

RAZVOJ, IZDELAVA IN TESTIRANJE PROPORCIONALNEGA POTNEGA VENTILA, IZDELANEGA S 3D-TISKANJEM KOVIN IN Z UPORABO TOPOLOŠKE OPTIMIZACIJE

Jan Bartolj, Ana Trajkovski, Franc Majdič, Anže Čelik

Izveček:

V zadnjih letih so se v proizvodnjah začele uporabljati dodajalne tehnologije tudi kot orodja za izdelavo večjih serij. Z uporabo različnih materialov lahko dosežemo najrazličnejše oblike končnih izdelkov, tudi take, ki jih z drugimi postopki ne bi mogli izdelati. S tem, ko se je začel vse bolj razvijati in uporabljati tisk kovinskih materialov, se lahko upravičeno sprašujemo, kako se taki izdelki primerjajo s tistimi, ki so izdelani s konvencionalnimi postopki, kot sta tlačno litje in rezkanje.

Že zelo zgodaj so se v kovinskih materialih začeli tiskati tudi izdelki za uporabo na najrazličnejših področjih hidravlike. Zaradi narave izdelovalnega postopka in zmožnosti izdelave kompleksnih notranjih oblik lahko hidravličnim komponentam vidno izboljšamo karakteristike. Ena izmed teh je tudi masa izdelka, pri kateri najhitreje opazimo prostor za izboljšavo, saj se ponudi veliko možnosti za optimizacijo geometrije.

V našem primeru smo pri izdelavi ventila odstranili kar dve tretjini začetne mase, ki jo ima ventil, izdelan z rezkanjem. Poleg tega smo mu lahko izboljšali tudi pretočne karakteristike zaradi kompleksne notranje geometrije. Vse to smo lahko dosegli z uporabo sodobnih orodij za numerične analize, simulacije in optimizacije.

Ključne besede:

3D-tisk kovin, hidravlika, dodajalne tehnologije, optimizacija, numerične analize, topološka optimizacija

1 Uvod

Trendi trajnostnega razvoja kažejo v smeri manjše porabe goriv in boljšega izkoristka strojev. Te cilje lahko dosegamo na različne načine. Eden izmed njih je tudi zmanjševanje mase komponent ter posledično strojev, ki te komponente vključujejo. Zmanjševanja mase komponente smo se lotili z uporabo moderne postopka izdelave – 3D-tiska. Ta omogoča izdelavo kompleksnih oblik, ki bi jih z drugimi postopki izdelovali več časa ali pa jih sploh ne bi mogli izdelati. Nemogoča je predvsem izdelava zahtevnih notranjih geometrij, ki jih s frezalom ne moremo doseči.

Za osnovo smo si izbrali 4/3 proporcionalni potni

ventil nazivne velikosti 6, ki je bil izdelan z rezkalnim strojem [1]. Ker smo želeli rezultate direktno primerjati, smo se držali standarda ISO 4401 [2], ki predpisuje priključne mere ventila. Z upoštevanjem zahtev standarda smo zagotovili tudi zamenljivost ventila: novi ventil lahko kadarkoli zamenja katerikoli ventil, izdelan po istem standardu.

Dodatne zahteve so, da mora ventil nemoteno delovati do tlaka 350 bar ter imeti optimirano notranjo geometrijo za pretok kapljevine do vključno 50 l/min. Pred izdelavo smo ta dva parametra upoštevali pri numeričnih analizah trdnosti ter pretoka skozi ohišje.

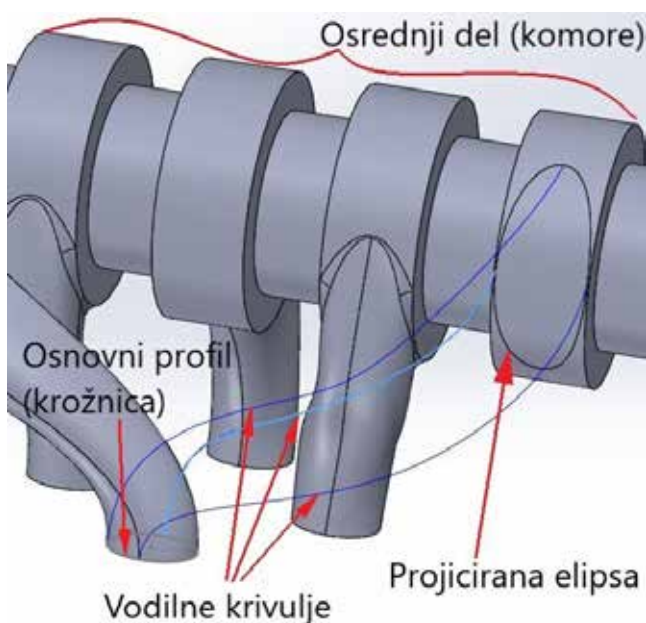
2 Razvoj oblike ohišja ventila

Zaradi predvidenega tridimenzionalnega kovinskega tiskanja ohišja ventila smo bili s stališča konstruiranja precej bolj svobodni, saj nas niso omejevale zahteve, ki jih pogojuje izdelava s tlačnim litjem ali z obdelavo na CNC-stroju. V programu SolidWorks

Jan Bartolj, dipl. inž., dr. Ana Trajkovski, univ. dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; mag. Anže Čelik, univ. dipl. inž., Poclain Hydraulics, d. o. o., Žiri; doc. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

smo izdelali več različnih modelov, katerim smo želeli že v prvih korakih odstraniti čim več volumna, da bi dosegli čim manjšo maso. CAD-model ohišja smo izdelali tako, da so bile stene na najtanjših mestih debele vsaj 3 mm. To je bilo določeno na podlagi izkušenj, ki smo jih v LFT (Laboratorij za fluidno tehniko) pridobili med testiranjem na podobnih materialih pri tlakih do 350 bar. Ker smo nameravali ohišje ventila natisniti s 3D-tiskalnikom kovin, smo ga lahko zasnovali tako kompleksno, da ga z drugimi postopi ne bi mogli izdelati. Uporabljeni 3D-tiskalnik kovin EOS M290 deluje po metodi SLM (*ang. selective laser melting*) ali izbirnega laserskega pretaljevanja. Poleg tega, da se na določenih mestih material pretali, se zaradi visoke temperature laserskega žarka material sproti tudi lokalno kali in s tem utrjuje. Končni izdelek bo imel zaradi izdelave po plasteh anizotropne lastnosti, ki jih odpravljamo s postopkom naknadne toplotne obdelave [3] [4].

Kot osnovo za konstruiranje smo izbrali notranje drsne površine, kjer naseda bat, ter obliko spodnjega dela ohišja, kjer se ventil priključi na osnovno ploščo. Profile iz osnovne plošče smo nato z vodilnimi krivuljami povezali do zgornjih komor, kjer bo kasneje kapljevina zaokrožila okoli krmilnega bata. Ker so bile krivulje izdelane s postopkom projiciranja, se enostavno spreminjajo v vseh treh smereh koordinatnega sistema, s čimer se spreminja potek notranjih kanalov. Vodilne krivulje torej povezujejo osnovni profil na priključni plošči z elipsami, ki so bile projicirane na komore zgornjega dela. Elipse so se namreč izkazale za najbolj učinkovite po količini pretoka glede na obliko. Za lažjo predstavbo je na *sliki 1* prikazan potek izdelave enega izmed razbremenilnih vodov ohišja ventila.



Slika 1 : Poenostavljen prikaz postopka modeliranja ventila (86 mm x 40 mm x 35 mm)

Ker smo izdelali notranjost ventila kot nenično (negativ volumna) geometrijo, smo v naslednjem koraku izvedli inverzijo s preprostim ukazom v SolidWorksu. S tem smo geometrijo obrnili »navzven« s predpisano najmanjšo dovoljeno debelino stene. Ta je, kot že omenjeno, znašala 3 mm. Po izvršenem ukazu nam je ostala zunanja geometrija kot ste-na prejšnje geometrije. To je bil tudi prvi približek končnega ohišja ventila. Ta je prikazan na *sliki 2*. Na levi strani vidimo še geometrijo ventila, prerezano s poševno postavljeno ravnino.



Slika 2 : Geometrija ventila, pripravljena za numerične analize trdnosti in notranjega pretakanja (86 mm x 47 mm x 43 mm)

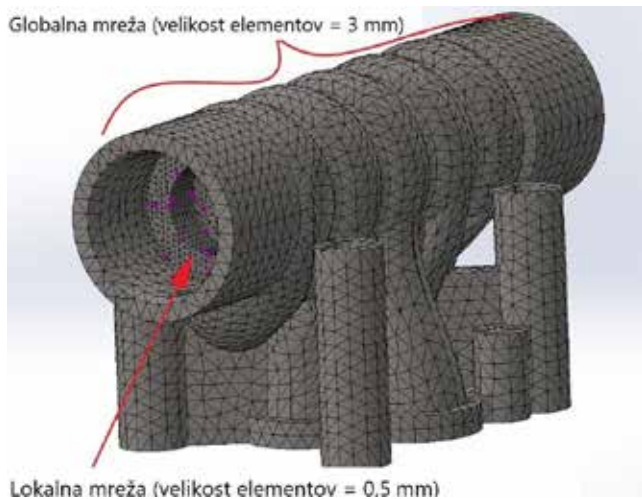
Ta geometrija ventila bo služila kot osnova vsem prihodnjim različicam ventila, najprej pa bomo na njej izvedli tudi numerične analize trdnosti (MKE) ter pretočnosti (CFD).

3 Numerične analize

Analize trdnosti

Hidravlični ventili so običajno izdelani s postopkom rezkanja ter struženja iz polnega kosa jekla ali drugih materialov. To pomeni, da je njihova končna oblika kvader, ki obremenjenim delom, na katere pritiska tlak hidravlične kapljevine, zagotavlja izredno veliko podporo s tem, da so stene ventila masivne. Kot prvo predpostavko pri izdelavi geometrije ventila za izdelavo s 3D-tiskom smo izbrali parameter debeline stene 3 mm, s čimer smo odstranili tudi togost celotne konstrukcije. Iz tega izhaja, da smo morali izdelati zelo podrobne trdnostne analize, da ugotovimo, ali bo končni izdelek res vzdržal tlak, ki se bo pojavil v ventilu. Predviden najvišji delovni tlak na notranje stene ventila je bil 350 bar, izbrani material, ki nam poda materialne lastnosti, pa nerjavno orodno jeklo X3NiCoMoTi [5]. S tem smo določili materialne lastnosti, mejo tečenja materiala pri 2010 GPa ter gostoto 8,1 g/cm³.

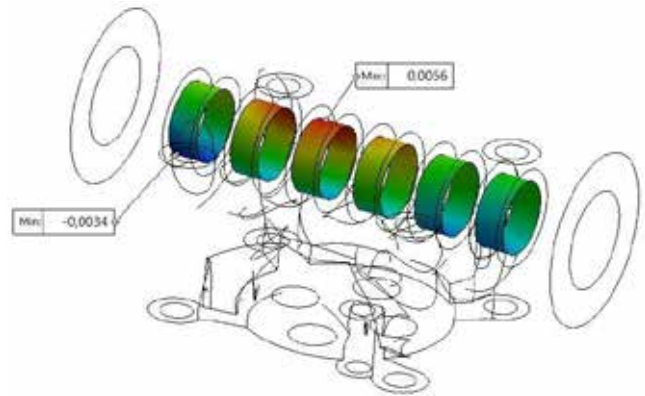
Model smo v sklopu trdnostnih analiz mrežili s tetraedričnimi končnimi elementi velikostnega razreda 1 mm ter na kritičnih mestih uporabili lokalne gostitve. Analize smo nato ponavljali pri nespreme-



Slika 3 : Mrežni model ventila s prikazano lokalno gostitvijo mreže na kritičnem mestu (86 mm x 47 mm x 43 mm)

njenih parametroh za različne velikosti mreže. S tem, ko mrežo gostimo in večamo število končnih elementov, namreč izboljšujemo rezultat in ga bližamo pravi vrednosti. Prav tako pa s tem podaljšujemo računski čas, zato uporaba izredno majhnih končnih elementov ni smiselna. Mrežo smo torej gostili, dokler se je rezultat znatno spreminjal. Ko pa smo opazili da se trend rezultatov približuje določeni vrednosti in se znatno ne spreminja več, smo gostitev ustavili in uporabili zadnje dobljene rezultate. Na *sliki 3* je viden mrežni model ventila z lokalno gostitvijo.

Kot rezultate numeričnih analiz smo spremljali globalne pomike glede na največjo inducirano napetost v materialu ter glede na pomike krmilnih robov. Največji globalni pomik se je pojavil na skrajnih robovih pritrdišč krmilnih magnetov in je bil velikostnega razreda 0,1 mm, kar pomeni, da za celotno konstrukcijo ni predstavljal večjih problemov. Pri merjenju največje globalne napetosti, ki se pojavi v materialu, smo ugotovili, da se inducira na prehodu med tlačnim kanalom ter notranjo komoro, kjer kapljevina oblije bat. Ta napetost je bila izmerjena pri 210 MPa, torej še daleč stran od dopustne meje. Kot najbolj kritična mesta pa so se pričakovano izkazale drsno-tesnilne površine krmilnega bata. Deformacija teh drsni površin se je izkazala celo za ključni kriterij, ali bo določen model ohišja prišel v naslednjo fazo razvoja ali pa bodo potrebne ojačitve ohišja na teh mestih. Ker se bo ventil uporabljal za vodno hidravliko, je bilo predpostavljeno, da največji pomiki drsni površin ne bi presegli 7 μm , s čimer se prepreči prevelika količina notranjega puščanja. Prve analize so pokazale nekoliko večje pomike, kot je bilo želeto, zato smo konstrukcijo ojačali s podporami s spodnje strani ter pri tem poskušali ohraniti maso ohišja. Po dodanih podporah smo ponovno izmerili največje pomike drsni ploskev ter ugotovili, da smo jih znižali na 5,6 μm . Rezultate analize smo



Slika 4 : Rezultati trdnostnih analiz ohišja ventila na drsni površini v lokalnem cilindričnem koordinatnem sistemu (86 mm x 47 mm x 43 mm)

prikazali v cilindričnem lokalnem koordinatnem sistemu, ki ima kot izhodišče izbrano os izvrtin, na katere naseda bat. Vsak pomik, ki je večji od 0, pomeni povečevanje izvrtine, negativni pa, da se cilindri zmanjšuje. Če imamo pozitivne pomike, pomeni, da bo med notranjimi vodi nekoliko večje puščanje zaradi povečane nadmere izvrtine glede na bat, negativni pomiki pa so precej bolj nevarni, saj lahko povzročijo blokado bata v ohišju – tako je ventil neuporaben. Rezultat numeričnega preračuna deformacij ohišja je prikazan na *sliki 4*, pomiki so v mm.

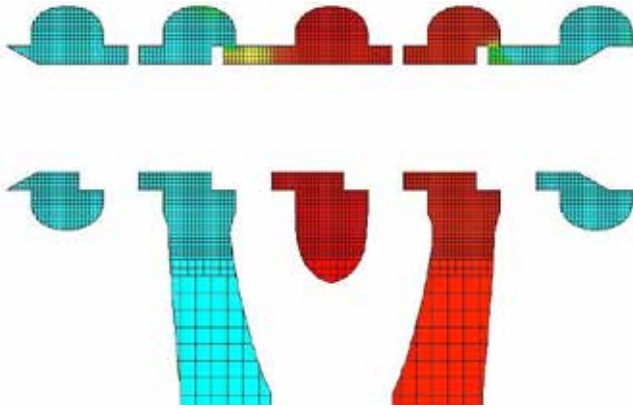
Tokovne analize

Da smo zagotovili sprejemljivo pretočnost skozi ventil, smo izvedli tudi tokovne analize pretočnosti (CFD). Z njimi smo želeli dokazati, da ventil zaradi kompleksne notranje geometrije predstavlja manjši upor in izgubo kot konvencionalno izdelani ventili. Rezultate padca tlaka glede na pretok ($\Delta p-Q$) smo zato primerjali z rezultati serijsko izdelanega konvencionalnega potnega ventila.

Notranji volumen ohišja ventila smo podobno kot pri trdnostnih analizah mrežili z lokalno gostitvijo ter mu določili potrebne parametre. Ti so: pomik krmilnega bata, volumski pretok na vhodu v ventil, atmosferski tlak na razbremenilni strani (povratni – T-priključek) ter temperatura vode. Za volumski pretok skozi ventil smo pri preračunu izbrali vrednosti 10, 30, 50 ter 80 l/min, ventilu pa smo na koncu optimirali notranjost za pretok 50 l/min. Na strani razbremenitve (povratni – T-priključek) smo izbrali tlak okolice 1,013 bar ter temperaturo kapljevine 50 °C.

Pri analizah smo ponovno upoštevali, da večje število izračunov pomeni daljši računski čas, ter analogno temu določali velikost končnih volumnov.

Rezultat izračunanega tlačnega padca pri znanem pretoku in mreža končnih volumnov na vzdolžnem preseku ventila sta prikazana na *sliki 5*.



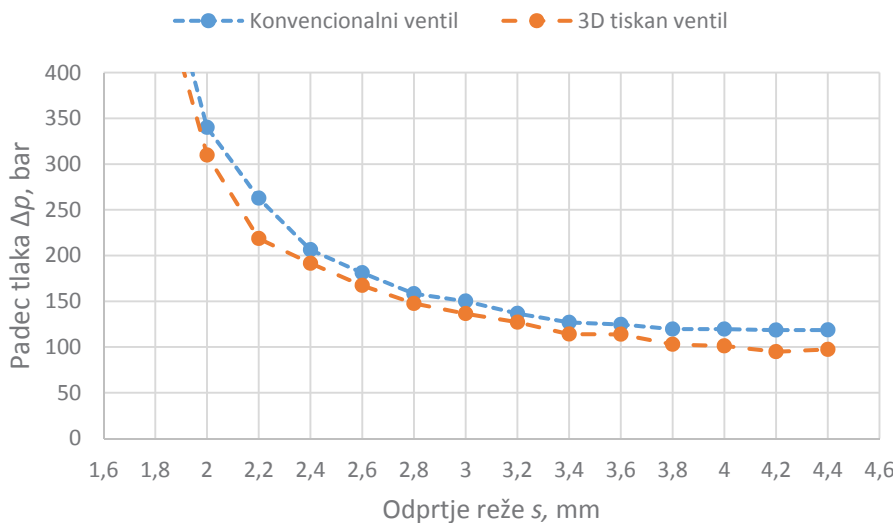
Slika 5 : Mreža končnih volumnov pri tokovni analizi z izračunanimi tlačnimi razmerami pri zahtevanem pretoku 50 l/min (86 mm x 43 mm)

Na *sliki 5* lahko opazimo, da se največje spremembe tlaka in posledično hitrosti kapljevine pričakovano pojavijo v režah krmilnega bata in ohišja [6]. Tam je presek najmanjši, zato je to največji upor na poti kapljevine skozi ventil.

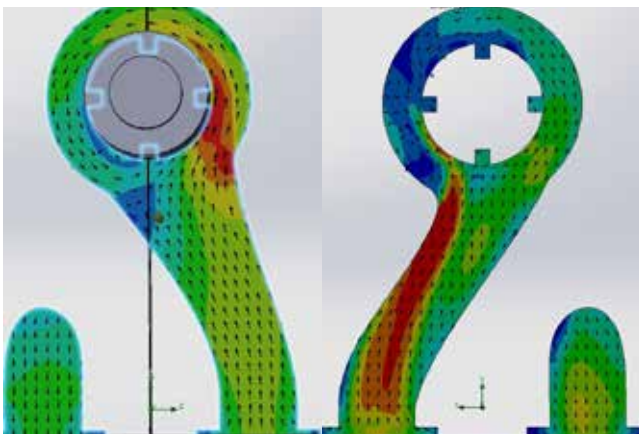
Skozi ventil smo računali tlačni padec med vhomom in izhodom, pri kombinacijah med tlačnim in prvim delovnim vodom (P-A) ter drugim delovnim vodom ter razbremenilnim vodom (B-T), ki je povezan na hidravlični rezervoar. Tako smo simulirali dejanske razmere, ki se pojavljajo med delovanjem ventila.

Pri analizi tlačnega padca glede na pretok skozi ventil ($\Delta p-Q$) smo dobili rezultat, prikazan na *sliki 6*. Prikazana je primerjava med padcem tlaka pri pretakanju skozi novo 3D-tiskano ohišje in skozi ohišje konvencionalnega ventila. Opazimo, da je tlačni padec pri pretoku 50 l/min v vseh preračunanih odmikih krmilnega bata nižji pri 3D-tiskanem ventilu. To je posledica naše izboljšane notranje geometrije.

Z analizami pretoka smo ugotovili tudi reakcijske sile na obtočne elemente, ki se pojavijo kot posledica tokovne sile. Najbolj kritično v tem primeru se je izkazal reakcijski moment, ki se na krmilni bat inducira zaradi kroženja kapljevine okoli njega. Na krmilnem batu smo izmerili moment, ki bi lahko pomenil rotacijo krmilnega bata v ohišju okoli svoje osi in s tem hitrejšo obrabo elementov v kontaktu.



Slika 6 : Primerjava izračunanih rezultatov $\Delta p-Q$ tokovnih analiz 3D-tiskanega ter konvencionalnega potnega ventila



Slika 7 : Izračunane spremembe geometrije kot posledica induciranege navora zaradi tokovne sile na krmilni bat

S poznavanjem reakcijskega momenta na krmilni bat smo lahko spreminjali notranjo geometrijo, dokler nismo izničili efekta tokovne sile. Sprememba geometrije tlačnega voda je prikazana v prečnem prerezu na *sliki 7*.

Hitrostni vektorji na *sliki 7* prikazujejo smer toka kapljevine v tlačnem vodu ventila.

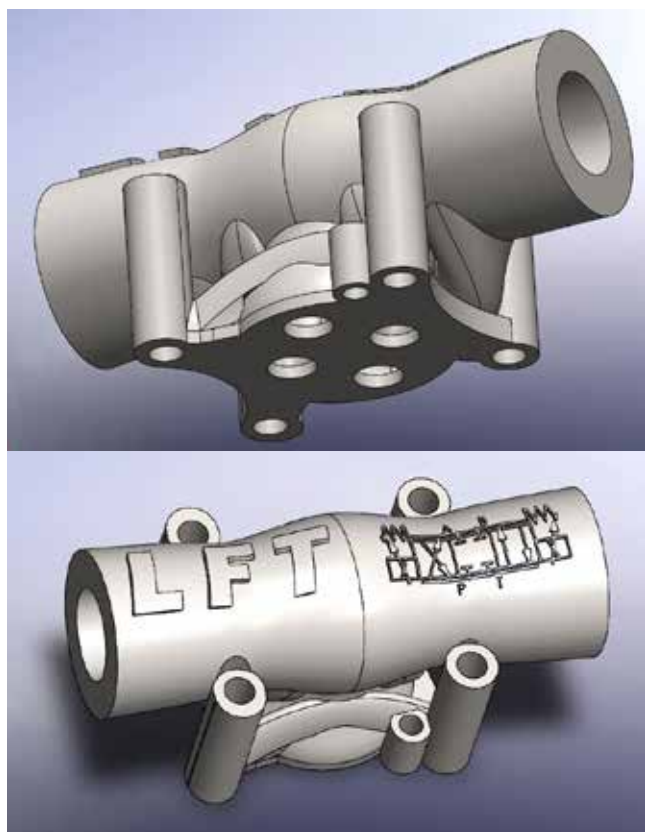
4 Topološka optimizacija

Topološka optimizacija je vrsta numerične optimizacije, ki omogoča izdelavo geometrije glede na robne pogoje, obremenitve in mrežo. Glede na pogoje, ki jih navede uporabnik, program za vsak



Slika 8 : Volumski model kot rezultat topološke optimizacije novega ohišja ventila

končni element glede na materialne parametre preveri, če je volumen tam potreben ali ne. Računalnik torej sam določa potrebnost materiala v posameznem končnem elementu in s tem oblikuje končno geometrijo. V našem primeru smo uporabili notranjo geometrijo ventila, ki smo ga izdelali, jo numerično analizirali in uporabili kot osnovo za topološko optimizacijo. Določena obremenitev na vse notranje vode je bila 350 bar, obremenitev v navojih pa zaradi sile pritvija magneta 11 kN. Poleg tega smo kot parameter omejitve izbrali največji pomik



Slika 9 : Končan model topološko optimiranega ohišja ventila (86 mm x 44 mm x 41,5 mm)

drsnih površin na 5 μm . Podobno kot pri trdnostnih analizah smo tudi tu model mrežili s končnimi elementi ter uporabili lokalne gostitve. Predpisana največja dovoljena geometrija je bila izbrana glede na gabaritne mere konvencionalnega potnega ventila. Volumski model kot rezultat topološke optimizacije je prikazan na *sliki 8*.

Po numerični optimizaciji smo dobili volumski model, ki pa zaradi izredno kompleksne oblike ni bil primeren za nadaljnji razvoj. Modeli, dobljeni po metodi topološke optimizacije, so zgolj osnova za končni model, ki ga izdelava uporabnik, ko parametrizira dobljeni volumski model. Parametrizacija je izdelava modela s telesi, ki bazirajo na osnovnih geometrijskih telesih, kot so kvader, kroglja, valj ... Po parametrizaciji je bil model tak, kot je prikazano v dveh različnih pogledih na *sliki 9*. Kot je razvidno, smo modelu dodali še simbol 4/3 proporcionalnega potnega ventila ter logotip laboratorija.

5 Kovinski tisk ventila

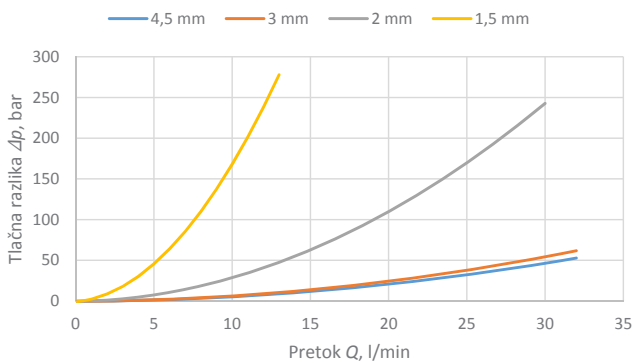
Ventil smo po numeričnih analizah in optimizaciji natisnili na 3D-tiskalniku kovinskih materialov EOS M290. Kot je bilo že omenjeno, je bilo uporabljeno orodno jeklo X3NiCoMoTi, ki ima zaradi visoke vsebnosti niklja lastnosti nerjavnega jekla. Tisk ventila s končnim volumnom 49 cm^3 je trajal 5 ur. Po tisku je potrebno s posebno sesalno napravo odstraniti preostali kovinski prah, ki se ni pretalil. Ta prah je primeren za ponovno uporabo. Končano ohišje smo nato odstranili od spodnje plošče na tiskalniku in ga peskali. S peskanjem smo odstranili ostre robove, ki nastanejo zaradi pretaljevanja prahu, nato smo končno obdelali površino s postopkom mikrokaljenja. Ohišje ventila smo nato obdelali še na CNC-stroju, da smo poravnali površine ter vrezali navoje. Zaradi ozkega tolerančnega polja drsnih površin krmilnega bata (-0; +3 μm) smo ohišje ventila po obdelavi še fino brusili. Kovinsko natisnjen ventil po končni obdelavi je prikazan na *sliki 10*.



Slika 10 : Kovinsko natisnjeno, topološko optimirano ohišje ventila (86 mm x 44 mm x 41,5 mm)

6 Meritve ventila

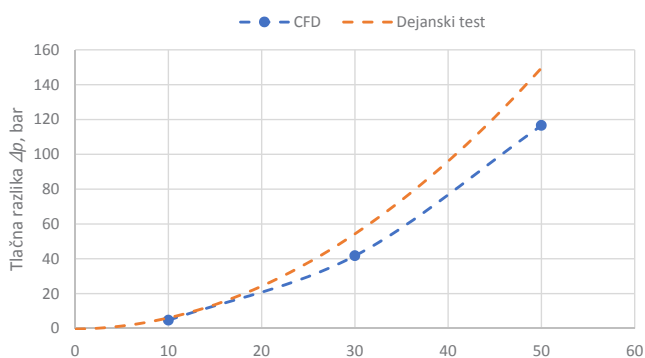
Po tisku in obdelavi smo ventil še testirali. S tem smo dobili dejanske podatke o karakteristiki ventila. Da smo lahko direktno primerjali rezultate tokovne numerične analize in dejanskih meritev, smo izvedli meritve tlačnega padca pri znanem pretoku in pomiku krmilnega bata. Meritev karakteristike $\Delta p-Q$ nam je podala naslednje rezultate, prikazane na *sliki 11*.



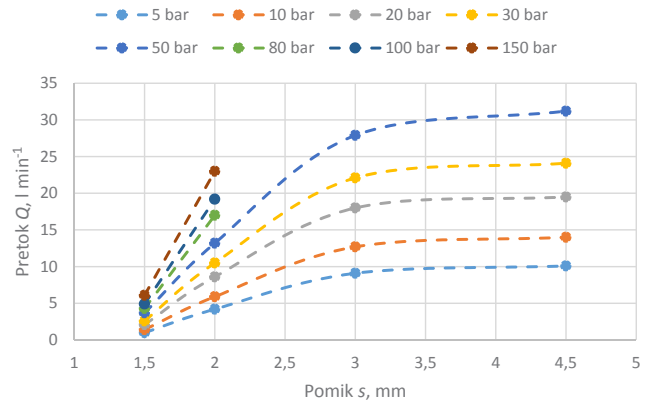
Slika 11 : Izmerjena karakteristika $\Delta p-Q$ kovinsko natisnjenega ohišja ventila v odvisnosti od odmika krmilnega bata

Če primerjamo rezultate tlačnega padca za različne pretoke pri odprtju 3 mm in na istem grafu prikažemo rezultate numerične analize in dejanskih testov, opazimo, da je pri dejanski meritvi tlačni padec skozi ventil do 28 % višji (*slika 12*). Razlog za to je, da pri numeričnih analizah nismo upoštevali, da bomo pri dejanskih testih med merilnikom tlaka in ventilom dobili še vpliv upora hidravličnih komponent, kot so priključna plošča, kolena ter hidravlične gibke cevi. Vse te komponente so prispevale dodatni hidravlični upor in s tem višji tlačni padec. Ker tlačni padec narašča s kvadratom po Bernoullijevi enačbi, se tudi razlika s povečevanjem pretoka povečuje. Primerjava med karakteristikama pri odprtju krmilnega bata 3 mm je prikazana na *sliki 12*.

Izvedli smo tudi merjenje karakteristike $Q-s$ pri



Slika 12 : Primerjava karakteristike $\Delta p-Q$ dejanskih meritev ter CFD-analize



Slika 13 : Izmerjena karakteristika $Q-s$ kovinsko natisnjenega ohišja ventila pri različnih tlačnih razlikah med vstopom in izstopom

konstantnem tlaku. To karakteristiko dobimo tako, da krmilni bat postavimo v določeno pozicijo ter s spreminjanjem pretoka vzdržujemo konstantni tlačni padec. Meritve smo prekinili pri pretoku 30 l/min, saj je bil to najvišji pretok, ki ga je črpalka še lahko dovajala. Izmerjena karakteristika $Q-s$ je prikazana na *sliki 13*.

7 Zaključki

Zasnovali, preračunali in izdelali smo novo ohišje hidravličnega potnega ventila z dvema relativno novima postopkoma: s topološko optimizacijo in s 3D-tiskom kovin. Dokazali smo, da so 3D-tiskani izdelki dovolj kvalitetni, da vzdržijo visoke obremenitve in izboljšajo obstoječe tokovne in masne karakteristike. Konvencionalno izdelani proporcionalni ventili istega velikostnega razreda tehtajo 1,3 kg, 3D-tiskan ventil iz orodnega nerjavnega jekla pa le 0,38 kg. Masa topološko optimiranega ohišja je za 67 % nižja kot masa konvencionalnega ventila. Prišli smo do rešitve, ki ima poleg karakterističnih izboljšav tudi trajnostno naravnano prihodnost, saj pri izdelavi izdelkov s 3D-tiskom porabimo manjše količine energije kot pri klasičnem tlačnem litju ohišja ter nadaljnji obdelavi na CNC-stroju. Prav tako se ves neporabljen material lahko enostavno uporablja pri naslednjih izdelavah, medtem ko je pri odrezovalnih postopkih potrebno odrezke pretaliti pred



Slika 14 : Sestav topološko optimiranega kovinsko natisnjenega ohišja ventila z elektromagnetoma (246 mm x 62 mm x 45 mm)

ponovno uporabo, kar pa je izredno drag postopek.

Literatura

- [1] D. Šenica: Proporcionalni potni ventil za vodno hidravliko: diplomsko delo. Ljubljana, 2015.
- [2] ISO 4401:2005(E). Hydraulic fluid power – Four-port directional control valves – Mounting surfaces.
- [3] B. Vayre, F. Vignat, F. Villeneuve: Metallic additive manufacturing: State-of-the-art review and prospects. *Mech. Ind.* 13 (2012), str. 89–96.
- [4] Aidro Hydraulics: Aidro products catalogue 2018. Aidro Hydraulics, Taino, 2018.
- [5] EOS: Material data sheet EOS MaragingSteel MS1. EOS, München, 2017.
- [6] D. Findeisen: Ölhydraulik: Handbuch für die hydrostatische Leistungsübertragung in der Fluidtechnik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2006.

Designing, manufacturing and testing of proportional 3D-printed hydraulic directional control valve with topology optimization

Abstract:

When designing new products for production using additive manufacturing processes, developers have fewer constraints than when using traditional manufacturing processes such as CNC machining or die casting. SLM, or selective laser melting, is a method of metal 3D printing in which the laser beam is guided by mirrors to melt the metal powder and create a solid body of the final product. By using the laser beam as main energy source for manufacturing, we are talking about significant savings in energy consumption during the manufacturing process. However, one of the reasons why 3D printing has not been serious competitor to traditional manufacturing methods is the time it takes to produce the final products. But if metal 3D printing were to be used for larger batches of 1000 parts or more, the cost would decrease due to the mass savings, and with many positive aspects that this process offers, these parts would be more comparable to other products on the market.

We were faced with the challenge of developing a new 3D-printed hydraulic valve that would have better characteristics than conventionally manufactured valves, yet be cost effective to produce and sell on the market with ever increasing demands. The decision was made to use topology optimization based on a known internal geometry that was numerically tested.

First, we created the inner geometry of new valve as solid body. This geometry was to be inverted to create a hollow structure at the end. Then, we numerically tested the strength of a model using FEA analyses and flow characteristic with CFD analyses. We mainly wanted to test how the structure would handle the pressure and forces applied, since much less material is used compared to conventionally manufactured valves. We focused on the displacement of the leading edge (*fig. 4*) of the valve, which proved to be a critical point of numerical results. These displacements had negative values at some locations which should be avoided at all costs, as this could mean blocking of the spool in the housing, making the valve unusable. We reduced these negative values by increasing the wall thickness.

Numerically testing fluid flow through the housing (*fig. 5*), we simulated different scenarios based on varying inlet flow, spool displacement and temperature characteristics. We also compared numerical results of 3D-printed housing with conventionally manufactured one to ensure that pressure drop and other fluid-based properties were improved (*fig. 6*).

Using internal geometry and numerically applied loads as starting point for topology optimization, we created different types of meshes and decided on the best one based on the results. The optimal result had to give us the best stiffness-to-weight ratio. The result of topology-based optimization is a body consisting of small volumes derived from finite elements (*fig. 8*). Resulting geometry had to be parametrically shaped, giving us a model ready for printing (*fig. 9*). Printing was done on the EOS M290 metal 3D printer and was completed in 5 hours (*fig. 10*). The material chosen was stainless steel, which offers the best corrosion-resistant properties for use in water hydraulics. After printing, the housing was micro-pinned as primary way of surface. It was then CNC machined and fine grinded on leading edges to ensure tight fit between housing and spool.

Finally, we tested the valve using water as hydraulic fluid. We tested pressure drop (*fig. 11*) at different flow rates and spool displacements. We also measured Q-s characteristic (*fig. 13*) at different pressure drops with the load applied to the valve outlet port. When comparing the pressure characteristics of numerical and physical tests, we found a deviating difference (*fig. 12*). This is because in the numerical tests of the housing, we measured the parameters at the inlet and outlet of the valve, while in the real tests, we added the mounting plate, knee, and T-hydraulic connectors between valve and pressure transducers all adding up as resistance components. In future, we will need to either develop a mounting plate that has pressure sensors integrated close to the valve or to create a numerical model of all the interference factors.

All in all, the entire design process of this 3D-printed valve was a success, as we were able to reduce the mass of the final product by 63% compared to conventionally manufactured valves. In addition, all flow-based characteristics were also improved, such as pressure drop, which is 25 bar lower at a flow rate of 50 l/min, a reduction of 20%.

Keywords:

metal 3D printing, hydraulics, additive technologies, optimization, numerical analysis, topology optimization