Simulacija mehanskega odziva Nestandardnih čepov

Anže Čelik, Boris Jerman, Franc Majdič

Izvleček:

Prispevek povzema simulacijske aktivnosti, izvedene z namenom vrednotenja mehanskega odziva nestandardnega čepa kot posledica različnih obremenitvenih scenarijev. Podrobno razumevanje mehanskega odziva čepa se lahko razume kot predpogoj za pravilno izvedbo (potrditvenega) eksperimenta, pravilno pripravo vzorcev (oz. preizkušancev) ter nenazadnje tudi za pravilno določitev smernic za načrtovanje tovrstnih komponent.

Zahvaljujoč podrobnemu simulacijskemu modelu je bil mehanski odziv (tj. napetosti, pomiki) lahko podrobno raziskan. Napetostno polje na nespremenjeni konstrukciji čepa namreč omogoča identifikacijo področij, kjer so potrebne spremembe dizajna (za ustrezno izvedbo eksperimenta oz. vgradnjo merilnih lističev), kot tudi prepoznavo tistih kritičnih mest na čepu, ki vplivajo na njegovo življenjsko - uporabno dobo.

Na osnovi razumevanja mehanskega odziva na nespremenjeni konstrukciji čepa so bile v nadaljevanju narejene spremembe dizajna. Izkaže se, da slednje bistveno ne vplivajo na napetosctno-deformacijski odziv. Za statično dimenzioniranje nespremenjenih čepov se lahko uporabijo obremenitve, izmerjene na spremenjenih čepih, ne da bi pri tem prišlo do pomembnejših odstopanj.

Ključne besede:

nestandardni čep, numerični pristop, metoda končnih elementov, spenjalna sila, zatezni moment, smernice za konstruiranje

1 Numerični pristop (MKE)

Glavni namen analize po metodi končnih elementov (MKE) na čepih je zagotoviti podrobno razumevanje mehanskega odziva (tj. polja napetosti in pomikov). Drug pomemben vidik izvedene numerične analize je primerjava mehanskega odziva na izvorni in spremenjeni geometriji čepa. Šele nato je mogoče izmerjene sile na spremenjenih konfiguracijah interpretirati z ozirom na izvorne konfiguracije.

Numerične analize (MKE) so bile izvedene s programskim paketom Ansys Mechanical APDL.

1.1 Izgradnja numeričnega modela

Za vsako velikost čepa sta bili izdelani in analizirani dve različici dizajna čepa (izvorna in spremenjena konfiguracija). Pri izgradnji numeričnega modela so bile privzete naslednje predpostavke in poenostavitve:

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

- osnosimetrični model z osno simetrijo vzdolž osi čepa (smer Y);
- uporabljeni so 2-dimenzionalni elementi PLA-NE42 z osno simetrijo;
- navoji čepov so bili modelirani s poenostavljenim enakovrednim krožnim modelom (brez 3-dimenzionalne vijačnice);
- kontakt med navoji na čepu in ohišju je bil vzpostavljen s pomočjo sklapljanja (sosednjih vozliščnih parov) v normalni smeri; kontaktni elementi torej niso bili uporabljeni;
- preostali kontakti v vijačni zvezi so bili vzpostavljeni na enak način.

Uporabljena sta bila dva različna materiala (in sicer za čep in ohišje) z ustreznimi elastoplastičnimi lastnostmi (bi-linearni utrjevalni model). Podrobnosti so prikazane na *sliki 1*.

Slika 2 prikazuje primer zamreženega osnosimetričnega numeričnega modela izvornega (tj. nespremenjenega) in spremenjenega modela čepa M33x2. Temno modra barva se nanaša na model ohišja, zelena na čep, svetlo modra pa na distančnik.

Slika 3 prikazuje zamreženi detajl osnosimetričnega numeričnega modela izvornega in spremenjenega modela čepa M33x2. Lokalna zgostitev mreže je bila uporabljena na območjih z ostrimi prehodi, navoji in na vratu čepa.

Materialne lastnosti							
Element	Oznaka (Standard)	W. Nr.	Modul elastičnosti [GPa]	Poissonov količnik [-]	Meja tečenja [MPa]	Tangentni modul [GPa]	Raztezek pri prelomu [%]
ohišje	EN GJS-600-3 (EN 1563)	5.3201	174	0,275	380	1,74	1,0
čep	11SMn30 (+C) (EN 10087)	1.0715	210	0,300	440	2,10	6,0

Slika 1 : Materialne lastnosti (*Vir: Poclain Hydraulics*)



Slika 2 : Osnosimetrični model čepa M33x2 (levo: nespremenjen/izvoren čep, desno: spremenjen čep) (Vir: Poclain Hydraulics)





Slika 4 : Kontaktna področja osnosimetričnega modela čepa M33x2 (levo: nespremenjen/izvoren čep, desno: spremenjen čep) (Vir: Poclain Hydraulics)

Kontaktna področja med navoji na čepu, na distančniku in ohišju so bila vzpostavljena s pomočjo sklapljanja (sosednjih vozliščnih parov) v normalni smeri. Slednje je prikazano na *sliki 4*.

Uporabljenih je bilo pet različnih obremenitvenih scenarijev (LC), in sicer:

- LC1: neaktiviran ventil (začetni položaj bata; sila prednapetja in začetna sila v vzmeti);
- LC2: aktiviran ventil (sila na glavo čepa; sila prednapetja, največja sila v vzmeti in kontaktna sila v prekrmiljenem položaju bata);
- LC3: aktiviran ventil (sila na glavo čepa; sila prednapetja, največja sila v vzmeti in kontaktna sila v prehodnem položaju bata);
- LC5: aktiviran ventil (sila na koren čepa; sila prednapetja, največja sila v vzmeti in kontaktna sila v prekrmiljenem položaju bata);
- LC6: aktiviran ventil (sila na koren čepa; sila prednapetja, največja sila v vzmeti in kontaktna sila v prehodnem položaju bata).

Obremenitveni primer LC3 na M33x2 je prikazan na *sliki 5.* Pri tem imajo oznake sil naslednji pomen: F_{CON} - kontaktna sila bata med prekrmiljenjem, F_{HF} - sila na glavo čepa, F_{SPR} - sila v vzmeti, F_{PR} - sila prednapetja.

Sila bata na čep je bila določena za krmilni tlak 20 barov, kar je tipičen pilotni tlak, ki se uporablja v zaprtem hidravličnem krogotoku.

Robni pogoji (tj. podpore v smislu preprečitve pomikov vozlišč) so bili predpisani na prostem koncu ohišja. Relativno gibanje kontaktnih površin v obodni smeri je bilo obravnavano kot prosto, brez upoštevanja trenja.

Velja omeniti, da je za potrebne priprave in vrednotenja numeričnega modela privzet cilindrični koordinatni sistem z osmi X, Y in Z (*slika* 6).

Slika 7 prikazuje primer zamreženega osnosime-

tričnega numeričnega modela izvornega (tj. ne-



Slika 5 : Obremenitveni primer LC3 na M33x2 (levo: nespremenjen/izvoren čep, desno: spremenjen čep) (Vir: Poclain Hydraulics)



Slika 6 : Cilindrični koordinatni sistem in pripadajoče napetostno-deformacijske enačbe (Vir: Poclain Hydraulics)



Slika 7 : Osnosimetrični model čepa M27x1,5 (levo: nespremenjen/izvoren čep, desno: spremenjen čep) (Vir: Poclain Hydraulics)



Slika 8 : Osnosimetrični model čepa M19x1 (levo: nespremenjen/izvoren čep, desno: spremenjen čep) (Vir: Poclain Hydraulics)

spremenjenega) in spremenjenega modela čepa M27x1,5. Sestavni deli, uporabljeni med analizo po MKE, so označeni in poimenovani.

Slika 8 prikazuje zamreženi primer osnosimetričnega numeričnega modela izvornega in spremenjenega modela čepa M19x1. Uporabljeni konstrukcijski elementi ventila so jasno označeni oz. poimenovani. Omeniti velja, da so bile v danem primeru uporabljene obremenitve, ki so posledica delovanja elektromagneta (kot vira za krmiljenje bata v ventilu).

1.2 Vrednotenje numeričnega modela

Podrobna predstavitev in analiza rezultatov za vsak obremenitveni primer presega okvir tega prispevka. Zato je v nadaljevanju navedenih le nekaj tipičnih vrednotenj za obremenitveni primer LC1 na čepu M33x2.

Slika 9 prikazuje deformacijski odziv čepa M33x2 za obremenitveni primer LC1, ki se nanaša na simulacijo

zategovanja čepa. Sila prednapetja zaradi zategovanja čepa je modelirana s pomočjo temperaturnega skrčka na vratu čepa, in sicer v vzdolžni Y-smeri. Njena vrednost je dobljena na osnovi preizkusa.

Pomiki, prikazani na *sliki 9*, so v skladu s pričakovanji (tako v kvalitativnem kot tudi v kvantitativnem smislu). Del čepa nad območjem temperaturnega skrčka se pomakne v negativni Y-smeri, del čepa pod omenjenim območjem pa v pozitivni Y-smeri.

Kontaktna sila med glavo čepa in ohišjem (za primer izvornega čepa) oz. med glavo čepa in distančnikom (za primer spremenjenega čepa) je največja v primeru LC1. Razlog je v tem, da pri ostalih obremenitvenih primerih na čep delujejo dodatne aksialne sile (v smeri +Y), ki znižujejo vrednost kontaktne sile.

Slika 10 prikazuje napetostni odziv v čepu M33x2, in sicer napetosti v vzdolžni oz. aksialni smeri Y $\rightarrow \sigma_{_{yy}}$. Tako na izvornem čepu kot tudi na spremenjeni



Slika 9 : Deformacijski odziv v čepu M33x2 (pomiki v globalni



Slika 10 : Napetostni odziv v čepu M33x2 (napetosti v globalni Y- smeri) (Vir: Poclain Hydraulics)

geometriji čepa se maksimalna aksialna napetost vedno pojavi na prehodu (oz. zaokrožitvi) med vratom in telesom čepa. Napetostni odziv v čepu M33x2, in sicer napetosti v radialni smeri X $\rightarrow \sigma_{xx}$, je prikazan na *sliki 11.* Tako na izvornem čepu kot tudi na spremenjeni geometriji



Slika 11 : Napetostni odziv v čepu M33x2 (napetosti v globalni X- smeri) (Vir: Poclain Hydraulics)



Slika 12 : Napetostni odziv v čepu M33x2 (napetosti v obodni smeri) (Vir: Poclain Hydraulics)



Slika 13 : Napetostni odziv v čepu M33x2 (strižne napetosti v ravnini XY) (Vir: Poclain Hydraulics)

HIDRAVLIČNI ČEPI



Slika 14 : Napetostni odziv v čepu M33x2 (primerjalne napetosti po von Misesu) (Vir: Poclain Hydraulics)

čepa se tudi v danem primeru maksimalna radialna napetost vedno pojavi na prehodu (oz. zaokrožitvi) med vratom in telesom čepa.

Napetostni odziv v čepu M33x2 na *sliki 12* se nanaša na napetosti v obodni (tangencialni) smeri $Z \rightarrow \sigma_{zz}$. Tudi v tem primeru se maksimalna obodna napetost pojavi v že omenjeni zaokrožitvi med vratom in telesom čepa.

Slika 13 prikazuje strižne napetosti v ravnini XY v prerezu čepa M33x2 $\rightarrow \tau_{xy}$. Lokacija maksimalne strižne napetosti ostaja nespremenjena (tj. na mestu zaokrožitve). Na omenjeni sliki je možno tudi opaziti, da se nekoliko povišane (negativne) strižne napetosti pojavijo tudi na področju navojev.

Primerjalne napetosti po von Misesu so prikazane na *sliki 14.* Ker gre za primerjalno oz. ekvivalentno napetost posameznih komponent napetostnega tenzorja (σ_{yy} , σ_{xx} , σ_{zz} , τ_{xy}), lokacija maksimalne primerjalne napetosti ostaja enaka, nespremenjena.

Uporaba numerične simulacije (poleg eksperimentalnega pristopa) prinaša številne prednosti. Mehanska numerična analiza (MKE) omogoča poglobljeno vrednotenje napetosti (poleg drugih spremenljivk) na celotni komponenti. Poleg tega je mogoče razmeroma hitro in enostavno simulirati več različnih obremenitvenih scenarijev.

Po drugi strani pa eksperimentalni pristop omogoča vpogled v dejanske vrednosti sil, napetosti itd. Vendar pa je omenjeni pristop relativno potraten (v smislu porabljenega časa, stroškov, človeških virov) in upošteva le omejeno število scenarijev.

2 Smernice za konstruiranje in razvoj orodja

Metoda za hitro dimenzioniranje hidravličnih čepov je razvita in opisana na primeru čepa M33x2. Najprej je uveden izračun z ozirom na utrujenost (trajnost), nato pa še z ozirom na statični izračun.

2.1 Izračun na utrujenost

Izračuni z ozirom na utrujenost so izvedeni v skladu s standardom DIN 743 (*»Izračun nosilnosti gredi in osi*«), ker so tam podane ustrezne geometrijske



Slika 15 : (a) Deli čepa, (b) risba čepa, (c) skica standardnega detajla (Vir: Poclain Hydraulics)



Slika 16 : Preračun čepa v programu Excel (Vir: Poclain Hydraulics)

podrobnosti, podatki o utrujenosti za obravnavani material čepa in analizirane ustrezne obremenitve. Edina pomanjkljivost tega standarda je, da so izračuni izvedeni za trajnodinamično mejo (2·10⁶ ali več ciklov obremenjevanja), medtem ko so čepi običajno obremenjeni s 5·10⁵ ciklov. Izračun je torej v tem pogledu konservativne narave.

Prečni presek vratu čepa, ki vsebuje prehod med vratom in telesom čepa, je bil izbran kot kritični presek za izračun na utrujenost (*slika 15*).

2.2 Izračun na statično trdnost

Izračunan je (statični) varnostni faktor glede na mejo tečenja ($Rp_{0,2}$ oz. Re). Zahtevani minimalni varnostni faktor meje tečenja je opredeljen v ustreznem standardu (S_{min} = 1,2).

Pri statičnem izračunu torzijske napetosti ne gre zanemariti, ker lahko slednja zaradi zategovanja in prednapetja čepa ostane »ujeta« v vratu čepa skozi celotno življenjsko - uporabno - dobo in seveda tudi zato, ker mora čep vzdržati tudi obremenitve, ki so posledica zategovanja.

Razvito je bilo namensko kalkulacijsko orodje, ki temelji na Excelu in omogoča avtomatizirano uporabo metode za hitro dimenzioniranje hidravličnih čepov (*slika 16*).

3 Zaključek

Trdnostne (MKE) analize so bile izvedene za izvorne in spremenjene konfiguracije čepov (velikosti M33x2, M27x1,5 ter M19x1), s čimer je bila možna tudi njihova medsebojna primerjava. Kot najpomembnejše je bilo ugotovljeno, da geometrijske spremembe čepov bistveno ne vplivajo na rezultate meritev - vpliv je manjši od 2 %. Za statično dimenzioniranje nespremenjenih čepov se lahko uporabijo obremenitve, izmerjene na spremenjenih čepih, ne da bi pri tem prišlo do pomembnejših odstopanj. Glavni vir obremenitev je bil upoštevan tlak krmiljenja v velikosti 20 barov s pripadajočimi induciranimi silami. Izjema je čep M19x1, kjer je vir obremenitev krmilna sila elektromagneta.

Metoda za hitro dimenzioniranje hidravličnih čepov je bila razvita na podlagi analitičnega pristopa. V tem pristopu so bili deloma upoštevani tudi razpoložljivi diagrami. Metoda temelji na standardu DIN 743 (za gredi in osi), od koder izvirajo tudi kriteriji statične in dinamične trdnosti. Poleg tega metoda dodatno vključuje scenarije delovanja bata na glavo in koren čepa. Za enostavnejšo, hitrejšo in natančnejšo uporabo razvite metode je bilo izdelano namensko orodje v Excelu.

Reference

- [1] https://www.researchgate.net/publication/ 240014095_A_SemiAnalytical_Finite_Element_Approach_in_Machine_Design_of_Axisymmetric_Structures, nazadnje ogledano 19. 3. 2024.
- [2] https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/ans_ help_v182/ans_elem/HIp_E_PLANE182.html, nazadnje ogledano 19. 3. 2024.
- [3] https://dk.um.si/Dokument.
 php?id=16263&lang=slv, nazadnje ogledano
 18. 3. 2024.
- [4] https://www.mesys.ch/doc/DIN743_CalculationBasis.pdf, nazadnje ogledano 12. 3. 2023.

Simulation of mechanical response for non-standard plugs

Abstract:

The paper depicts simulation activities performed with purpose of evaluation the mechanical response of a non-standard plug as a result of different loading scenarios. Detailed understanding of mechanical response of a plug can be understood as a prerequisite for the appropriate experimental validation, appropriate preparation of test samples and last but not least, also for the correct determination of guidelines for design of such components.

Thanks to detailed simulation model, mechanical response (stresses, displacements and strains) has been closely observed. Stress field helps to identify areas where design modifications are needed (for properly performed experiments via implementation of strain gauges) as well as to identify "hot-spots" on plug that affects structural integrity.

Based on understanding of mechanical response of original plug design, further design changes have been performed. It turns out that the latter do not significantly affect the stress-strain response. For static dimensioning of original plugs, the loads measured on the modified plugs can therefore be used without significant deviations.

Keywords:

non-standard plug, numerical investigation, finite element method, preload force, tightening torque, design guidelines

YASKAWA

Controlled by

18 INASKAWA

RAZVIT IN IZDELAN V SLOVENIJI

GLAVNE PREDNOSTI

- Vitka in robustna zasnova
- Uporaba v različnih robotskih aplikacijah
- 20 kg nosilnosti
- Velik polmer dosega: 1.802 mm
- Hiter / visoki pospeški in pojemki
- Enostaven zagon, uporaba in vzdrževanje

YASKAWA Slovenija d.o.o. www.yaskawa.si