

Večkriterijski postopek konstruiranja hidravličnega ventila za dodajalno izdelavo

Jan Bartolj, Aljaž Žafran, Nikola Vukašinović, Franc Majdič

Izvleček:

V prispevku je predstavljen postopek konstruiranja hidravličnega ventila za kovinske dodajalne tehnologije, ki povezuje parametrično modeliranje, CFD-analizo, topološko optimizacijo in večkriterijsko vrednotenje. Na primeru ventila NG10 je bilo analiziranih 15 položajev izvrtine krmilnega bata glede na tlačni padec, turbulentno kinetično energijo in maso. Rezultati so pokazali, da vertikalni položaj bolj vpliva na maso, bočni odmik pa na hidravlična kriterija. Ker optimumi niso sovpadali, sta bili uporabljeni Pareto in utežena analiza. Kot najbolj uravnotežena se je izkazala konfiguracija z $Z = 40$ mm in $X = 5$ mm.

Ključne besede:

dodajalne tehnologije, hidravlični ventil, CFD, topološka optimizacija, večkriterijsko vrednotenje

1 Uvod

Ozadje problema

Kovinske dodajalne tehnologije (DT) omogočajo izdelavo hidravličnih komponent z geometrijami, ki jih s konvencionalnimi proizvodnimi postopki ni mogoče izdelati. Pri hidravličnih ventilih to omogoča načrtovanje prostorsko zahtevnih notranjih tokovnih kanalov, zmanjšanje tlačnih izgub ter optimizacijo zunanje geometrije z namenom zmanjšanja mase komponente. Zaradi teh prednosti DT predstavljajo eno ključnih razvojnih smeri sodobne hidravlike.

Kljub večji geometrijski svobodi razvoj hidravličnih komponent za DT postane bistveno zahtevnejši. Poleg hidravličnih lastnosti je treba hkrati upoštevati konstrukcijsko togost, pretočnost skozi komponento ter maso in proizvodne omejitve procesa izdelave. Izboljšanje posameznega kriterija zato pogosto povzroči poslabšanje drugega, zaradi česar optimum posameznega kriterija ni nujno tudi globalno najboljša konstrukcijska rešitev.

V literaturi se računalniška dinamika tekočin (CFD) pogosto uporablja za optimizacijo notranjih kanalov, medtem ko se topološka optimizacija uporablja predvsem za zmanjšanje mase zunanje geometrije. Oba postopka se praviloma izvajata ločeno, funkcionalni elementi, kot je položaj izvrtine krmilnega bata, pa so običajno obravnavani kot nespremenljivi.

vi konstrukcijski parametri. Posledično primanjkuje enoten razvojni postopek, ki bi omogočal sistematično vrednotenje konstrukcijskih izvedb ob hkratnem upoštevanju hidravličnih, konstrukcijskih in proizvodnih kriterijev.

Namen raziskave je bil razviti in predstaviti strukturiran postopek konstruiranja hidravličnih komponent za DT, ki povezuje parametrično modeliranje, CFD-vrednotenje, topološko optimizacijo in večkriterijsko vrednotenje konstrukcijskih variant. Postopek je bil prikazan na primeru hidravličnega ventila velikosti NG10, pri katerem je bil položaj izvrtine krmilnega bata obravnavan kot konstrukcijska spremenljivka. Predlagani pristop omogoča sistematično primerjavo konstrukcijskih variant in izbiro najprimernejše rešitve glede na projektne prioritete.

Predstavljeni postopek temelji na predhodno objavljenem konferenčnem prispevku Bartolj in sod. [1], ki je bil za namen strokovne objave vsebinsko prilagojen in dopolnjen.

2 Pregled literature

Geometrijske možnosti dodajalnih tehnologij je mogoče učinkovito izkoristiti le z namenskim konstruiranjem za dodajalno izdelavo (angl. Design for Additive Manufacturing – DfAM). Pristop DfAM poleg funkcije komponente upošteva značilnosti izbranega proizvodnega procesa, kot so smer gradnje, previsne površine, podporne strukture, anizotropija materiala in potreba po naknadni obdelavi. Diegel in sod. [2], [3] poudarjajo, da neposredna izdelava geometrij, zasnovanih za konvencionalne postopke, praviloma ne izkoristi ključnih prednosti DT. Konstrukcijo je zato treba obravnavati celovito ter že v začetni fazi povezati funkcionalne zahteve in proizvodne omejitve.

Na področju hidravlike so bile možnosti kovinskih DT prikazane predvsem pri razvoju hidravličnih blokov in ventilov z

Jan Bartolj, mag. inž., Aljaž Žafran, mag. inž., izr. prof. dr. Nikola Vukašinović, univ. dipl. inž., izr. prof. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž.; vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



© The Authors 2026. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-32-2026-4.28>

optimiranimi notranjimi kanali ter zmanjšano maso. Biedermann in sod. [4], [5] so razvili avtomatiziran postopek generiranja notranjih tokovnih poti ob upoštevanju omejitev previsnih površin. Arena in sod. [6] so na primeru hidravličnega bloka za podvozje letala povezali preoblikovanje komponente za DT, numerično vrednotenje in konstrukcijsko kvalifikacijo ter dosegli več kot 40-odstotno zmanjšanje mase. Podobne raziskave so pokazale, da je mogoče z namensko zasnovo notranjih kanalov zmanjšati tlačne izgube, z uporabo topološke optimizacije pa odstraniti konstrukcijsko odvečen material.

Obstoječe raziskave praviloma obravnavajo optimizacijo notranjih tokovnih poti in zmanjšanje mase zunanje konstrukcije kot ločena koraka. Funkcionalni elementi hidravličnih komponent so pri tem večinoma določeni vnaprej in med optimizacijo ostanejo nespremenjeni. Manjka pa strukturiran postopek, ki bi spremembo njihovega položaja povezal s hidravličnim in konstrukcijskim vrednotenjem ter omogočil izbiro rešitve na podlagi več nasprotujočih si kriterijev.

3 Metodologija

3.1 Razvojni postopek

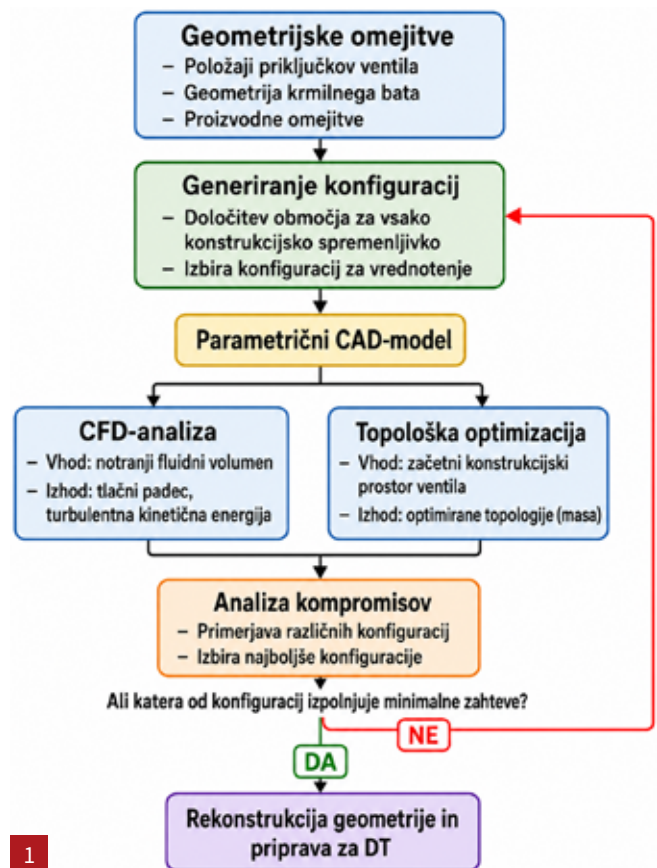
Razvojni postopek je povezoval parametrično konstruiranje, računalniško dinamiko tekočin (CFD), topološko optimizacijo (TO) in večkriterijsko vrednotenje konstrukcijskih variant. Najprej so bile določene funkcionalne in standardizirane omejitve komponente ter izbrane konstrukcijske spremenljivke. Na njihovi podlagi so bile parametrično generirane geometrijske variante, iz katerih sta bila za vsako varianto pripravljena strukturni model in model notranje geometrije.

Iz rezultatov CFD-analize in TO so bili pridobljeni kriteriji za večkriterijsko vrednotenje. Rezultati so bili normalizirani, Pareto analiza pa je bila uporabljena za izločitev dominiranih rešitev. Preostale variante so bile ovrednotene z uteženo analizo in razvrščene glede na izbrane projektne prioritete. Izbrana rešitev je bila nato geometrijsko rekonstruirana in prilagojena za izdelavo z DT. Če nobena varianta ni izpolnila minimalnih funkcionalnih ali proizvodnih zahtev, se je postopek vrnil v fazo parametričnega modeliranja. Celoten potek je prikazan na *sliki 1*.

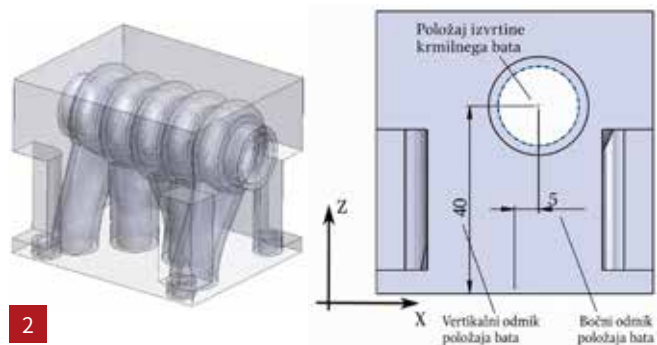
3.2 Obravnavana komponenta in konstrukcijski prostor

Postopek je bil preizkušen na hidravličnem proporcionalnem potnem ventilu velikosti NG10 oziroma CETOP 5. Položaji in geometrije priključkov so bili določeni skladno s standardom ISO 4401 [7], medtem ko so izvrtina krmilnega bata, pritrdilna mesta in prostor za elektromagnetne tuljave predstavljali osnovne funkcionalne omejitve konstrukcije.

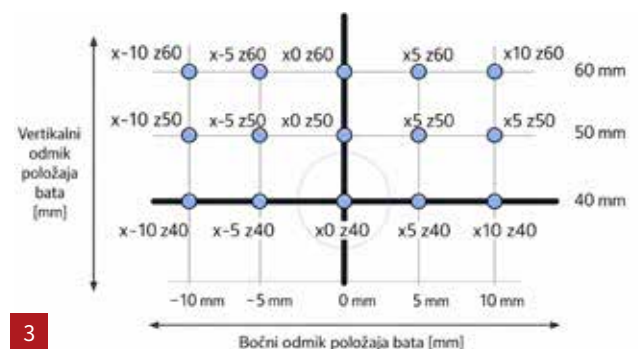
Kot aktivni konstrukcijski spremenljivki sta bila izbrana bočni odmik izvrtine krmilnega bata (X) in njen vertikalni položaj (Z). Obravnavanih je bilo pet bočnih in tri vertikalne lege, kar je tvorilo konstrukcijski prostor s skupno 15 variantami. Razporeditev obravnavanih položajev je prikazana na *sliki 3*.



Predlagani potek razvoja hidravličnih komponent, prilagojenih za izdelavo z DT



Notranjost parametričnega modela ventila na levi in prikaz konstrukcijskih spremenljivk na desni; vse mere so v milimetrih.



Obravnavani konstrukcijski prostor položaja izvrtine krmilnega bata, določen s petimi bočnimi in tremi vertikalnimi odmiki

3.3 Parametrično modeliranje

Geometrija ventila je bila izdelana kot parametrični model, pri katerem je bilo mogoče sistematično spreminjati položaj izvrtine krmilnega bata. Notranja geometrija okoli bata in povezave med standardiziranimi priključki so bile generirane glede na izbrani vrednosti parametrov (X) in (Z). Za vsako varianto sta bila iz iste geometrijske osnove pripravljena fluidni (notranji) volumen za CFD-analizo in konstrukcijski model za TO. Uporaba skupnega parametričnega modela je zagotovila primerljivost variant in zmanjšala odstopanja, ki bi lahko nastala zaradi njihovega ločenega ročnega modeliranja.

3.4 CFD-vrednotenje

CFD-vrednotenje je bilo izvedeno s stacionarnim, nestisljivim in enofaznim modelom toka vode. Za opis turbulence je bil uporabljen model $k-\omega$ SST, ki omogoča zanesljivo napoved tokovnih pojavov v območjih z ločevanjem toka in v bližini sten. Analize so bile izvedene pri štirih pretokih od 60 do 120 l/min in odprtju krmilnega bata 3 mm. Za vse konfiguracije so bili uporabljeni enaki robni pogoji, strategija mreženja in numerične nastavitve. Računska mreža je obsegala približno 4 milijone elementov, konvergenca pa je bila dosežena pri padcu ostankov pod 10^{-5} . Kot kriterija hidravličnega vrednotenja sta bila določena tlačni padec in turbulentna kinetična energija.

3.5 Topološka optimizacija

TO je bila izvedena za vseh 15 variant z enakimi materialnimi, obremenitvenimi in proizvodnimi omejitvami. Uporabljen je bil material MS1 [8], komponenta pa je bila obremenjena z

notranjim tlakom 35 MPa ter pripadajočimi silami na končnih površinah in pritrdilnih mestih. Radialna deformacija vodilne površine krmilnega bata je bila omejena, funkcionalne površine, priključki in pritrdilna območja pa so bili izključeni iz optimizacijskega prostora.

Za upoštevanje izdelave z DT sta bili določeni najmanjša velikost konstrukcijskega člena 2 mm in omejitev previsnih površin 45° . Rezultat TO je bila končna masa posamezne variante, ki je bila skupaj s hidravličnima kriterijema uporabljena v večkriterijskem vrednotenju.

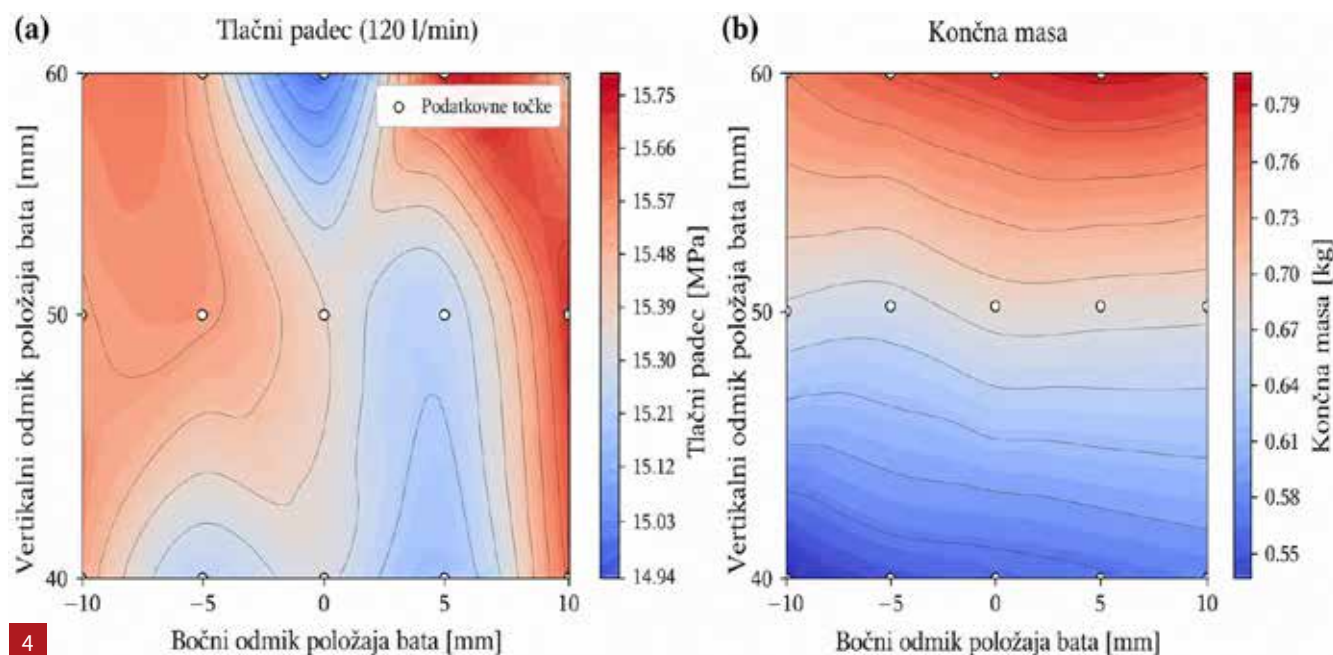
4 Rezultati

4.1 Vpliv konstrukcijskih spremenljivk

Vpliv bočnega in vertikalnega odmika položaja izvrtine krmilnega bata na tlačni padec in končno maso je prikazan na *sliki 4*. Bočni odmik je izraziteje vplival na tlačni padec, medtem ko je vertikalni odmik bistveno močnejše vplival na maso topološko optimirane konstrukcije. Najnižji tlačni padec je bil dosežen pri varianti $X = 0$ mm in $Z = 60$ mm, najmanjša masa pa pri varianti $X = -10$ mm in $Z = 40$ mm. Najnižja turbulentna kinetična energija je bila dosežena pri varianti $X = 5$ mm in $Z = 40$ mm, kar pomeni, da se optimumi posameznih kriterijev niso ujemali. Rezultati potrjujejo, da izbira položaja izvrtine krmilnega bata hkrati vpliva na hidravlične in konstrukcijske lastnosti ventila ter da končne rešitve ni mogoče določiti na podlagi enega samega kriterija.

4.2 Najuspešnejše variante

Med obravnavanimi variantami so se najboljše izkazale variante 1, 2, 3, 4 in 13. Njihove vrednosti so zbrane v *tabeli 1*.



Vpliv bočnega in vertikalnega odmika položaja izvrtine krmilnega bata na (a) tlačni padec pri pretoku 120 l/min in (b) končno maso topološko optimirane konstrukcije

Tabela 1 : Najuspešnejše konstrukcijske variante

Varianta	Višina [mm]	Bočni odklik [mm]	Tlačni padec [MPa]	TKE [m ² /s ²]	Masa [kg]	Glavna prednost
1	40	-10	15,5	120,2	0,552	najmanjša masa
2	40	-5	15,23	137,2	0,576	ugoden kompromis mase in Δp
3	40	0	15,32	115,4	0,58	uravnotežena rešitev
4	40	5	15,15	95,3	0,589	najmanjša disipacija TKE
13	60	0	14,95	180	0,79	najmanjši tlačni padec

5 Razprava

Najboljše vrednosti posameznih kriterijev niso bile dosežene pri isti varianti, saj zmanjšanje tlačnega padca, turbulentne kinetične energije in mase zahteva različne geometrijske rešitve. Večkriterijska primerjava vseh variant je prikazana na *sliki 5*. S Pareto analizo so bile kot optimalne določene variante 1, 2, 3, 4 in 13, pri katerih pa izboljšanje enega kriterija povzroči poslabšanje vsaj enega drugega. Za izbor končne rešitve so bile vrednosti kriterijev najprej normalizirane na interval med 0 in 1:

$$r_{ij} = \frac{(f_{ij} - f_{j,\min})}{(f_{j,\max} - f_{j,\min})}$$

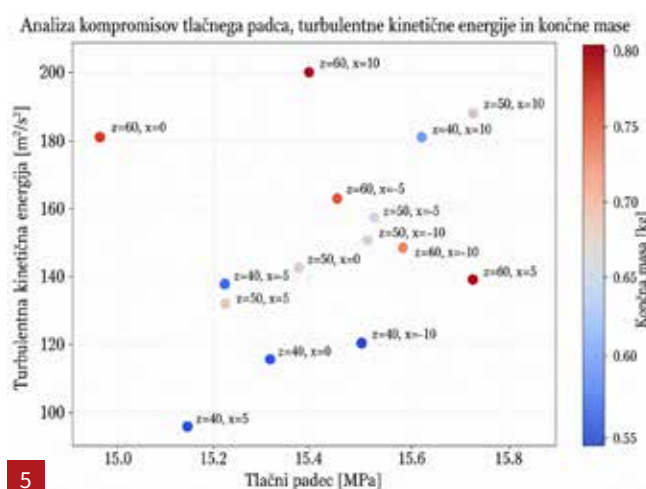
kjer je f_{ij} vrednost kriterija j za varianto i , $f_{j,\min}$ in $f_{j,\max}$ pa najmanjša in največja vrednost posameznega kriterija. Normalizirana vrednost 0 tako predstavlja najboljši, vrednost 1 pa najslabši rezultat znotraj obravnavanega nabora variant.

Skupna ocena posamezne variante je bila določena kot utežna na vsota normaliziranih kriterijev:

$$S_i = w_{\Delta p} \cdot \Delta p_i^* + w_k \cdot k_i^* + w_m \cdot m_i^*$$

pri čemer velja:

$$w_{\Delta p} + w_k + w_m = 1$$



Analiza kompromisov med tlačnim padcem, turbulentno kinetično energijo in končno maso za obravnavane konstrukcijske konfiguracije. Barva točk predstavlja končno maso posamezne konfiguracije.

Pri tem je S_i skupna utežena ocena variante $w_{\Delta p}$, w_k in w_m pa uteži posameznih kriterijev. Te določajo relativno pomembnost tlačnega padca Δp , turbulentne kinetične energije k in mase m . Vrednosti Δp_i^* , k_i^* in m_i^* predstavljajo normalizirane rezultate variante i , pri čemer nižja vrednost pomeni ugodnejši rezultat. Vsota uteži je enaka 1, zato povečanje pomembnosti enega kriterija zmanjša relativni vpliv preostalih. Najnižja vrednost S_i predstavlja najprimernejšo varianto za izbrani sklop projektnih prioritet. Pri enakovrednem upoštevanju vseh treh kriterijev se je kot najbolj uravnotežena izkazala varianta 4. Varianta 1 je primernejša pri prioriteti majhne mase, varianta 13 pa pri prioriteti najmanjšega tlačnega padca. Takšen pristop zato ne določa univerzalno najboljše rešitve, temveč omogoča izbiro konstrukcije glede na zahteve konkretne uporabe.

Za preverjanje vpliva projektnih prioritet na izbor končne rešitve je bila izvedena še analiza scenarijev različnih kombinacij uteži posameznih kriterijev. Obravnavani so bili primeri z enakomerno porazdeljenimi utežmi ter scenariji, pri katerih je bila izraziteje poudarjena pomembnost tlačnega padca, turbulentne kinetične energije oziroma mase. Rezultati so prikazani v *tabeli 2*.

Rezultati kažejo, da se je pri enakomerno porazdeljenih utežeh ter pri zmerni prioriteti hidravličnih ali konstrukcijskih kriterijev kot optimalna izkazala konfiguracija $x = 5$ mm in $z = 40$ mm. Do spremembe izbora je prišlo šele pri izraziti prevladi posameznega kriterija, pri čemer je bila konfiguracija $x = -10$ mm in $z = 40$ mm optimalna ob prioriteti najmanjše mase, konfiguracija $x = 0$ mm in $z = 60$ mm pa ob prioriteti najmanjšega tlačnega padca. To potrjuje, da izbrana konfiguracija predstavlja robusten kompromis med obravnavanimi hidravličnimi in konstrukcijskimi kriteriji.

Tabela 2 : Vpliv različnih uteži kriterijev na izbiro optimalne konstrukcijske konfiguracije

Scenarij uteži	$w_{\Delta p}$	w_k	w_m	Optimalna konfiguracija
Enake uteži	0,33	0,33	0,33	X = 5 mm, Z = 40 mm
Prioriteta tlačnega padca	0,8	0,1	0,1	X = 0 mm, Z = 60 mm
Prioriteta turbulence	0,1	0,8	0,1	X = 5 mm, Z = 40 mm
Prioriteta mase	0,1	0,1	0,8	X = -10 mm, Z = 40 mm
Hidravlična učinkovitost	0,6	0,25	0,15	X = 5 mm, Z = 40 mm



6

Končna rekonstruirana geometrija izbrane variante ($Z = 40 \text{ mm}$, $X = 5 \text{ mm}$) po topološki optimizaciji

6 Zaključek

Predstavljen je bil strukturiran postopek konstruiranja hidravličnega ventila za kovinske DT, ki povezuje parametrično modeliranje, CFD-analizo, TO in večkriterijsko vrednotenje. Analiza 15 variant je pokazala, da vertikalni položaj izvrtine krmilnega bata izraziteje vpliva na maso, bočni odmik pa na tlačni padec in turbulentno kinetično energijo.

Ker optimumi posameznih kriterijev niso sovpadali, je bila končna izbira izvedena s Pareto in uteženo analizo. Kot najbolj uravnotežena rešitev se je izkazala varianta $Z = 40 \text{ mm}$ in $X = 5 \text{ mm}$, medtem ko sta bili drugi varianti primernejši pri izraziti prioriteti najmanjše mase oziroma najmanjšega tlačnega padca. Rezultati potrjujejo, da je položaj funkcionalnih elementov smiselno obravnavati kot aktivno konstrukcijsko spremenljivko ter da je pri razvoju hidravličnih komponent za DT potreben sočasen pregled hidravličnih, konstrukcijskih in proizvodnih kriterijev.

Viri

- [1] J. Bartolj, A. Zafran, N. Vukasinovic, and F. Majdic, "Influence of Spool Bore Position on the Structural and Hydraulic Performance of an Additively Manufactured NG10 Valve," in CAD'26 Proceedings, El Paso: U-turn Press LLC, May 2026, pp. 65–70. doi: 10.14733/cadconfP.2026.65-70.
- [2] O. Diegel, A. Nordin, and D. Motte, A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. Singapore: Springer Singapore, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-8281-9.
- [3] O. Diegel, J. Schutte, A. Ferreira, and Y. L. Chan, "Design for additive manufacturing process for a lightweight hydraulic manifold," Addit. Manuf., vol. 36, p. 101446, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101446.
- [4] M. Biedermann, P. Beutler, and M. Meboldt, "Automated Knowledge-Based Design for Additive Manufacturing: A Case Study with Flow Manifolds," Chem. Ing. Tech., vol. 94, no. 7, pp. 939–947, Jul. 2022, doi: 10.1002/cite.202100209.
- [5] M. Biedermann, P. Beutler, and M. Meboldt, "Routing multiple flow channels for additive manufactured parts using iterative cable simulation," Addit. Manuf., vol. 56, p. 102891, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102891.
- [6] M. Arena, P. Ambrogiani, V. Raiola, F. Bocchetto, T. Tirelli, and M. Castaldo, "Design and Qualification of an Additively Manufactured Manifold for Aircraft Landing Gears Applications," Aerospace, vol. 10, no. 1, Jan. 2023, doi: 10.3390/aerospace10010069.
- [7] International Organization for Standardization, "ISO 4401:2005 Hydraulic fluid power — Four-port directional control valves — Mounting surfaces," Geneva, Switzerland, 2005.
- [8] EOS GmbH, "EOS Maraging-Steel MS1," Krailling/Munich, Mar. 2025.

A Multi-Criteria Design Methodology for Hydraulic Valves Manufactured by Additive Manufacturing

Abstract:

A design workflow for a hydraulic valve manufactured using metal additive technologies is presented. The method combines parametric modelling, CFD analysis, topology optimisation and multi-criteria evaluation. Fifteen control spool bore positions of an NG10 valve were assessed according to pressure drop, turbulent kinetic energy and mass. The vertical position primarily influenced mass, whereas the lateral offset had a stronger effect on the hydraulic criteria. Since the individual optima did not coincide, Pareto and weighted analyses were applied. The configuration with $Z = 40 \text{ mm}$ and $X = 5 \text{ mm}$ provided the most balanced solution.

Keywords:

additive manufacturing, hydraulic valve, CFD, topology optimisation, multi-criteria evaluation