov.

Ključne besede:

nestandardni čep, eksperimentalni pristop, spenjalna sila, zatezni moment, smernice za konstruiranje

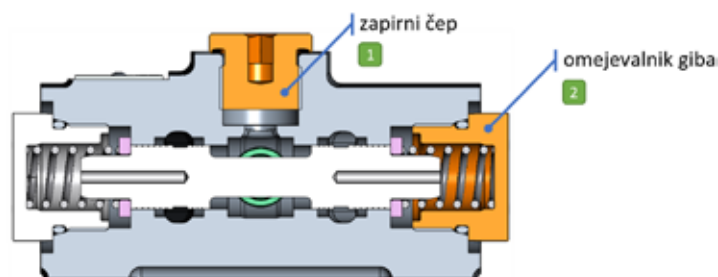
1 Splošno o hidravličnih čepih

Z vidika hidravlike se čepi večinoma uporabljajo za zapiranje tehnoloških izvrtin (t. i. zapirni čepi) in drugih pretočnih kanalov ter tako preprečujejo puščanje tekočine navzven. Med drugim se čepi uporabljajo tudi za omejevanje giba bata (t. i. omejevalniki giba). Za podrobnosti glej *sliko 1*.

Standardni čepi se navadno izberejo na osnovi ponudbe v katalogu dobavitelja (poz. 1 na *sliki 1*), nestandardni čepi pa so običajno plod lastnega razvoja (poz. 2 na *sliki 1*). Za slednje se v fazi razvoja večinoma uporablja teorija vijačnega spoja. Obstaja več različnih standardov (npr. ASTM, ISO, SAE ...) in smernic (npr. VDI 2230), ki podpirajo in vodijo konstrukterja med razvojem komponente ([1], [2], [3]).

1.1 Hidravlični čepi in njihova uporaba v podjetju

Standardni čepi se uporabljajo v številnih različnih hidravličnih komponentah (npr. hidravlični motorji, črpalke, ventili ...). Za zadovoljevanje proizvodnih



Slika 1 : Čepi v različnih funkcijah
(Vir: Poclain Hydraulics)

potreb se uporabljajo različni dobavitelji čepov. Izbira standardnega čepa je relativno preprosta. Konstrukter ga izbere na podlagi kataloških podatkov dobavitelja (primer na *sliki 2*).

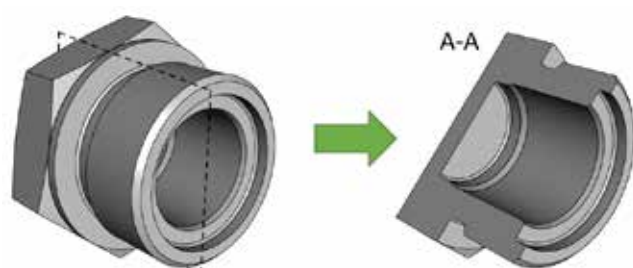
Glavni konstrukcijski parametri so sledeči: velikost čepa, delovni/nazivni tlak in površinska zaščita. Konstrukterju ni potrebno določiti oz. izbrati vrste materiala in izvesti končne validacije (če so obremenitve v predpisanem območju). To je odgovornost proizvajalca čepa.

Nestandardni čepi (*slika 3*) pa so povsem prilagojene konstrukcijske rešitve, ki jih načeloma ni možno kupiti na tržišču. Konstruiranje poteka z upoštevanjem prej omenjenih norm in smernic. Izpolnjevanje konstrukcijskih zahtev glede trajnosti, funkcionalnosti, zakonodaje in predpisov je torej povsem na strani razvojne ekipe podjetja. Konstrukter ima

mag. Anže Čelik, univ. dipl. inž., Poclain Hydraulics, d. o. o., Žiri;
prof. dr. Boris Jerman, univ. dipl. inž.,
izr. prof. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., oba
Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

T1	D1	L1	L2	S1	Weight g/1 piece	Order code*	PN (bar) ¹⁾	
							CF	A3C
M8x1	12	13.0	9.5	4	6	VSTI8X1OR	630	630
M10x1	13	13.5	9.5	5	8	VSTI10X1OR	630	630
M12x1.5	17	16.0	11.0	6	14	VSTI12X1.5OR	630	630
M14x1.5	19	16.0	11.0	6	20	VSTI14X1.5OR	630	630
M16x1.5	21	17.5	12.5	8	26	VSTI16X1.5OR	630	630
M18x1.5	23	19.0	14.0	8	37	VSTI18X1.5OR	630	630

Slika 2 : Izbira čepa iz proizvajalčevega kataloga (Vir: [4])



Slika 3 : Tipičen primer nestandardnega čepa (Vir: Poclain Hydraulics)

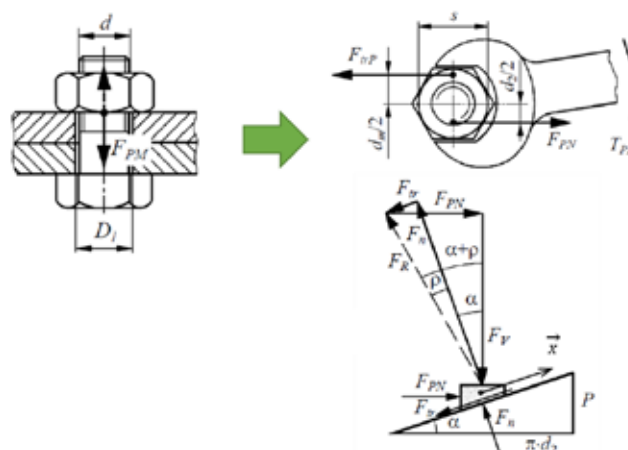
sicer precej več svobode oblikovanja, a tudi veliko več odgovornosti, primerjajoč z uporabo standardnih čepov.

Nestandardni čepi so izdelani iz različnih, toda standardiziranih materialov različnih velikosti (npr. M8-M33), različnih vrst navojev (npr. metrični, UNF), različnih oblik tesnjenja (npr. O-tesnilo, ED-tesnilo) in z različno površinsko zaščito (npr. cinkanje, barvanje). Za namene te raziskave so bile uporabljene naslednje velikosti čepov: M19x1, M27x1.5 in M33x2.

Material se običajno izbere glede na nivo obremenitve: za visoke obremenitve se uporablja predvsem 42CrMo4, za srednje pa se običajno izbere 11SMn30 ali ETG100. Omenjeni materiali so uporabljeni tudi za to študijo.

1.2 O konstrukcijski metodi

Nestandardni čepi so zasnovani v skladu s smernicami po VDI 2230 ter z nekaterimi spremembami



Slika 4 : Parametri za izračun sile prednapetja (faza privijanja) (Vir: [5])

in poenostavitvami za čep. Zaradi specifične geometrije čepa je izračun spenjalne sile F_{PM} poenostavljen:

$$F_{PM} = \frac{T_{PR}}{\left\{ \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\alpha + \rho) + \mu_P \cdot \frac{d_m}{2} \right\}} \quad (1)$$

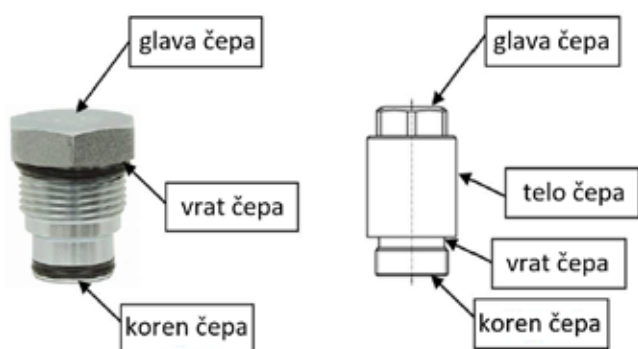
kjer se parametri T_{PR} , d_2 , α , ρ , μ_P , d_m nanašajo na zatezni moment, premer navoja, kot navoja, torni kot, koeficient trenja pod glavo čepa (glej *tabelo sl. 5*) ter srednji premer navoja. Podrobnosti prikazuje *slika 4*.

Pomen oznak na sliki 4: F_{trP} je sila trenja naležne površine, F_{PN} je sila privijanja navoja, F_N je normalna sila, F_R je rezultanta sil, F_V pa je sila v vijaku.

Poleg geometrijskih parametrov, ki so odvisni od

Tabela 1 : Različni primeri koeficientov trenja (Vir: [6])

Material	Koeficient trenja (brez dimenzijsko število)			
	suho		mazano	
	statični	dinamični	statični	dinamični
jeklo (mehko) / jeklo (trdo)	0,74	0,57	-	0,09-0,19
jeklo (trdo) / jeklo (trdo)	0,78	0,42	0,05-0,11	0,029-0,12
jeklo / cink (prevleka)	0,50	0,45	-	-



Slika 5 : Dogovorno poimenovanje delov čepa (Vir: Poclain Hydraulics)

dejanske konstrukcije čepa, obstajajo tudi kontaktni parametri (koeficient trenja pod glavo čepa in med navoji). Na splošno niso znani, vendar pomembno vplivajo na izračun spenjalne sile. Za nekatere vnaprej določene pare materialov so podatki podani v ustreznih tabelah (primer *tabela 1*).

1.3 Dogovorno poimenovanje delov na čepu

V izogib zmedi in nepravilnemu razumevanju poimenovanja sestavnih delov čepa, so ti v nadaljevanju primerno označeni. Čep kot konstrukcijski element je mogoče razdeliti na različne geometrijske domene, in sicer: glava čepa, telo, vrat in koren čepa (*slika 5*).

Odvisno od nestandardne konstrukcije čepa njegovo telo v nekaterih primerih ni jasno prepoznavno. Za to študijo je izraz čep vedno mišljen kot hidravlični čep z navojem.

1.4 Obremenitve

Na čep kot navojno zvezo so uvedene sledeče obremenitve:

- ▶ spenjalna sila kot posledica zateznega momenta,
- ▶ (notranji) torzijski moment kot posledica (zunanjega) zateznega momenta,
- ▶ časovno spremenljiva kontaktna sila kot posledica omejitve giba bata med prekrmljenjem,
- ▶ sila tlaka kot posledica krmilnega tlaka.

Zgoraj omenjene obremenitve so bile uporabljene za potrebe eksperimentalnega, numeričnega in analitičnega pristopa.

2 Obseg raziskave

Cilj te raziskave je razviti metodo za hitro (tj. približno oz. okvirno) dimenzioniranje nestandardnih čepov. Metoda mora upoštevati statični izračun in

izračun z ozirom na utrujenost, ki sta podprta z razpoložljivimi standardi in smernicami. Razvojni ekipi v podjetju je potrebno zagotoviti metodo kot orodje, ki omogoča zanesljiv in enostaven pristop h konstruiranju.

V ta namen je potrebno izvesti poglobljeno analizo vpliva obremenitev s pripadajočimi induciranimi mehanskimi napetostmi in pomiki, slonečo na eksperimentalnem in/ali numeričnem pristopu.

3 Eksperimentalni pristop

Kljub večletnim izkušnjam konstruiranja čepov še vedno ostajajo nekateri fizikalni fenomeni, ki niso bili podrobno raziskani niti niso dostopni v javno objavljene literaturi. Na podlagi izkušenj obstoječa teorija vijčnih spojev precenjuje razmerje oz. povezavo med zateznim momentom in pripadajočo spenjalno silo v čepu. Posledično je konstrukcija čepa običajno predimenzionirana, in sicer z namenom, da bi zadostila teoretičnim in/ali numeričnim napovedim (npr. lokalne koncentracije napetosti).

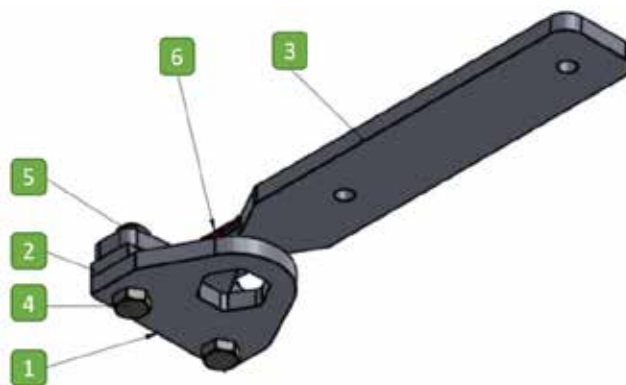
Zato je bilo vloženega veliko truda v ustrezno in natančno oceno mehanskega odziva čepa z ozirom na predpisane obremenitve. Izvedenih je bilo več različnih eksperimentov.

3.1 Merjenje spenjalne sile

Eden od nepoznanih konstrukcijskih parametrov je spenjalna sila. Pojavi se kot posledica uvedbe zateznega momenta na glavi čepa. Zatorej je za potrebe natančnega vrednotenja spenjalne sile bistvenega pomena pravilna in natančna izmera zateznega momenta.

3.1.1 Konstrukcija momentnega ključa

Za pravilno in natančno izmero zateznega momenta je bilo skonstruirano namensko orodje (t. i.



Slika 6 : Namensko razvit momentni ključ (Vir: Poclain Hydraulics)



Slika 7 : Merilni lističi na momentnem ključu (Vir: Po-clain Hydraulics)

momentni ključ). Merjenje zateznega momenta je mogoče na osnovi vgrajenih merilnih lističev. Za podrobnosti glej *sliki 6 in 7*.

Pozicije na *sliki 6* se nanašajo na: (1) modularni nastavek ključa, (2) distančnik, (3) vzvod, (4) pritrdilni vijak, (5) matica, (6) merilni lističi.

Merilni lističi so bili povezani v polno mostično vezavo, pri kateri sta dva merilnika napetosti obremenjena natezno, dva pa tlačno. Vsi senzorji so bili nadalje povezani s sistemom za zajemanje podatkov in merilno postajo (oboje proizvajalca National Instruments Corporation).

3.1.2 Modifikacija nestandardnega čepa

Zaradi pomanjkanja prostora za pritrditev merilnih lističev in doseg ustreznih jakosti izmerjenih signalov na merilnih lističih, so bili nestandardni čepi dodatno spremenjeni. Vrat čepa je bil podaljšan v aksialni smeri, da se pridobi prostor za merilne lističe (*slika 8 – levo*). Modificirani vratovi so bili pre-

kriti z distančniki, ki omogočajo zajem aksialnih sil, vključno s silo prednapetja.

Za zaščito senzorjev pred mehanskimi poškodbami so bili merilni lističi prekrti z namensko oblikovano silikonsko gumo (*slika 8 – desno*).

Ustrezne dimenzije spremenjenih čepov so bile pridobljene na osnovi številnih trdnostnih analiz po metodi končnih elementov (MKE), kjer so bila simulirana napetostno-deformacijska stanja čepov pri maksimalnih pričakovanih obremenitvah. Pri spremembi geometrije čepa je bila posebna pozornost namenjena temu, da konstrukcijske spremembe bistveno ne vplivajo na mehanske lastnosti spremenjenih konfiguracij čepov glede na izvirne.

3.1.3 Kalibracija merilnika sile

Za kalibracijo senzorja sile v čepu je bil zasnovan poseben sistem, ki omogoča simulacijo natezne aksialne sile v čepu (*slika 9*). Omenjeni sistem je sestavljen iz ročice oz. vzvoda in puše za pritrditev čepa.

Slika 9a prikazuje sistem za kalibracijo senzorja sile. Spremenjeni čep M33x2 z vstavljenno obremenitveno osjo in jekleno kroglico je prikazan na *sliki 9c*.

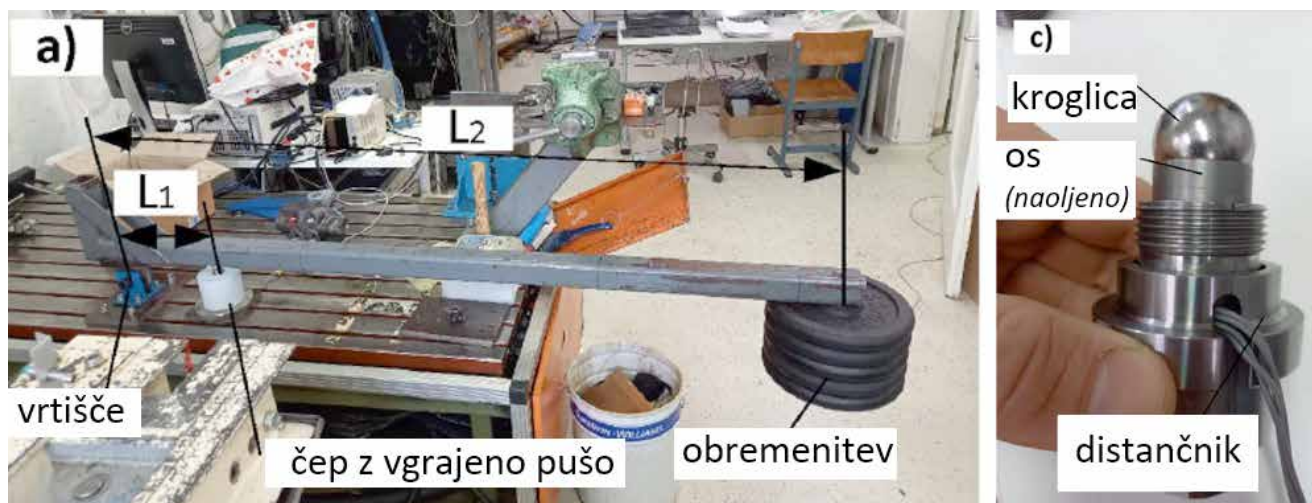
Ležajna kroglica omogoča pravilen prenos sile z ročice na obremenitveno os.

Primer kalibracije merilnika sile na čepu M33x2 je prikazan na *sliki 10*, vključno s pripadajočim približkom (t. i. trendna črta) in vrednostmi R-kvadrata, ki odražajo visoko stopnjo linearnosti (saj je vrednost $R^2 \approx 1$).

Omenjeni koeficient (R^2) se uporablja kot kazalnik ustreznosti uporabljene (linearne) regresije. V da-



Slika 8 : Modificiran čep M33x2, opremljen z merilnimi lističi (Vir: Po-clain Hydraulics)



Slika 9 : Sistem za kalibracijo merilna sile (Vir: Poclain Hydraulics)

nem primeru je torej 99,97 % točk na grafu popisanih z linearno regresijo.

3.1.4 Karakteristika sile prednapetja

Slika 11 prikazuje silo prednapetja (F_{PM}) v odvisnosti od zateznega momenta (T_{PR}) na čepu M27x1,5, in sicer za več zaporednih meritev ter za mazan in suh kontakt. V primeru mazanega kontakta so bile izvedene štiri ponovitve, v primeru suhega kontakta pa tri.

Pomembna lastnost, ki jo je mogoče opaziti na *sliki 11*: majhna razlika v spenjalni sili za mazane in suhe (tj. nemazane) pogoje. To je bistvena razlika v primerjavi z rezultati enačbe (1), kjer se spenjalna sila bistveno spreminja s spreminjanjem tornih razmer v kontaktu.

Prav tako je smiselno omeniti, da se pri drugih dveh čepih (M19x1 in M33x2) opazi večji raztros rezultatov meritev (slednje niso zajete v tem članku). Ven-

dar je potrebno upoštevati, da evropski standard EN 13001 predpostavlja raztros sile prednapetja za $\pm 23\%$, kadar zategovanje poteka s predpisanim momentom ali kotom privijanja.

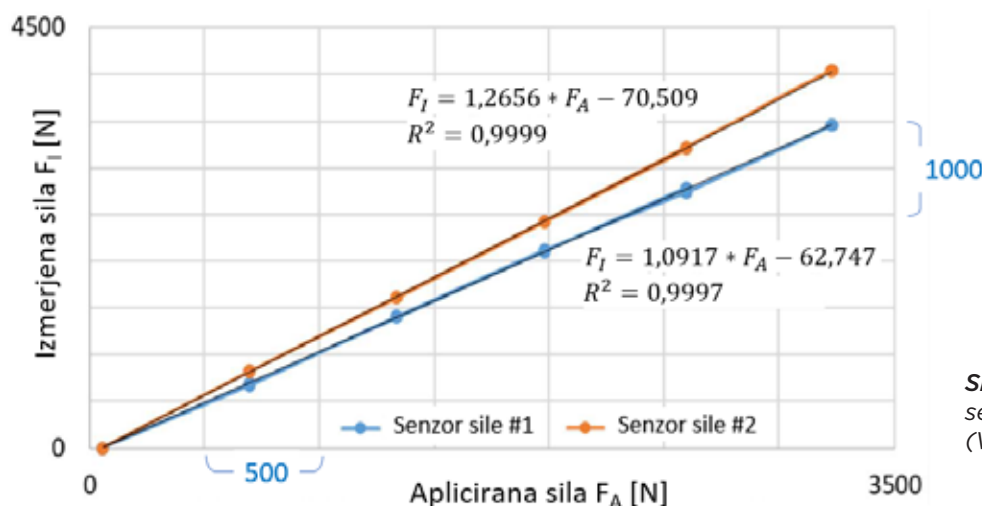
Mazani kontakt je bil vzpostavljen na osnovi nanosa hidravličnega olja na področje stičnih površin (navoji, glava čepa).

3.2 Merjenje kontaktne (dinamične) sile

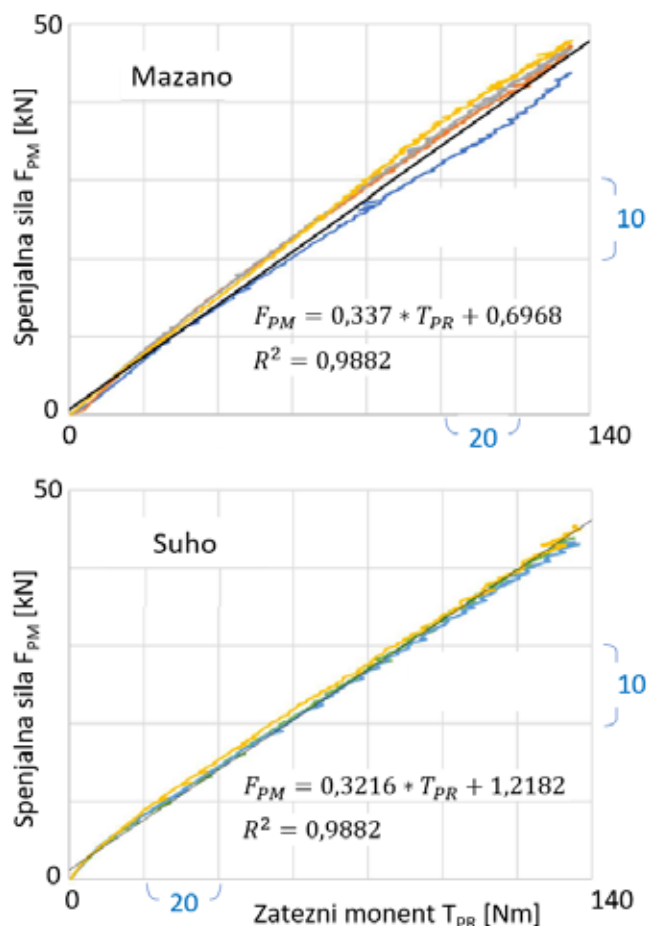
Naslednji korak študije se nanaša na merjenje dinamičnih kontaktnih sil, ki delujejo na čep med gibom bata. Vrednotena sta bila dva scenarija: dinamična sila na glavi in v korenu čepa (*slika 5*).

3.2.1 O hidravličnem preizkuševališču

Sile, ki delujejo na čep, so bile izmerjene pri petih različnih pilotnih tlakih (20, 30, 40, 60 in 80 barov, dobljenih z nastavitvijo varnostnega ventila) in za dva primera povratnega tlaka: s povratnim tlakom



Slika 10 : Karakteristika senzorja sile na čepu M33x2 (Vir: Poclain Hydraulics)



Slika 11 : Sile prednapetja na čepu M27x1,5 (Vir: Poclain Hydraulics)

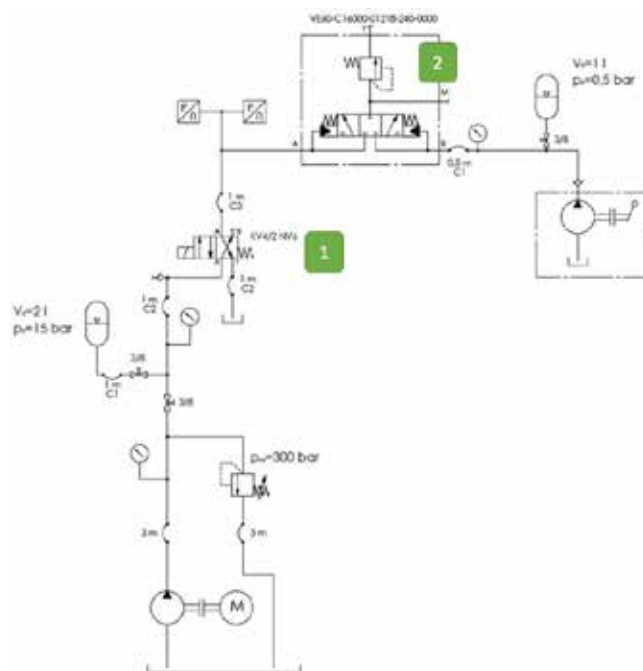
v vzmetni komori ali brez njega (v velikosti enega bara, slika 12).

Frekvenca vzorčenja za vse merjene količine je bila 10 kHz. Hidravlično olje, uporabljeno na preizkuševališču (slika 13), je ISO VG 46.

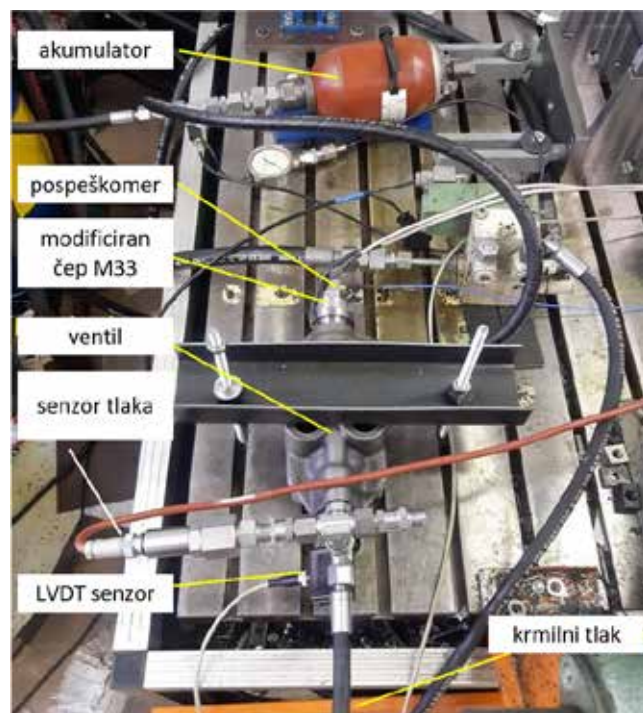
3.2.2 Dinamične sile na glavi čepa

Meritev kontaktnih sil na čepu je bila mogoča na osnovi vgraditve merilnih lističev. Slika 14 prikazuje pet zaporednih vklopov in izklopov potnega ventila (poz. 1, slika 12), ki krmili glavni ventil (poz. 2, slika 12). Med vsako aktivacijo se spenjalna sila v čepu poveča s statične vrednosti (tj. sila prednapetja) do najvišje vrednosti (kontakt bata) in se nato zmanjša na aktivirano statično vrednost (sila krmilnega tlaka) ter se končno vrne na svojo začetno statično vrednost (izklop potnega ventila). Med vsakim aktiviranjem ventila se sila v glavi čepa spremeni na podoben način.

Iz grafa na sliki 14 je mogoče opaziti različne prehodne pojave in na osnovi dobljenih vrednosti meritev je možno določiti nekatere pomembne faktorje. Eden od teh je faktor obremenitve φ . Z ozirom na smernice po VDI 2230 je delovna sila v prednapeti vijačni zvezi F_{SA} znižana za omenjeni faktor φ glede



Slika 12 : Shema (Vir: Poclain Hydraulics)

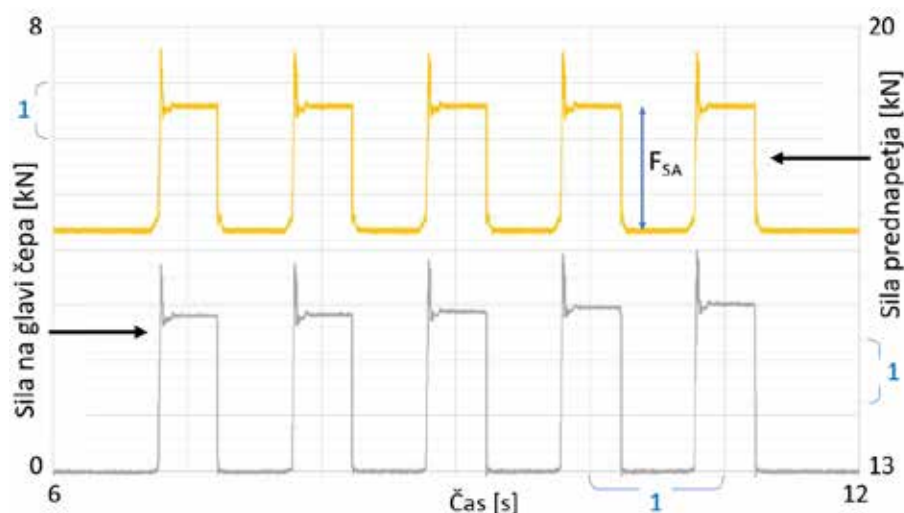


Slika 13 : Slika preizkuševališča (Vir: Poclain Hydraulics)

na zunanjo obremenitev F_A . Relacija je sledeča:

$$F_{SA} = \varphi \cdot F_A \quad (2)$$

kjer se sila F_{SA} nanaša na razliko obremenjenosti vijačne zveze po aktivaciji in pred aktivacijo zunanje sile F_A . Slednja je dobljena kot produkt krmilnega tlaka in površine bata ter nato znižana za silo prednapetja vzmeti.



Slika 14 : Dinamične sile na glavi čepa M33x2 (Vir: Poclain Hydraulics)

V danem primeru je faktor obremenitve φ izračunan sledeče:

$$\varphi = \frac{F_{SA}}{F_A} = 0,613 \quad (3)$$

Vrednost, dobljena z enačbo (3), se precej razlikuje od tipičnih vrednosti za vijalni spoj; te so običajno med 0,1 in 0,4.

3.2.3 Dinamične sile v korenu čepa

Podobno so bile detajlno preučene tudi dinamične sile v korenu čepa. V nadaljevanju rezultati niso podrobno predstavljeni.

Vendar so bili opaženi podobni trendi in podatki so bili prav tako obdelani na podoben način (glej sliko 15). Očitno je, da so rezultati pri vseh zaporednih aktivacijah ventila približno enaki.

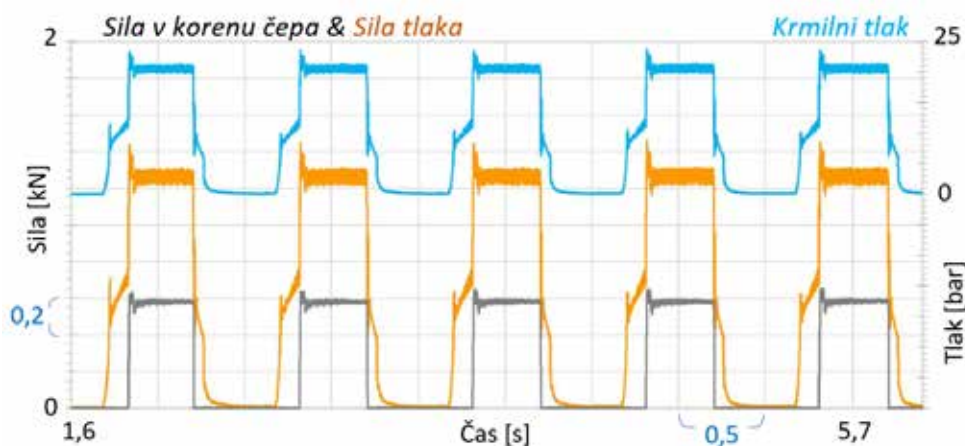
4 Zaključek

Cilj celotne raziskave je razviti konstrukcijsko metodo za hitro dimenzioniranje hidravličnih čepov. V prvem koraku so bile izvedene obsežne meritve na čepih velikosti M19x1, M27x1,5 in M33x2 (le del teh meritev je prikazan v tem članku).

Razvite in uporabljene so bile nekatere inovativne rešitve (npr. momentni ključ, spremembe konfiguracij čepov ...), ki omogočajo natančne in ponovljive meritve različnih spremenljivk.

Uporaba merilnih lističev omogoča merjenje sil, pomikov in napetosti na vratu, glavi in v korenu čepa. Ustreden sistem zajemanja podatkov je omogočal natančno zajemanje prehodnih pojavov med fazo gibanja bata. To je obstoječemu znanju in izkušnjam razvojne skupine Poclain prineslo nova spoznanja oz. dodano vrednost.

Rezultati teh aktivnosti bodo v nadaljevanju omogočili razvoj potrebnega orodja za konstruiranje.



Slika 15 : Dinamične sile v korenu čepa M33x2 (Vir: Poclain Hydraulics)

Reference

- [1] <https://www.boltscience.com/>, nazadnje ogledano 14. 1. 2024.
- [2] <https://www.bossard.com/global-en/assembly-technology-expert/expert-design/calculation-of-bolted-joint/>, nazadnje ogledano 26. 7. 2023.
- [3] <http://www.vdi2230.de/>, nazadnje ogledano 16. 1. 2024.
- [4] https://www.parker.com/parkerimages/euro_tfd/cat/english/C150.PDF, nazadnje ogledano 26. 7. 2023.
- [5] <https://www.scribd.com/doc/257813953/6-Vijacne-zveze#>, nazadnje ogledano 26. 7. 2023.
- [6] Simcenter Amesim Help, rev. 2021.2 .

Design guidelines for non-standard plugs

Abstract:

The paper shows and explains mechanical response of non-standard plug as a consequence of different loading type. In-depth understanding of plug behavior helps to setup design guidelines for such components.

In the first step, different sizes of existing non-standard plugs have been selected in order to take into account the size effect. Then, three different materials have been selected in order to evaluate effect of plug material. For the purposes of experimental evaluation and comparison with numerical approach, selected plugs have been additionally modified to allow installation of strain gauges.

Numerous experimental activities have been performed with the aim to evaluate induced stresses and preload forces due to tightening torque, contact forces and piloting pressure due to spool shifting, etc. Tests have unveiled several details regarding mechanical response on plug that have not been known previously. New obtained knowledge helps to define plug design guidelines more appropriately.

Keywords:

non-standard plug, experimental investigation, preload force, tightening torque, design guidelines

iCm

IFAM-INTRONIKA-ROBOTICS

11.-13.2.2025

Ljubljana

