

Analiza mehanskega odziva ohišja jedra elektromagneta

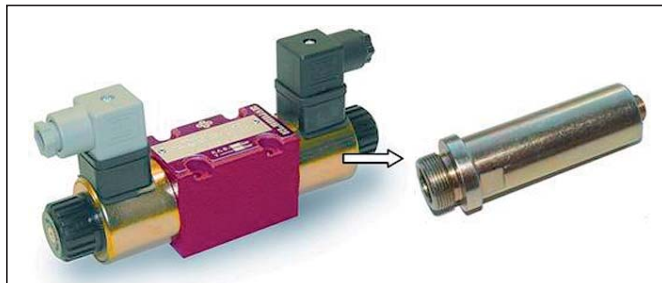
Anže ČELIK, Pino KOC, Boris ŠTOK

Izvleček: V prispevku je predstavljena analiza mehanskih stanj elektromagneta, ki se uporablja za prekrmljenje bata hidravličnega ventila. Na primeru Kladirarjevega EM je bila izvedena trdnostna analiza lotnega spoja in jedra. Izdelan je bil numerični model za analizo po metodi končnih elementov. Mehanski parametri lotnega spoja so bili umerjeni glede na rezultate izvedenega nateznega preizkusa epruvete (jedra). Na osnovi umerjenega modela je bila izdelana mehanska analiza jedra elektromagneta (EM) za primer projektno predvidenega normalnega obratovanja.

Ključne besede: mehanska analiza, elektromagnet, metoda končnih elementov, jedro, kotva, natezni preizkus,

■ 1 Uvod

Osnovni element elektromagneta je jedro valjaste oblike (slika 1), v kate-



Slika 1. Prikaz vgradnje jedra EM v potni ventil [1]

rem se giblje kotva pod vplivom elektromagnetnih sil. Obdaja ga akrov s tuljavo, ki je izpostavljena enosmernemu toku. Jedro je pod tlakom hidravlične tekočine. Ta povzroča utripno obremenitev velikosti med 0 in 250 bari. Jedro elektromagneta mora vzdržati približno 1×10^7 preklpov in s tem tudi toliko nihajev tlaka.

Anže Čelik, univ. dipl. inž., Kladirar Žiri, d. d., Žiri;
as. dr. Pino Koc, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, prof. dr. Boris Štok, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo – LNMS

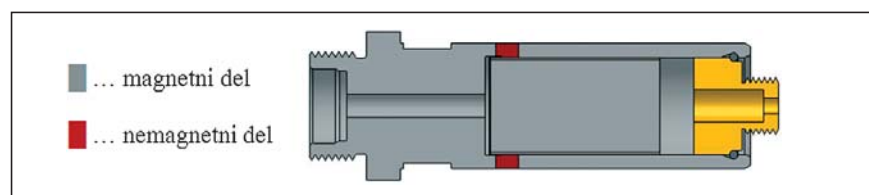
Jedro EM je sestavljeno iz dveh različnih materialov (slika 2):

- osnovni material je avtomatno jeklo z dodanimi legirnimi elementi, v osnovi **magnetno**,
- lotni spoj je na osnovi bakra (bakrov lot) z dodanimi legirnimi elementi, **nemagnetno**.

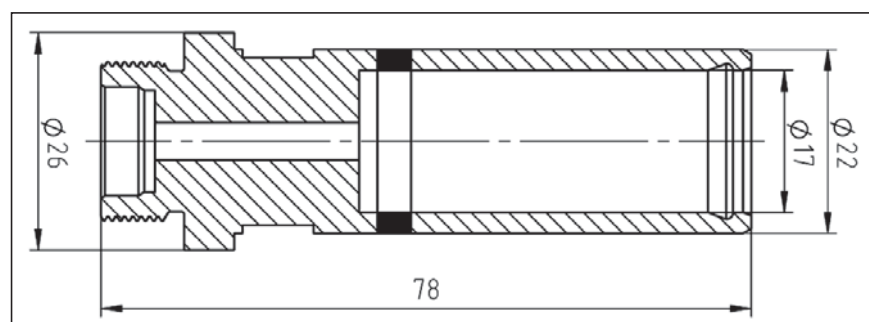
Lotni spoj se pri trajnostnih testih izkaže za najšibkejšo točko na celotnem jedru. Razlog za izbrani način spajanja dveh magnetnih materialov z lotnim spojem je v elektromagnetizmu.

Izmere jedra elektromagneta

Detajlne izmere jedra EM so na voljo v raziskovalni enoti podjetja Kladirar, d. d.

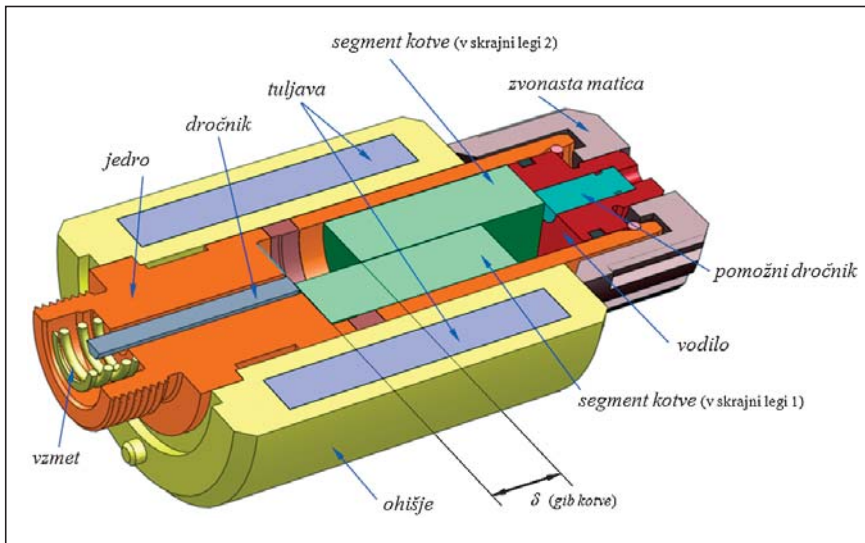


Slika 2. Razdelitev jedra EM glede na lastnosti materialov



Slika 3. Glavne izmere jedra EM

Prikaz sestave jedra elektromagneta



Slika 4. Sestavni deli jedra EM

2.1 Natezni preizkus

Zaradi potreb umerjanja numeričnih simulacij jedra EM je bilo potrebno epruveto izpostaviti enoosnemu napestostnemu stanju (trgalni stroj, slika 5). Takšno stanje je potem najenostavneje primerjati bodisi z materialnimi podatki (npr. mejo tečenja, natezno trdnostjo) bodisi z rezultati numerične analize nateznega preizkusa.

Za uporabljeni material lota sicer vemo, kakšno nosilnost ima, ne poznamo pa nosilnosti spoja, ki je zaradi različnih kemičnih, metalurških idr. vplivov lahko tudi manjša od nosilnosti šibkejšega izmed dveh materialov v lotnem spoju. Zato je namen nateznega preizkusa ugotoviti nosilnost spoja kot celote!

Cilj

Karakterizacija lotnega spoja na osnovi izvedenega nateznega preizkusa in trdnostni preračun jedra¹ EM pod vplivom tlaka fluida.

■ 2 Eksperimentalni del

Eksperimentalni del zajema natezni preizkus epruvete.

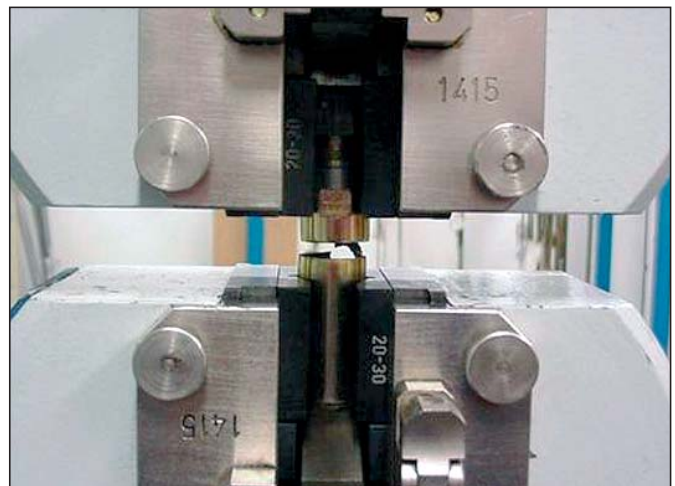
Pred izvedbo nateznega preizkusa je bilo potrebno ugotoviti potrebno vlečno silo za pretrg epruvete in nato poiskati ustrezen trgalni stroj. Izvedena je bila tako 2D- kot 3D-numerična simulacija vleka za določitev velikosti sile in pomikov epruvete ob pretrgu. Tako dobljena velikost sile je znašala približno **40kN**.

Določiti je bilo potrebno tudi način vpetja epruvete v trgalne čeljusti. Možnih je več načinov. Izbrana sta bila dva: prenos sile preko:

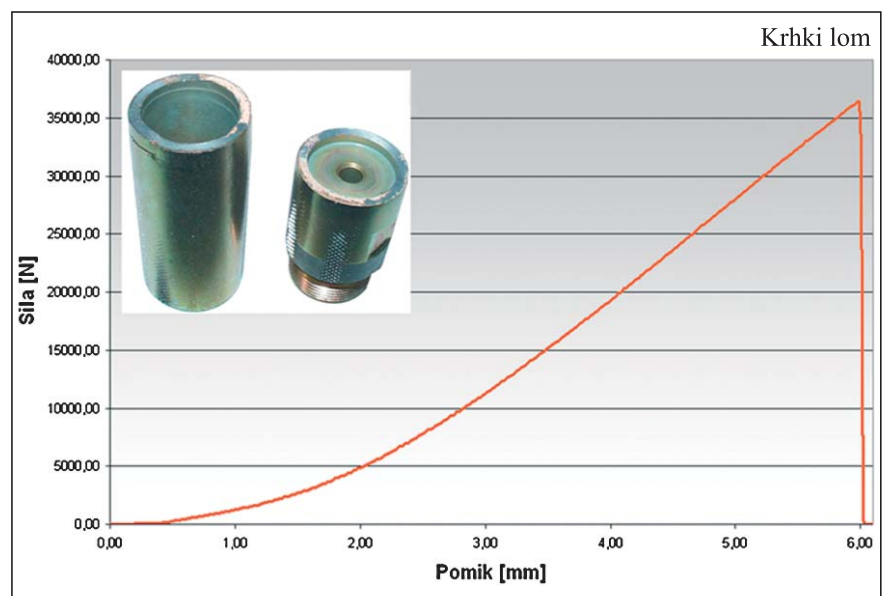
- navojev,
- tornega kontakta (izbran kot najprimernejši).

Pred izvedbo nateznega preizkusa je bil za potrebe numeričnih simulacij privzet idealno izdelan lotni spoj (njegova nosilnost je pogojena s slabšim materialom v stiku).

Po opravljenem nateznem preizkusu pa sta bili tako 2D- kot tudi 3D-simulacija ustrezno umerjeni (modifikacija lastnosti lotnega spoja) in ponovno izvedeni. Rezultati numerične simulacije v poglavju 3 so prikazani po umerjanju.

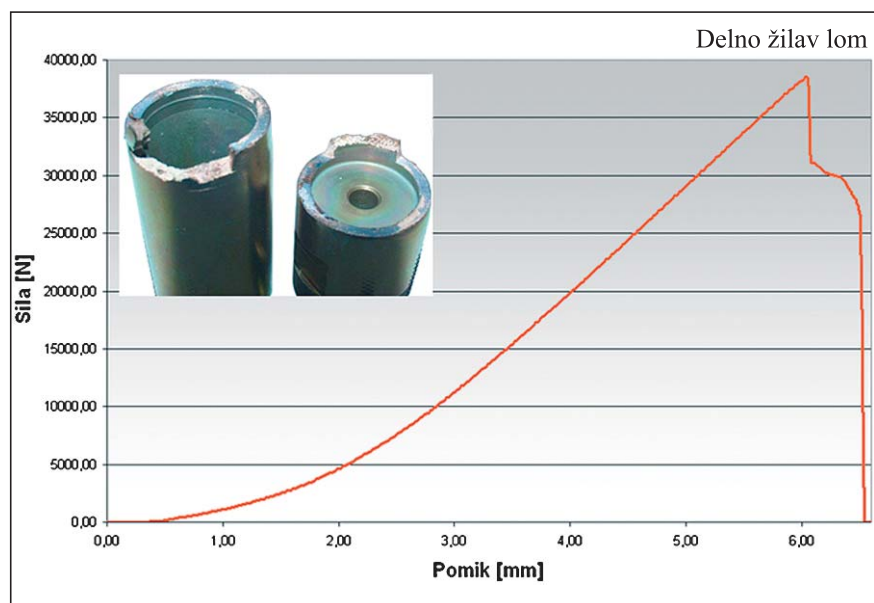


Slika 5. Vpetje epruvete v čeljusti trgalnega stroja



Slika 6. Hipna porušitev epruvete

¹ Jedro EM je v nadaljevanju imenovano epruveta!



Slika 7. Počasna porušitev epruvete

Za jedro EM so bile opravljene 4 analize različnih tipov:

- natezni preizkus na trgalnem stroju in ustrezna statistična analiza,
- 2D-elasto-plasto-mehanska analiza nateznega preizkusa epruvete,
- 3D-elasto-plasto-mehanska analiza nateznega preizkusa epruvete,
- 2D-elasto-plasto-mehanska analiza jedra pod vplivom hidravličnih obremenitev pri normalnem obratovanju.

Na prelomni površini lota (slika 8 in slika 9) so opazne sledi jekla. Iz tega sklepamo, da najprej počni magnetni (jekleni) del jedra. To je zanimivo odkritje, saj ima jeklo precej višjo porušitveno trdnost v primerjavi z lotom. Razlog gre iskati v različnem modulu elastičnosti obeh materialov (glej: tabela 1, tabela 2). Lot se izkaže kot precej bolj duktilen, saj omogoča precej večje kontrakcije in dilatacije v primerjavi z jeklom.

Začetni položnejši del krivulje na obeh slikah (slika 6, slika 7) je posledica zajedanja zobcev čeljusti v stene epruvete, zdrsov, zračnosti in deformabilnosti sestava (stroja, vpenjalnih glav in čeljusti). Vsota vseh teh (motilnih) vplivov se odraža v pomiku vlečnega jarma na trgalnem stroju. Pomik vlečnega jarma pa je veliko večji od realnega raztezka epruvete, ki ga je mogoče dobiti s simulacijo oz. izmeriti na razbremenjeni epruveti.

Povečan prikaz prelomne površine na epruveti

Na realni pretrgani epruveti (slika 8, slika 9) je v grobem opaziti dve barvni skali; temnejša predstavlja jeklo (magnetni del), svetlejša pa lot (nemagnetni del). Levi del slik predstavlja prelomno ploskev na lotu, na kateri pa opazimo ostanke jekla – temna površina. Analogno velja tudi za prelomno ploskev jekla. Omenjena ugotovitev je dokaz, da dejansko počni jeklo in ne lot.

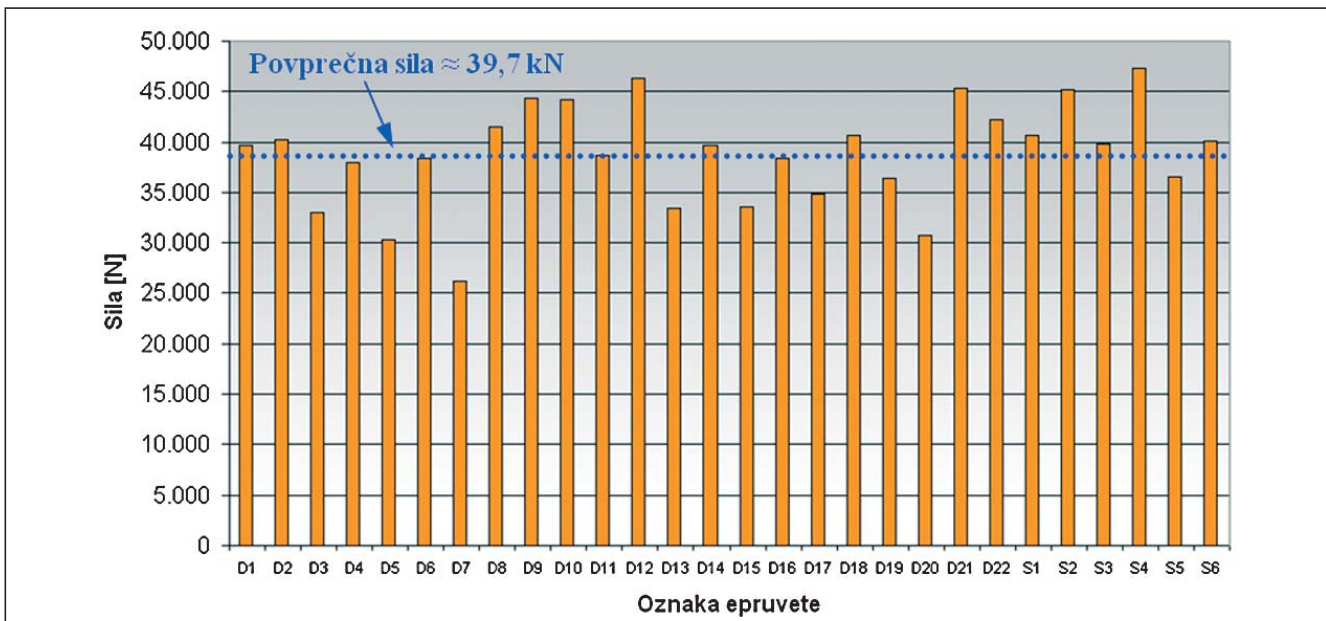
Preizkušenih je bilo 28 epruvet, od katerih jih je bilo 22 normalne izdelave, preostalih 6 pa je imelo vidne



Slika 8. Krhki prelom – hipna porušitev epruvete



Slika 9. Delno žilav prelom – počasna porušitev epruvete



Slika 10. Zrušilna sila epruvet ² $n = 28$

tehnološke napake³ pri izdelavi. Kot se je izkazalo kasneje, te niso odstopale od povprečja. Epruvete so prenesle vlečne sile v raztrosu med 30 – 45 kN, z dvema izjemama, ki ne sodita v omenjeni raztros. Povprečje vlečnih sil znaša 39,67 kN, standardni odklon (deviacija) pa $s = 5155N$.

2.2 Ugotovitve in zaključki:

- vse epruvete so najprej počile v predelu spoja. Vzrok gre iskati v vplivu togega (skoraj polnega prereza) magnetnega dela jedra na bolj deformabilen cevasto oblikovan preostali del;
- oblika (hrapavost) pretrgane cone epruvete (slika 6, slika 7): v večini primerov gre za žilavi zlom, ki ima za posledico grobo površino. Začetna površina je sicer gladka, kar kaže na hipno začetno razpoko. Žilavost (duktilnost) materiala pa je razlog, da je za popoln pretrg še potrebna določena sila, ki pa povzroči pretrg v dveh ravninah. Fina površina (krhki lom) je pri vseh vlečnih hitrostih, kar izključuje njen vpliv;
- precejšen raztros sile, potrebne za pretrg epruvete (slika 10); vzrok gre iskati v tehnologiji izdelave

² n...vzorčno število

³ tehnološke napake, ki se odražajo v nepopolni obliki bakrovega lota (geometrijska nepopolnost oblike kolobarja), so nastale pri zaključku postopka lotanja

lota oz. v (ne)sposobnosti ponovljivega postopka lotanja (lotni spoji s trdnostnega vidika niso identični). Na standardni odklon pretržne sile imajo vpliv tudi zaostale napetosti, ki so posledica postopka lotanja.

Zaključimo lahko, da je na vseh epruvetah kritično mesto prav spoj med magnetnim in nemagnetnim delom. Spoj se izkaže za kritičnega pri obremenitvi s konstantnim tlakom (poglavje 3) kot tudi pri trajnostnem testu v podjetju.

3 Numerični del

Po opravljenem nateznem preizkusu epruvete so bile numerične simulacije ponovno izvedene in ustrezno umerjene (kalibrirane) glede na rezultate nateznega preizkusa. Numerični del je bil izveden s programskim paketom ABAQUS, katerega ima za pedagoško-raziskovalne namene laboratorij LNMS na fakulteti za strojništvo v Ljubljani.

Tabela 1. Prikaz materialnih karakteristik avtomatnega jekla

1.0715	Simbol	Enota	Vrednosti
Modul elastičnosti	E	N/mm^2	205000
Natezna trdnost	R_m	N/mm^2	460–710
Raztezek	A	%	min. 8
Meja tečenja	$R_{p0.2}$	N/mm^2	min. 375
Poissonovo število	μ	/	0,3

Prikazane napetosti se nanašajo na povprečno dobljeno vlečno silo pri nateznem preizkusu (statistično povprečno dobljena vlečna sila po mediani), kar nadalje pomeni, da bo 50 % epruvet vzdržalo omenjeno velikost sile →

50-odstotna verjetnost preživetja. Glede na letno število izdelanih jeder bi bila še sprejemljiva verjetnost preživetja 99,9 %, kar bi posledično ob predpostavki Gaussove porazdelitve verjetnosti pomenilo nižjo dopustno silo.

3.1 Materialne karakteristike

Jedro elektromagneta vsebuje 2 tipa materialov: magnetni in nemagnetni. Prvi je avtomatno jeklo na osnovi ogljika, drugo pa lot na osnovi bakra. Osnovne karakteristike so predstavljene v nadaljevanju.

Avtomatno jeklo: magnetni del jedra

Lot na osnovi bakra: nemagnetni del jedra

Tabela 2. Prikaz materialnih karakteristik lota

2.1461	Simbol	Enota	Vrednosti
Modul elastičnosti	E	N/mm^2	125000
Natezna trdnost	R_m	N/mm^2	370
Raztezek	A	%	44
Meja tečenja	$R_{p0,2}$	N/mm^2	130
Poissonovo število	μ	/	0,358

Vzmetno jeklo

Tabela 3. Prikaz materialnih karakteristik vzmetnega jekla

1.5022	Simbol	Enota	Vrednosti
Modul elastičnosti	E	N/mm^2	210000
Natezna trdnost	R_m	N/mm^2	1200–1400
Raztezek	A	%	6
Meja tečenja	$R_{p0,2}$	N/mm^2	1050
Poissonovo število	μ	/	0,3

Vzmetno jeklo je bilo uporabljeno pri modeliranju in kasneje pri simulaciji vskočnika kot del jedra EM, ki preprečuje aksialne pomike sornika (slika 29).

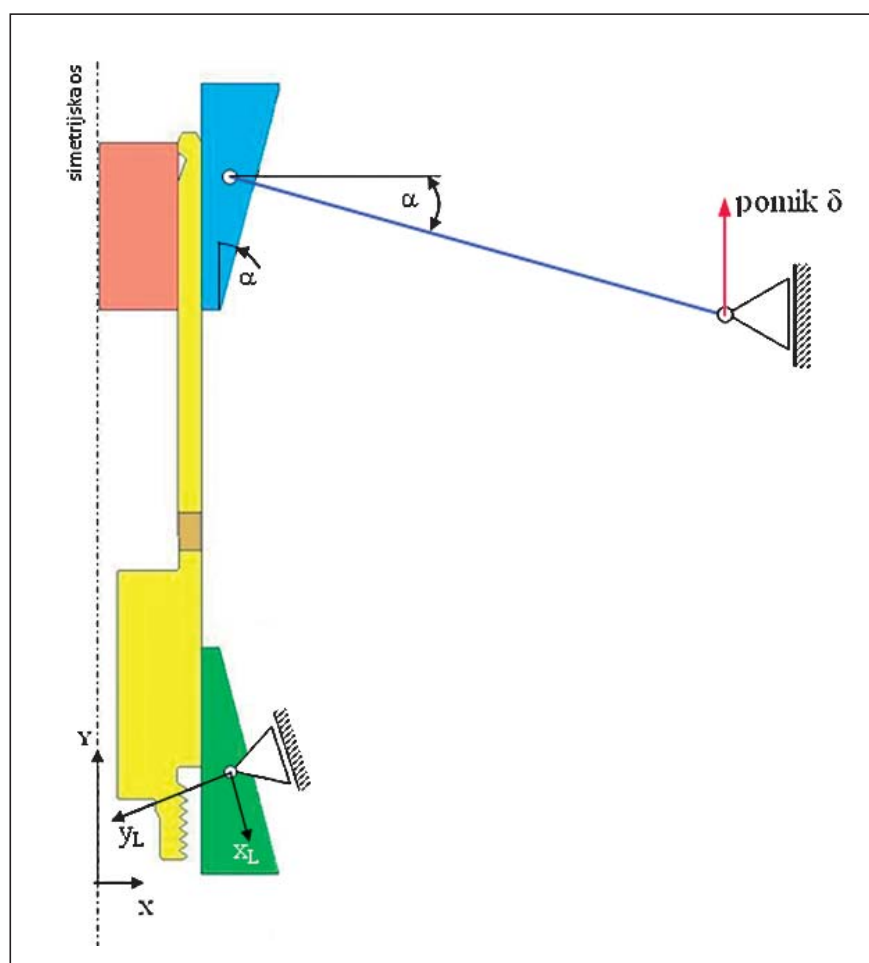
3.2 2D-simulacija nateznega preizkusa epruvete

3.2.1 Robni pogoji, obremenitve

Da je mehanski problem (v matematičnem smislu) dobro pogojen, je potrebno ustrezno določiti fizikalne razmere na robu sistema. Glede na konjugiranost primarne (pomik, zasuk) in sekundarne (sila, moment) spremenljivke na robu sistema pomeni, da poznavanje ene od njiju izključuje poznavanje druge. Na problemu epruvete omenjeno pomeni, da sta poznana pomik in zasuk tornih čeljusti (prva primarna spremenljivka je zelena velikost pomika, prva sekundarna spremenljivka je nepoznana).

Jedro elektromagneta je zaradi privzeta popolne osne simetričnosti v radialni smeri podprto samo po sebi (rezultanta sil je enaka 0). V aksialni smeri je podprto preko kontakta in konične čeljusti ($\alpha = 15^\circ$), vlečno čeljust pa pomikamo za izbrano

vrednost. Prostostne stopnje spodnje čeljusti (zelena barva, slika 11) so



Slika 11. Obremenitev epruvete preko mehanizma

bile transformirane v lokalni koordinatni sistem x_L, y_L .

Epruveta izkazuje le geometrijsko osno simetrijo, ne pa tudi osne simetrije glede obremenitev (to je bilo potrebno zanemariti pri 2D-analizi). Prav omenjeni razlog je tudi glavni vzrok za delno odstopanje med rezultati 2D- in 3D-numerične analize epruvete.

3.2.2 Rezultati 2D-numerične simulacije

- Misesove primerjalne napetosti:

V homogenem in izotropnem materialu se prične plastična deformacija, ko napetost preseže napetost tečenja. Pri enoosnem napetostnem stanju je ta napetost imenovana σ_0 in je neposredna funkcija vlečne sile. Pri triosnem napetostnem stanju pa moramo σ_0 izračunati tako, da izračunamo primerjalno napetost. Kadar ta preseže napetost tečenja, se prične material preoblikovati.



Slika 12. Ekvivalentne napetosti na celotnem jedru

Misesov pogoj tečenja:

$$(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 = 2 \cdot \sigma_0^2 \quad (1)$$

V primeru osne simetrije je

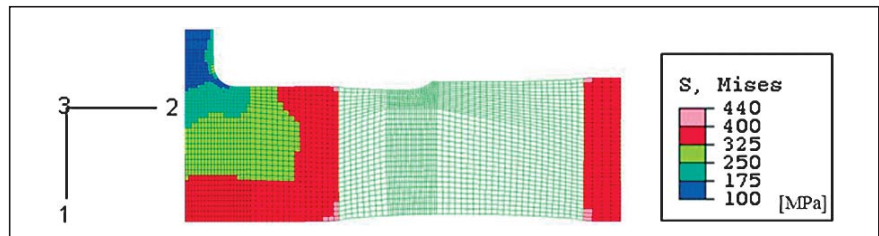
$$\sigma_{11} = \sigma_{rr}, \quad \sigma_{22} = \sigma_{\varphi\varphi}, \quad \sigma_{33} = \sigma_{\theta\theta}$$

Kot je pokazal natezni preizkus, je kritično mesto lotni spoj. Prav vse epruvete so kolapsirale na omenjenem spoju. Zato velja pri analiziranju numeričnega modela posvetiti posebno pozornost prav področju lotnega spoja.

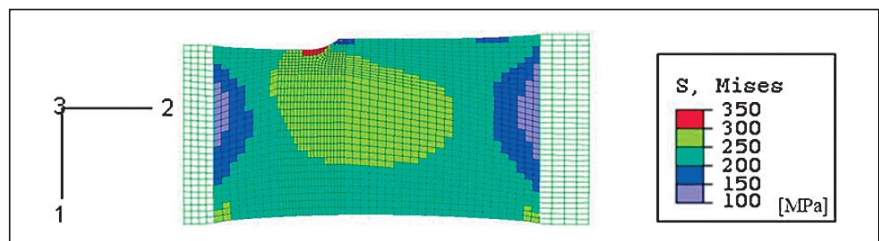
- Misesova primerjalna napetost magnetnega in nemagnetnega dela jedra:

Maksimalne napetosti (slika 13) se na magnetnem delu pojavijo na levem delu lotnega spoja, torej na mestu, kjer epruveta tudi dejansko počí. Čeprav ima nemagnetni del epruvete (slika 14) slabše materialne lastnosti od magnetnega dela, odpove prav ta, ker ne dopušča tolikšnih raztezkov ali kontrakcij, kot jih je zmožen nemagnetni del (različna modula elastičnosti). Plastifikacija je lokalna, saj napetosti z oddaljevanjem od lotnega spoja padejo na nižje vrednosti.

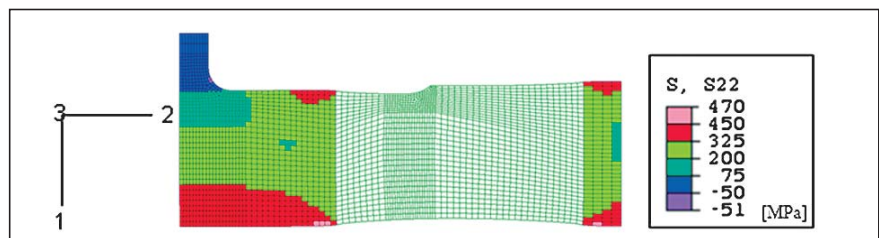
- Napetosti v aksialni smeri **S22**
Mesto maksimalne pozitivne aksialne napetosti se nahaja na področju lotnega spoja (slika 15). Aksialna napetost tako največ prispeva k skupni primerjalni napetosti, ki pa je dokaj blizu porušni trdnosti magnetnega dela. Iz rezultatov nateznega preizkusa je bilo opaziti, da pri tolikšnih napetostih odpove že 50 % vzorca epruvet. Da bi preživel 99,9 % epruvet, je potrebno obremenitev še znatno znižati.



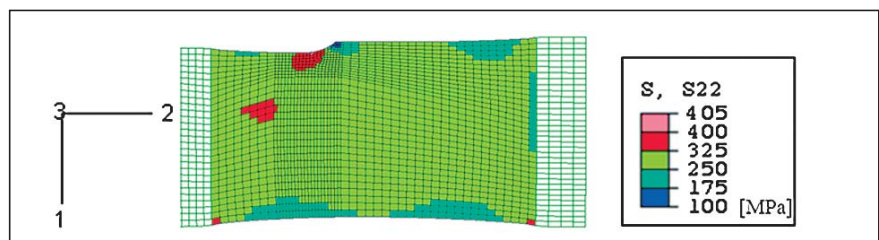
Slika 13. Ekvivalentna napetost magnetnega dela jedra



Slika 14. Misesova primerjalna napetost za lotni del



Slika 15. Aksialne napetosti magnetnega dela

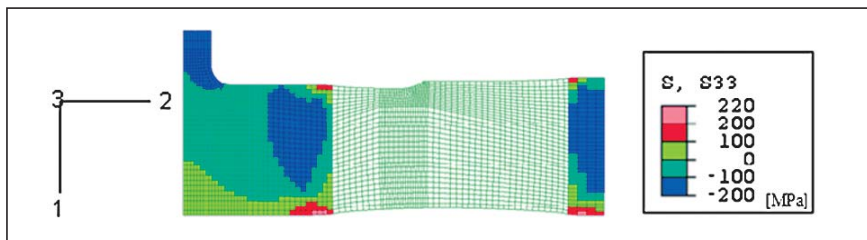


Slika 16. Aksialne napetosti nemagnetnega dela

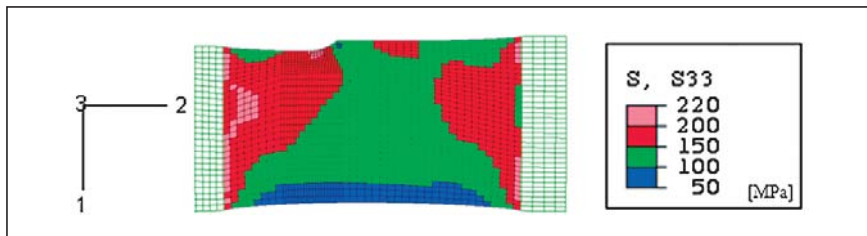
Aksialna komponenta napetosti (slika 16) tudi pri nemagnetnem delu največ prispeva k Misesovi primerjalni napetosti. Zaradi tako velike aksialne napetosti posledično nastanejo razpoke, ki se širijo pravokotno na potek napetosti. V obravnavanem primeru je to v ravnini 1–3.

- Napetosti v obodni smeri **S33**
Tlačne obodne napetosti (slika 17)

načeloma ne predstavljajo nevarnosti za porušitev sistema, bolj kritične so natezne obodne napetosti. Slednje so lahko vzrok nastanka in kasneje širjenja razpok, ki se raztezajo v aksialni smeri. V danem primeru se na zunanji steni jedra pojavijo pozitivne vrednosti obodne napetosti, ki imajo večji vpliv na skupno primerjalno napetost kot strižna komponenta napetostnega tenzorja.

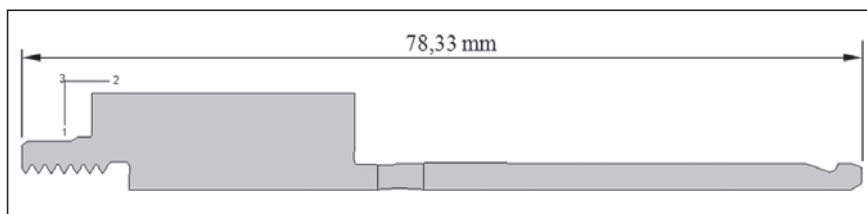


Slika 17. Obodne napetosti magnetnega dela



Slika 18. Obodne napetosti nemagnetnega dela

- Pomiki



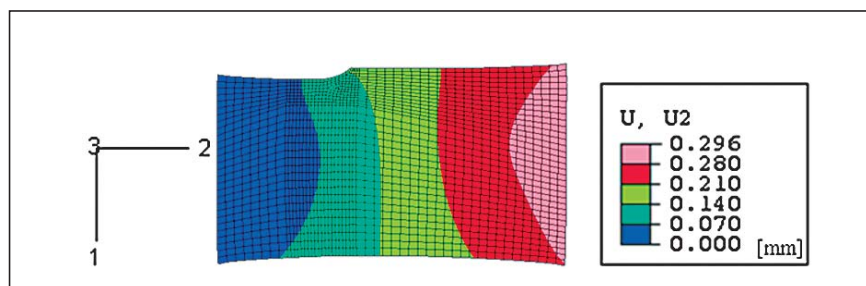
Slika 19. Izmera epruvete v razbremenjenem stanju

Pomiki vozlišč so (poleg zasukov) primarna in tudi fundamentalna spremenljivka napetostno-deformacijske analize po metodi končnih elementov. Preko vozliščnih vrednosti primarne spremenljivke so potem preračunane tudi preostale oz. sekundarne veličine (sile, momenti, napetosti, ...).

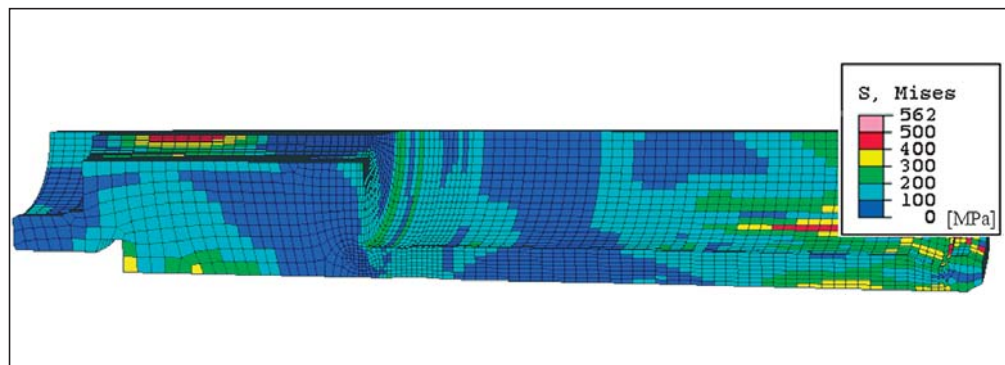
Na zgornji sliki (slika 19) je kotiran celotni raztezek epruvete po razbremenitvi. Neobremenjena in ne deformirana epruveta ima dolžino 78,0 mm, po obremenitvi in nato razbremenitvi znaša njena sprememba dolžine 0,33 mm.

Nemagnetni del jedra

- Pomiki v aksialni smeri **U2**: Slika 20 prikazuje po razbremenitvi trajno deformiran del nemagnetnega dela jedra. Velikost trajnega pomika je prikazana v legendi. Deformacija je precej blizu realnemu raztezkju nemagnetnega dela in od povprečja odstopa za manj kot 7 %. Na sliki zgoraj (slika 20) je viden tudi zožitev



Slika 20. Velikost aksialnih pomikov nemagnetnega dela jedra



Slika 21. Primerjalna napetost za celotno jedro

v radialni smeri, ki ga je moč opaziti tudi na realni epruveti, vendar je tam nekoliko manjši.

3.3 3D-simulacija nateznega preizkusa

Analogno 2D-simulaciji je bila tudi 3D-simulacija izvedena po opravljenem nateznem preizkusu in ustrezno umerjena glede na rezultate nateznega preizkusa. V danem primeru epruveta izkazuje popolno simetrijo 1/4 celote (tako geometrije kot obremenitve), zato je zaradi realnejšega popisa pričakovati boljši numerični približek dejanskemu stanju.

3.3.1 Rezultati 3D-numerične simulacije

S primerjanjem rezultatov 2D- in 3D-numerične simulacije najprej opazimo nekoliko nižje primerjalne napetosti na 3D-modelu (slika 22, slika 23). Spoj na magnetnem delu se analogno 2D-analizi izkaže za kritičnega in predstavlja možnost nastajanja razpok.

- Misesove primerjalne napetosti: Koncentracija napetosti (slika 21 – desni rob) je posledica motilnega

vpliva torne čeljusti trgalnega stroja, ki je bila uporabljena pri simulaciji nateznega preizkusa; koncentracija

napetosti zaradi oddaljenosti ne vpliva na interesno območje (lotni spoj).

Primerjalne napetosti po Misesu v področju lotnega spoja presežejo mejo plastičnega tečenja ($\sigma_{pl} = 130 \text{ MPa}$, slika 23). Tečenje se prične v zaokrožitvi lotnega dela.

Vzorci epruvet so bili naključno vzeti iz proizvodne linije. Zaskrbljujoč je precejšen raztros rezultatov nateznega preizkusa. To kaže predvsem na nehomogenost varilne žice (ki se lota na magnetni del) in vpliv človeškega faktorja.

- Misesove primerjalne napetosti magnetnega in nemagnetnega dela jedra:

Aksialna napetost (S22, slika 24) magnetnega dela epruvete izmed preostalih komponent (S11, S33) napetostnega tenzorja najbolj prispeva k Misesovi primerjalni napetosti. Pravokotno na smer delovanja aksialne napetosti se prične/nadaljuje rast razpok. Slednje so kritične predvsem pri dinamičnem obnašanju izdelka, čemur je jedro elektromagneta tudi izpostavljeno. Pri širjenju razpoke sodelujejo tudi strižne napetosti, ki v danem primeru niso zanemarljive.

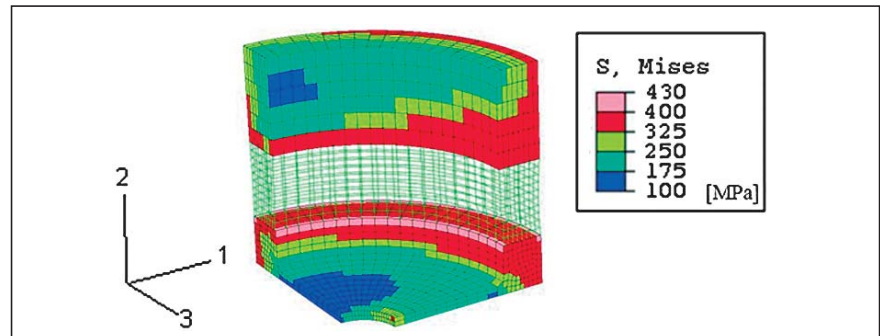
- Napetosti v aksialni smeri S22 (slika 25)
- Pomiki

S slike (slika 26) je razviden plastični del celotnega raztežka po razbremenitvi. Neobremenjena in nedeformirana epruveta je dolga 78,0 mm, po obremenitvi/razbremenitvi pa znaša njena dolžina 78,33 mm. Analogno 2D-simulaciji je tudi v tem primeru dana velikost pomika povsem v skladu s povprečno dejansko izmerjeno na epruvetah.

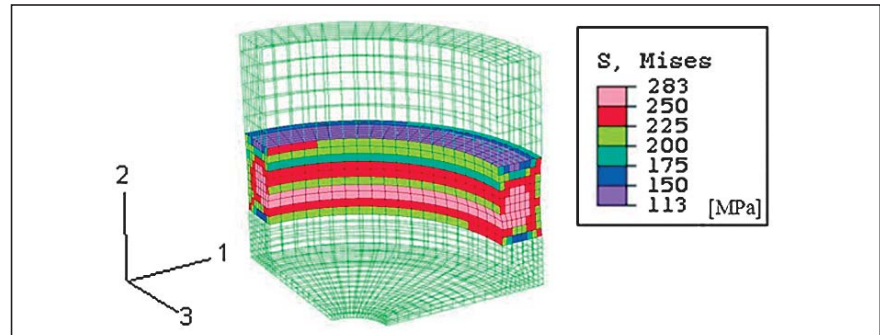
Nemagnetni del jedra

Glavnina prirastka dolžine epruvete je zaradi raztezanja mehkejšega izmed dveh materialov, tj. bakra v lotnem spoju. Dana velikost pomika je v skladu s povprečno dejansko izmerjeno na epruvetah.

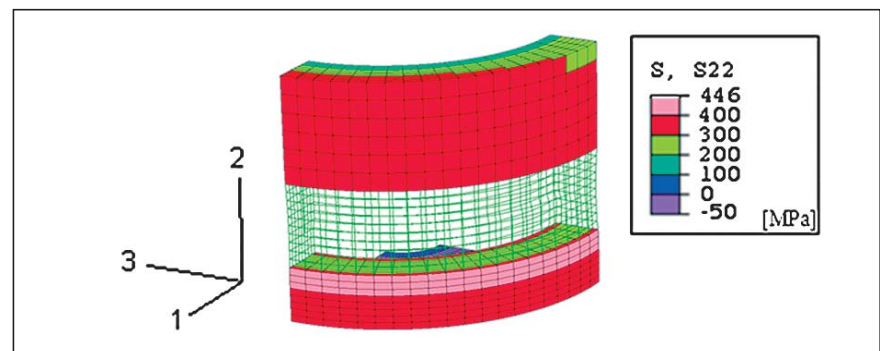
- Pomiki v globalni smeri U2:



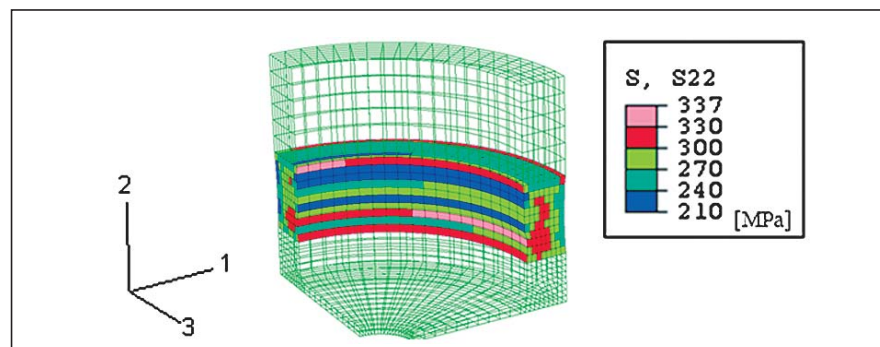
Slika 22. Misesova primerjalna napetost magnetnega dela jedra



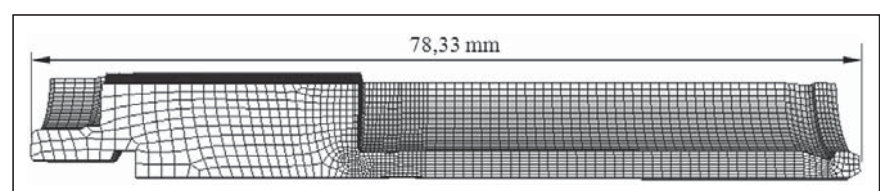
Slika 23. Misesova primerjalna napetost za lotni del



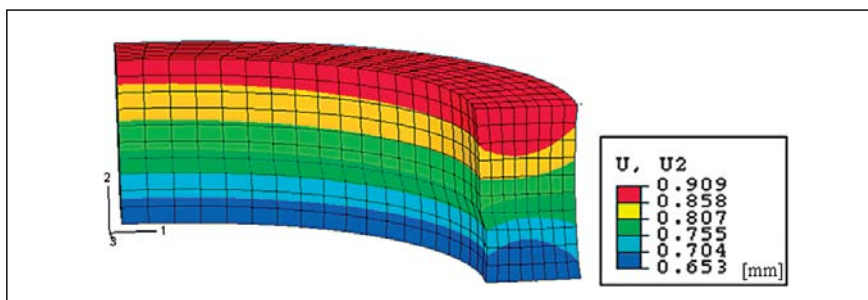
Slika 24. Aksialna napetost magnetnega dela



Slika 25. Aksialna napetost lotnega dela



Slika 26. Pomiki razbremenjene deformirane epruvete



Slika 27. Velikost aksialnih pomikov nemagnetnega dela

Slika 27 prikazuje kotiran razbremenjeni in deformirani del nemagnetnega dela jedra. Velikost nepovračljivega (trajnega) pomika znaša $0,26\text{ mm}$ glede na začetno nedeformirano dolžino. Na sliki je viden tudi zožitev v radialni smeri, analogno 2D-simulaciji.

3.4 2D-simulacija jedra elektromagneta MR-045

Z nateznim preizkusom epruvet (eksperimentalno, numerično) so bile dobljene karakteristike lotnega spoja. Posledično je nato mogoče izvesti numerično simulacijo jedra EM pod vplivom tlaka fluida, upoštevajoč dobljene razmere v spoju.

Namen omenjene simulacije je:

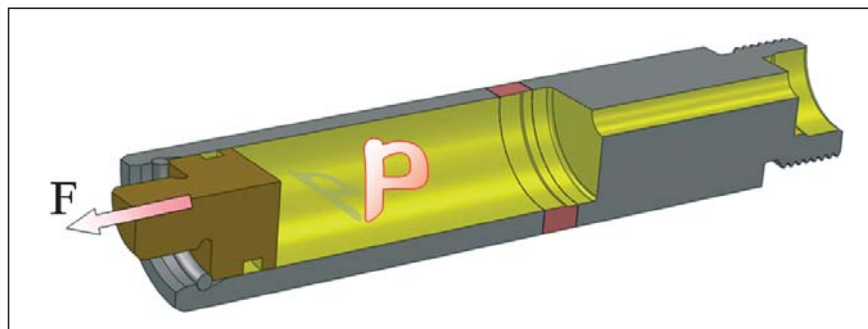
- ugotovitev napetostno-deformacijskega stanja v jedru za 99,9-odstotno verjetnost preživetja pri statičnem tlaku 250 barov,
- napoved obnašanja jedra pri povišanju tlaka na 300 barov pri 99,9-odstotni verjetnosti preživetja.

Rumeni del (slika 28) prikazuje področje tlačne obremenitve jedra EM. Aksialna sila F nastane zaradi generirane elektromagnetne sile v tuljavi in morebitnih drugih vplivov okolja (nenadni pospeški stroja, na katerem je pritrjeno jedro, idr.). EM sila po III. Newtonovem zakonu deluje poleg kotve tudi na tuljavo oz. njen okrov, ta pa je na dročnik pritrjena preko zvonaste matice (slika 4).

3.4.1 Rezultati numerične simulacije jedra EM

Napetostno-deformacijska analiza zajema vpliv tlaka hidravličnega fluida ob povišani temperaturi materiala. Navitje EM se namreč ob normal-

nem delovanju segreje do približno $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, kar povzroči prestop toplote na okolico (jedro) ter s tem spremembo deformacijskega in napetostnega stanja (ta fizikalni pojav ni bil simuliran). Misesova primerjalna napetost nikjer ne preseže meje plastičnega tečenja. Jedro EM tako obratuje

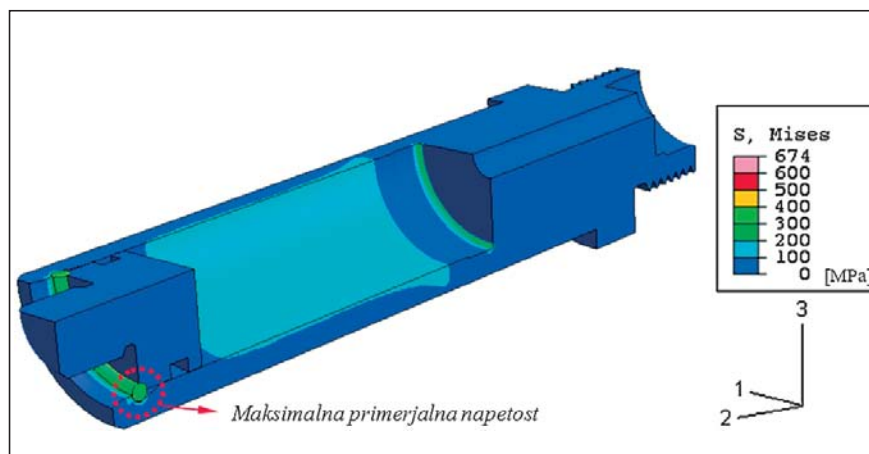


Slika 28. Področje obremenitve jedra (tlak + aksialna sila)

zgolj v elastičnem območju. Pri velikem številu obremenitev prihaja do utrujanja in posledično do utrujenostnega loma, kar pa v prispevku ni obravnavano.

- Misesova primerjalna napetost jedra EM:

na dejanskem jedru. Statični tlak tudi pri večkratni prekoračitvi predpisane ni kritičen za porušitev (lotnega spoja). Šele pri statičnem tlaku med 1300 in 1700 barov se prične degradacija lotnega spoja, kar se opazi kot puščanje medija (olja) – kot las tanka razpoka, ki predstavlja začetek degradacije.



Slika 29. Primerjalna napetost na jedru EM (osnosimetrični model)

Maksimalni dobljeni statični tlak hidravličnega fluida, pri katerem bi preživel 99,9 % epruvet, znaša 836 barov.

■ 4 Zaključek

Natezni preizkus epruvet pokaže kritično mesto za porušitev. To je na spoju magnetnega in nemagnetnega dela jedra. Kljub boljšim materialnim parametrom je jeklo "najšibkejši" člen, kar je posledica manjše duktilnosti oz. večje togosti v primerjavi z lotom. Izkaže se tudi, da spreminjanje hitrosti obremenjevanja (pomika jarma) nima bistvenega vpliva na velikost sile pri pretrgu. Iz oblike pretrganega spoja in velikosti sile, potrebne za pretrg, pa je moč sklepati na (ne)točnost izdelave lotnega spoja.

Iz numerične simulacije nateznega preizkusa je mogoče napraviti neka-

tere pomembne zaključke. Povprečna sila za pretrg epruvete je povsem v skladu z numerično dobljeno, medtem ko so z ustrezno interpretacijo numerično dobljenih pomikov epruvete tudi slednji ekvivalentni realno izmerjenim. Maksimalno odstopanje je znotraj 7 %.

Simulacija jedra EM pod vplivom tlaka hidravlične tekočine je bila izvedena na osnovi karakterizacije lotnega spoja. Izkaže se, da trenutni obratovalni tlak (250 barov [1]), ob predpostavki statičnega obremenjevanja, ni kritičen za nosilnost spoja kot tudi ne za jedro samo. Enaka napoved velja pri povečanju statičnega tlaka do računsko maksimalnih 836 barov.

Za napovedovanje obnašanja jedra pod vplivom dinamičnega (utripnega) obremenjevanja je potrebno poznavanje Wöhlerjeve krivulje za

vse uporabljene materiale in izbrano obremenitev.

Umerjeni numerični model se uporablja na vseh izdelkih podjetja Kladivar, katerih sestavni del je elektromagnet.

Literatura

- [1] Elektronski katalog izdelkov podjetja Kladivar, d. d., www.kladivar.com.
- [2] Kladivar Žiri, d. d., slikovna dokumentacija produktov, Žiri 2007.
- [3] Anže Čelik, Analiza mehanskega odziva ohišja jedra elektromagneta, diplomsko delo, Ljubljana 2008.
- [4] Elektronska navodila za uporabo programskega paketa ABAQUS
- [5] Getting started, Navodila za uporabo programskega paketa ABAQUS

Analysis of the mechanical response of an electromagnet core housing

Abstract: This degree paper discusses the analyses of the mechanical states of an electromagnet that is used for steering a hydraulic valve piston. For the example of a Kladivar electromagnet the strength analyses of a brazed joint and core were performed. A numerical model was made for the analysis method according to the finite-element method. The mechanical parameters of the brazed joint were calibrated according to the results of the performed straining test of the core. The mechanical analysis of the electromagnet on the basis of the calibrated model was made for the case of normal operation, anticipated by the project.

Keywords: mechanical analysis, electromagnet, finite-element method, core, armature, tension test,

Uporabljeni simboli

EM elektromagnet

σ_{ij} komponenta napetostnega tenzorja [MPa]

$2D$ dvodimenzionalni (prostor)

$3D$ tridimenzionalni (prostor)

nadaljevanje s strani 437

■ Hybridantriebe für Mobile Arbeitsmaschinen (Hibridni pogoni mobilnih strojev)

18. 02. 2009

Karlsruhe, ZRN

Organizatorja:

- Universität Karlsruhe (TH) – Institut für Fahrzeugtechnik und mobile Arbeitsmaschinen
- VDMA

Tematika:

- Električni ali hidrostatični pogoni
- Možnosti in potenciali povratnega pridobivanja energije
- Možnosti akumuliranja energije
- Vplivi zakonodajnih predpisov o izpušnih plinih na hibridne pogone

Informacije:

- naslov: Universität Karlsruhe (TH), Gotthard-Franz-Straße 8, 76131 Karlsruhe, BRD
- e-pošta: hybridtagung@ima.uni-karlsruhe
- internet: www.mobima.uni-karlsruhe.de/hybridtagung.php

nadaljevanje na strani 463