

NUMERIČNA OPTIMIZACIJA NOTRANJE GEOMETRIJE KANALA HIDRAVLICNEGA BLOKA ZA IZDELAVO S 3D-TISKOM

Jan Bartolj, Rok Jelovčan, Franc Majdič

Izvleček:

V članku je predstavljena uporaba gradientno adjungirane metode¹ (angl. *Gradient Adjoint Method*) za numerično optimizacijo notranjih kanalov v hidravličnih blokih, izdelanih z aditivnimi postopki. Tradicionalne metode oblikovanja pogosto omejujejo zasnovo zaradi zahtev po strojni obdelavi in podpornih strukturah. Aditivna proizvodnja omogoča kompleksne geometrije, vendar je pri komponentah, skozi katere tečejo tekočine, še vedno potrebno upoštevati pogoje postopkov aditivnih tehnologij in samopodpornosti. Uporabljen metoda omogoča učinkovito izračunavanje vpliva sprememb oblike na tlačne izgube brez potrebe po ponavljanju simulacij za vsako geometrijsko spremembo. Rezultati kažejo, da lahko s to metodo zmanjšamo tlačne izgube v kanalu za približno 25 % v primerjavi z osnovno geometrijo. Za primerjavo: parametrična optimizacija je zmanjšala tlak za 15 %. Rezultati potrjujejo učinkovitost numerične optimizacije pri razvoju energetsko učinkovitih hidravličnih komponent.

Ključne besede:

aditivna tehnologija, hidravlika, numerična optimizacija, samonosne strukture

1 Uvod

Zaradi zakonodajnih zahtev po zmanjšanju porabe energije v industriji, kot jih določa Direktiva EU o energetski učinkovitosti (EU 2023/1791), se povečuje potreba po optimiziranih hidravličnih komponentah [1]. Hidravlični bloki predstavljajo ključen element hidravličnih sistemov, kjer nepravilno oblikovani notranji kanali povzročajo visoke tlačne izgube in s tem nižjo njihovo učinkovitost. Z razvojem aditivne proizvodnje (angl. *Additive Manufacturing, AM*), zlasti postopkov selektivnega laserskega taljenja (angl. *Selective laser melting, SLM*), je mogoče oblikovati notranje kanale kompleksnih oblik, ki jih konvencionalne metode ne omogočajo [2, 3, 4]. Vendar pa so pri tem potrebni novi pristopi za optimizacijo pretoka in hkrati zagotavljanje, da je geometrijo mogoče izdelati. Eden takšnih pristopov je gradientno adjungirana metoda. Ta omogoča optimizacijo prostora, ki ga zavzema kapljevina, glede na določeno ciljno funkcijo, kot je zmanjšanje tlačnih izgub.

V zadnjih letih se kombinacija AM in hidravličnih komponent kaže kot zelo perspektivna, zlasti pri zahtevnih sistemih z omejitvami mase, prostorske zasnove in integracije funkcij. V času, ko so tradicionalni hidravlični bloki pogosto omejeni s stroški obdelave in zapleteno podporno strukturo, aditivna proizvodnja omogoča notranje kanale z zelo kompleksno geometrijo. Na primer: v raziskavi, v kateri je bil aditivno izdelan hidravlični blok za krmiljenje pristajalnega mehanizma letalskih koles, so dosegli zmanjšanje mase za več kot 40 % v primerjavi s konvencionalnim modelom [5]. Podobno projekt »HyRes – Resource-saving Process Route for Integrated Hydraulic Components« izpostavlja sinergijo med tehnologijo AM in izostatičnim stiskanjem (angl. *hot isostatic pressing*) pri razvoju funkcionalno integriranih hidravličnih blokov [6]. Razvoj pa ne zajema zgolj mehanske optimizacije – poudarek je tudi na energetski učinkovitosti in zmanjševanju izgub v hidravličnih sistemih, kar je dokazano v raziskavah hidravličnih energetskih rešitev za proizvodnje in sisteme visoke zmogljivosti [7, 8]. Takšna kombinacija omogoča ne le geometrijsko optimizacijo, temveč tudi večjo prilagodljivost pri oblikovanju pretočnih kanalov, zmanjšanje teže, integracijo funkcij in izboljšano hidravlično učinkovitost – kar vse vodi k sistemom z višjo zmogljivostjo in manjšim okoljskim odtisom.

Jan Bartolj, Rok Jelovčan, izr. prof. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., vsi Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



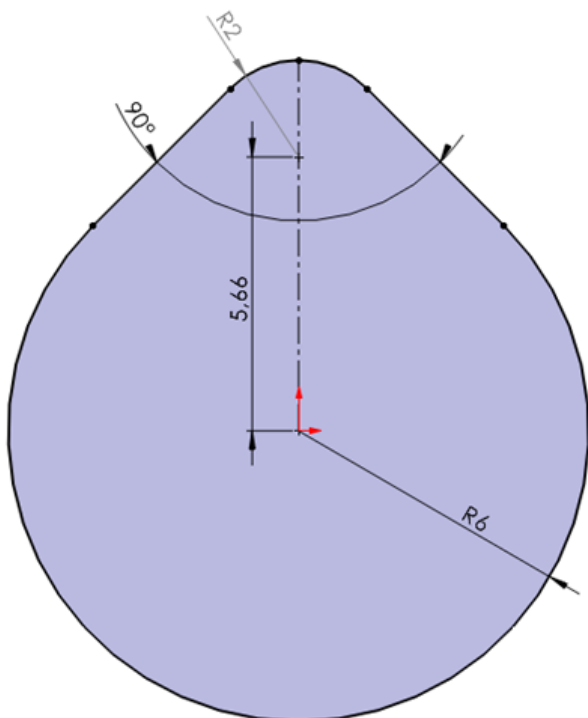
© The Authors 2025. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-31-2025-6.12>

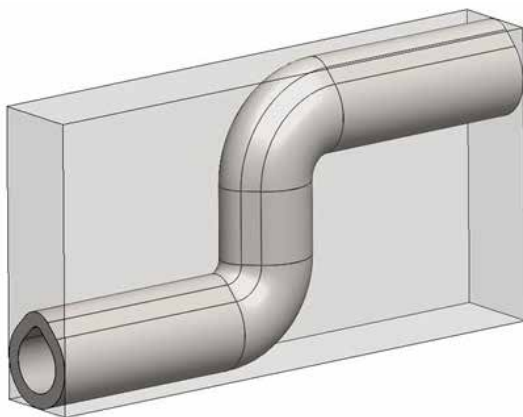
2 Metodologija

Optimizacija je bila izvedena na osnovi preprostega S-ukrivljenega kanala [8], običajnega za hidravlične bloke. Geometrija kanala je bila definirana z dolžino 115 mm, višino 70 mm in širino 20 mm (slika 1 in slika 2).

Računska mreža je bila sestavljena iz približno 550.000 poliedričnih elementov z dodatnimi plastmi ob stenah za natančnejše opisovanje obrobni pogojev. Simulacije so bile izvedene v programu ANSYS Fluent z uporabo modela turbulence k- ω SST. Gradientno adjungirana metoda izračuna, kako se ciljna funkcija spreminja glede na spremembe oblike. Za razliko od metode končnih razlik, ki zahteva večje število ponovljenih simulacij toka, gra-



Slika 1 : Osnovna samonosna presečna struktura kanala



Slika 2 : Računska domena za izdelavo CFD-analiz in gradientno adjungirane optimizacijske metode



Slika 3 : Grafični prikaz računskega procesa gradientno adjungirane metode

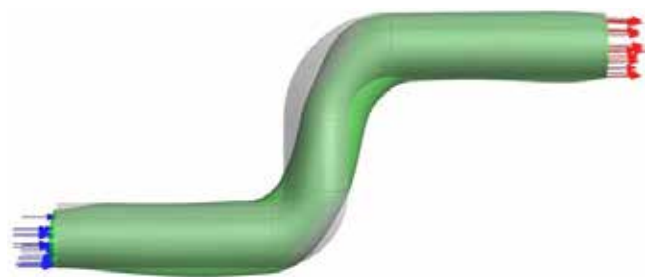
dientno adjungirana metoda (slika 3) rešuje le en dodatni sistem enačb – ne glede na število oblikovnih parametrov, zaradi tega je posebej primerna za optimizacijo kompleksnih geometrij z velikim številom spremenljivk. Metoda omogoča natančen izračun gradientov, kar omogoča učinkovit in stabilen postopek optimizacije oblike. V programu ANSYS Fluent metoda izračuna občutljivosti ciljne funkcije glede na spremembe oblike z reševanjem adjungirane oblike tokovnih enačb.

Uporabljena kapljevina je bila voda z gostoto 998 kg/m^3 pri sobni temperaturi in kinematično viskoznostjo $0,993 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Vhodni pretok je bil 70 l/min , izhodni tlak pa atmosferski ($101,3 \text{ kPa}$).

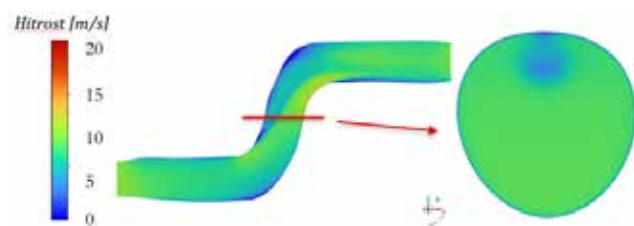
3 Rezultati in razprava

Rezultati optimizacije so pokazali izrazito izboljšanje pretokovnih lastnosti kanala. Optimizirana geometrija je dobila bolj »organsko« obliko z lokalnim razširjanjem prereza in prilagojenim radijem ukrivljenosti, kar je omogočilo zmanjšanje recirkulacijskih območij za prvim in drugim kolenom kanala. Na sliki 4 je prikazana sprememba geometrije, ki je posledica optimizacije. V sivi barvi je prikazana geometrija pred optimizacijo, v zeleni pa geometrija po njej.

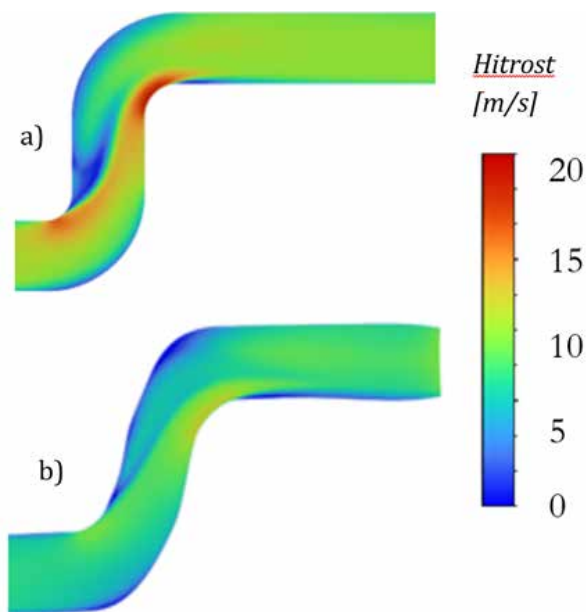
Največja vrednost turbulentne kinetične energije se je po optimizaciji zmanjšala za več kot polovico, kar potrjuje zmanjšanje lokalnih izgub. Izračunani padec tlaka se je zmanjšal z $39,41 \text{ kPa}$ na $30,32 \text{ kPa}$, kar predstavlja 25% izboljšanje. Za primerjavo: parametrična optimizacija istega primera je dosegla



Slika 4 : Sprememba geometrije, določena z računskim procesom gradientno adjungirane optimizacijske metode



Slika 5 : Numerično izračunano hitrostno polje znotraj optimizirane geometrije



Slika 6 : Primerjava numerično izračunanih hitrostnih polj med a) neoptimizirano in b) optimizirano geometrijo

zmanjšanje padca tlaka z 39,41 kPa na 33,83 kPa, kar pomeni 15 % izboljšanje. Razlika kaže, da gradientno adjungirana metoda omogoča učinkovitejše iskanje globalno optimalnih rešitev, saj upošteva celoten, s kapljevino omočen prostor, ne le lokalnih geometrijskih parametrov (slika 5).

Na sliki 6 je prikazana primerjava med a) osnovno (neoptimizirano) in b) optimizirano geometrijo ka-

nala, dobljeno z uporabo gradientno adjungirane metode. Pri optimiziranem modelu so vidni mehkejši prehodi med ukrivljenimi deli in lokalno povečane presečne površine, kar omogoča bolj enakomeren potek toka. Posledično se zmanjšata območje recirkulacije za prvim kolenom ter maksimalna vrednost turbulentne kinetične energije. Ti spremembi vodita v nižji tlačni padec in večjo hidravlično učinkovitost sistema, kar potrjuje uspešnost izvedene optimizacije.

4 Zaključek

Raziskava dokazuje, da predstavlja uporaba gradientno adjungirane metode učinkovit pristop za optimizacijo notranjih kanalov v hidravličnih blokih, zasnovanih za aditivno proizvodnjo. S pomočjo numeričnih simulacij je bilo mogoče oblikovati samopodporne geometrije z bistveno manjšimi tlačnimi izgubami in izboljšanim potekom pretoka. V primerjavi s parametrično optimizacijo metoda omogoča boljše rezultate pri manjši računski obremenitvi. Takšni pristopi predstavljajo pomemben korak k razvoju energetsko učinkovitih in proizvodno prilagodljivih hidravličnih komponent prihodnosti.

Viri in literatura

- [1] European Parliament and Council. (2023). Directive (EU) 2023/1791 of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955. Official Journal of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/1791/oj>.
- [2] Diegel, O., Nordin, A. & Motte, D. (2019). A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8281-9>.
- [3] Wohlers, T., et al. (2024). Wohlers Report 2024: 3D Printing and Additive Manufacturing Industry State of the Industry. Wohlers Associates. <https://wohlersassociates.com/product/wr2024/>.
- [4] Diegel, O., Nordin, A. & Motte, D. (2019). A practical guide to design for additive manufacturing. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8282-6>.
- [5] Arena, M., Ambrogiani, P., Raiola, V., Bocchetto, F., Tirelli, T. & Castaldo, M. (2023). Design and qualification of an additively manufactured manifold for aircraft landing gears applications. Aerospace, 10(69), 1-18. <https://doi.org/10.3390/aerospace10010069>.
- [6] Tappeiner, Z., Donners, M., Schmid, M. & Schmitz, K. (2014, October). Resource saving process route for integrated hydraulic components. HyRes Project poster, RWTH Aachen University. Retrieved July 30, 2025, from <https://acam.rwth-campus.com/wp-content/>

uploads/sites/11/2014/10/HyRes-Resource-saving-Process-Route-for-Integrated-Hydraulic-Components.pdf.

- [7] Hofmann, U., Fankhauser, M., Willen, S., Inniger, D., Klahn, C., Löffel, K. & Meboldt, M. (2023). Design of an additively manufactured hydraulic directional spool valve: An industrial case study. *Virtual and Physical Prototyping*, 18(1),

1-18. <https://doi.org/10.1080/17452759.2023.2166634>.

- [8] Bartolj, J., Schmitz, K., Vukašinović, N., Majdič, F. (2025). Numerical Optimization of Internal Geometry for Additively Manufactured Hydraulic Manifolds. *International Conference Fluid Power 2025: Conference Proceedings*. 1(1), 31-44. 10.18690/um.fs.7.2025.4.

Numerical optimisation of internal geometry structures of AM made hydraulic manifolds

Abstract:

The article presents the use of the Gradient Adjoint Method for numerical optimization of internal channels in hydraulic manifolds manufactured using additive manufacturing. Traditional design methods are often limiting the geometry due to machining and support structure requirements. Additive manufacturing enables complex geometries; however, for components with internal fluid flow, it is still necessary to consider the constraints of additive manufacturing processes and self-supporting conditions. The applied method allows efficient computation of the influence of shape changes on pressure losses without the need to repeat simulations for every geometric modification. The results show that this method can reduce pressure losses in the channel by approximately 25% compared to the baseline geometry. For comparison, parametric optimization reduced the pressure drop by 15%. These results confirm the effectiveness of numerical optimization in developing energy-efficient hydraulic components.

Keywords:

Additive manufacturing, Hydraulics, Numerical optimisation, Self-supporting structures