

DODAJALNA TEHNOLOGIJA V PRAKSI: TESTNA ANALIZA HIDRAVLICNEGA VENTILA Z INOVATIVNO VENTILSKO PLOŠČO

Jan Bartolj, Domen Strenčan, David Homar, Franc Majdič

Izvleček:

Študija proučuje uporabo dodajalnih (oz. aditivnih) tehnologij pri izdelavi hidravličnih komponent, z osredotočenostjo na 3D-tiskane ventile in priključne plošče z integriranimi tlačnimi senzorji. Aditivne tehnologije, kot sta Metal Binder Jetting (MBJ) in Selective Laser Melting (SLM), omogočajo oblikovno svobodo, konsolidacijo delov in optimizacijo notranje geometrije za zmanjšanje tlačnih izgub ter mase. V raziskavi so izdelani in testirani kovinski ventili, izdelani s postopkom MBJ, ki omogoča visoko produktivnost in izdelavo kompleksnih struktur brez podpor. Primerjava s SLM razkriva prednosti MBJ zaradi večjih izdelovalnih hitrosti, nižjih stroškov in manjši potrebi po podpornih strukturah. Meritve pretoka in tlaka so pokazale, da ima aditivno izdelana ventilska plošča za približno 4 MPa nižji padec tlaka pri enakem pretoku, kar pomeni večjo učinkovitost. Poleg tega je 3D-tiskano ohišje ventila za 67 % lažje od konvencionalno izdelanega. Rezultati potrjujejo, da so aditivno izdelane komponente primerne za serijsko uporabo v hidravlični industriji, saj ponujajo boljše izkoristke, krajše čase montaže in možnost oblikovne optimizacije, kljub višjim stroškom v primerjavi s konvencionalnimi deli.

Ključne besede:

Aditivne tehnologije, optimizacija geometrije, hidravlični ventili, priključne plošče, meritve

1 Uvod

Aditivna proizvodnja na podlagi uporabe aditivnih tehnologij se hitro širi na nova področja. Več 3D-tiskalnikov na isti lokaciji lahko omogoča serijsko proizvodnjo. Svoboda, ki jo aditivne tehnologije omogočajo konstrukterjem za optimizacijo, je izjemno privlačna za različne inženirske discipline. Za področje hidravlike je še posebej zanimiva možnost optimizacije notranje geometrije in konsolidacije več delov v eno samo enoto.

Optimizacija notranje oblike omogoča učinkovito usmerjanje pretoka tekočine skozi komponente in zmanjšanje tlačnih izgub, kar povečuje učinkovitost sistema. Povezanost delov in optimizacija zunanje

geometrije pa pripomoreta k zmanjšanju mase tako hidravlične sestavine kot celotnega hidravličnega sistema in skrajšanju časa sestavljanja.

V študiji primerjamo meritve konvencionalno izdelane priključne plošče ventila in priključne plošče, izdelane z aditivno tehnologijo, pri čemer imajo plošče integrirana tlačna zaznavala. Glavni razlog za integracijo senzorjev je dejstvo, da je v prejšnjih raziskavah prišlo do pomembnih odstopanj med rezultati CFD-simulacij in dejanskimi meritvami 3D tiskanih ventilov. Ugotovili smo dva možna vzroka za odstopanja: prvi je hrapavost notranjih površin kovinskih 3D natisnjenih kanalov, drugi pa netočnost meritev zaradi neustrezne postavitve tlačnih merilnih zaznaval. Ta raziskava se osredotoča na razvoj in testiranje 3D tiskanega ventila (*Slika 1*), izdelanega s postopkom vezave kovinskega prahu (Metal Binder Jetting – MBJ).

Za potrebe testiranja je bila s tehnologijo selektivnega laserskega taljenja (Selective Laser Melting – SLM) natisnjena tudi priključna ventilska plošča, ki je prikazana na *sliki 2*. Posebnost te plošče je v tem, da so priključki za tlačne senzorje integrirani neposredno vanjo, kar omogoča sprotno spremljanje tlaka na vstopu in izstopu brez potrebe po dodatnih priključkih ali naknadnih predelavah. Takšna

Jan Bartolj, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo; Domen Strenčan, dr. David Homar, univ. dipl. inž., oba Solid World d. o. o., Radomlje; Izr. prof. dr. Franc Majdič, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



© The Authors 2025. CC-BY 4.0

<https://doi.org/10.5545/Ventil-31-2025-4.04>



Slika 1 : 3D tiskan topološko optimiran hidravlični ventil, narejen s postopkom brizganja veziva

integracija izpostavlja oblikovno prilagodljivost, ki jo omogočajo tehnologije aditivne proizvodnje.

Eksperimentalno delo je vključevalo meritve pretoka in tlačnih padcev skozi ventil z uporabo hidravličnega olja ISO VG 46. Podatki o tlaku so bili zbrani preko integriranih senzorjev in uporabljeni za oceno tokovnih karakteristik ter za prepoznavanje morebitnih izgub ali nepravilnosti v delovanju ventila.

2 Tehnologija MBJ

Metal Binder Jetting (MBJ) je tehnologija aditivne proizvodnje izdelkov, ki združuje visoko produktivnost z izjemno oblikovno svobodo in primernostjo za serijsko proizvodnjo. Postopek temelji na nanašanju kovinskega prahu v tankih slojih, vezavi določenih delov s tekočim vezivom ter naknadnem sintranju za utrjevanje materiala. Tehnologija je nastala na osnovi znanj iz tehnologije brizganja kovin (Metal Injection Molding – MIM), saj uporablja podobne praške in metode sintranja, pri čemer ni potrebe po brizganju v kalupe.

2.1 Proces MBJ

- ▶ **Priprava materiala:** Uporablja se kovinski prah z velikostjo delcev med 15 µm in 45 µm. Za tisk ventila je bil uporabljen material 17-4 PH (EN 1.4542 / X5CrNiCuNb16-4) – prah nerjavnega jekla z dobro mehansko trdnostjo in odpornostjo proti koroziji, primerno za sintranje.
- ▶ **Tiskanje:** Prah se nanaša v slojih debeline od 50 µm do 100 µm. Inkjet tiskalna glava selektivno nanaša tekoče vezivo na območja, kjer nastaja končni kos.
- ▶ **Utrjevanje »zelenih« kosov:** Po tisku kosi prestopajo toplotno utrjevanje, pri katerem se vezivo mehansko in kemijsko stabilizira pri temperaturi 170 °C. Ta korak omogoča varno ravnanje z zelenimi kosi.
- ▶ **Odstranjevanje odvečnega prahu (ang. de-powdering):** Odvečni nevezan prah se ročno odstrani s stisnjenim zrakom, čopiči in mehkim orodjem. Ta metoda omogoča nežno čiščenje



Slika 2 : Priključna ventilska plošča, izdelana iz nerjavnega jekla, 3D natisnjena s postopkom selektivnega laserskega taljenja

kompleksnih geometrij brez poškodb. V postopku MBJ se več kot 98 % nevezanega prahu preseje in ponovno uporabi v nadaljnjih tiskalnih ciklih. Ta visoka stopnja ponovne uporabe pomembno prispeva k učinkovitosti rabe materiala in znižanju stroškov.

- ▶ **Toplotno odstranjevanje veziva in sintranje:** Odstranjevanje veziva (debinding) in sintranje potekata zaporedno v isti peči. Najprej se vezivo termično razgradi, nato pa se kovinski delci sintrajo pri temperaturah do 1350 °C. Končna gostota materiala presega 99 % teoretične maksimalne vrednosti.

2.2 Primerjava s tehnologijo SLM

Tehnologija MBJ se pogosto primerja z drugimi metodami aditivne proizvodnje izdelkov, zlasti s selektivnim laserskim taljenjem (SLM). SLM omogoča višjo natančnost in trdnost, zato je primerna za dele, ki so izpostavljeni velikim mehanskim obremenitvam. Vendar pa je postopek počasnejši, dražji in zahteva odstranjevanje podpornih struktur. Po drugi strani je MBJ primernejši za serijsko proizvodnjo, saj omogoča večjo pretočnost, manj geometrijskih omejitev in hitrejši potek izdelave. Razlike med tehnologijama MBJ in SLM so povzete v preglednici 1.

2.3 Materiali v procesu MBJ

V tehnologiji MBJ so najpogostejše uporabljeni prahovi teh materialov:

- ▶ **17-4 PH (nerjavno jeklo):** kombinacija mehanske trdnosti in odpornosti proti koroziji,
- ▶ **316L (avstenitno nerjavno jeklo):** primerno za biomedicinske in prehranske aplikacije,
- ▶ **H13 (orodno jeklo):** za orodja za tlačno litje,
- ▶ **Inconel 625/718:** za uporabo pri visokih temperaturah.

Preglednica 1 : Primerjava tehnologij MBJ in SLM

Lastnost	MBJ	SLM
Vir energije	brez (vezivo + sintranje)	laser
Hitrost	zelo visoka	nižja (točkovno taljenje)
Podporne strukture	niso potrebne	obvezne
Zaostale napetosti	zelo nizke	visoke (zaradi toplotnih gradientov)
Hrapavost površine	mat videz, fina površina	bolj groba površina
Mehanske lastnosti	primerljive s kovinskim brizganjem (MIM)	zelo dobre, odvisne od parametrov
Priporočena uporaba	serijska proizvodnja, orodja, funkcionalni prototipi	visoko natančni deli, kompleksna notranja geometrija

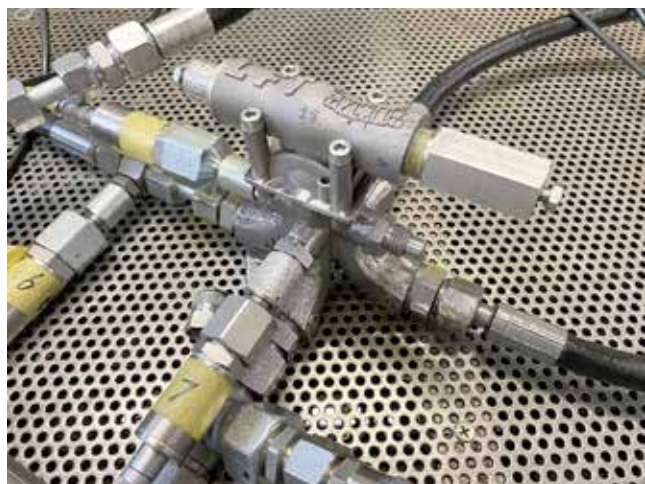
Tehnologija MBJ je zaradi svoje sposobnosti sočasnega tiskanja več kosov, odprave potrebe po podpornih strukturah ter velikega nabora materialov primerna za različne panoge, kot so avtomobilska industrija, orodjarstvo in hidravlika.

3 Testiranje

Preizkušanje je bilo opravljeno na preizkuševališču ob uporabi mineralnega olja, ki ima 30 kW instalirane moči in je omejeno na tlak 35 MPa. Pri najvišjem doseženem tlaku lahko zagotovimo približno 50 l/

min pretoka. *Slika 3* prikazuje sestav ventila in ventilske plošče z integriranimi senzorji, ki je bil uporabljen med preizkušanjem.

Ventila z ventilsko ploščo in integriranimi senzorji med testiranjem prikazuje *slika 4*. Sklop je zgrajen iz naslednjih elementov: 1. ohišje ventila, 2. jedro vijaka za pozicioniranje krmilnega bata ventila, 3. pozicijski vijak, 4. krmilni bat, 5. podložka, ki potiska drsnik v sredinski položaj, 6. vzmet iz nerjavečega jekla, 7. dve 1-milimetrski podložki za zagotavljanje prednapetosti vzmeti, 8. tesnilna podložka, 9. jedro vijaka za pozicioniranje krmilnega bata, 10. protipozicijski vijak, 11. pritrdilni vijaki, 12. statična O-tesnila.



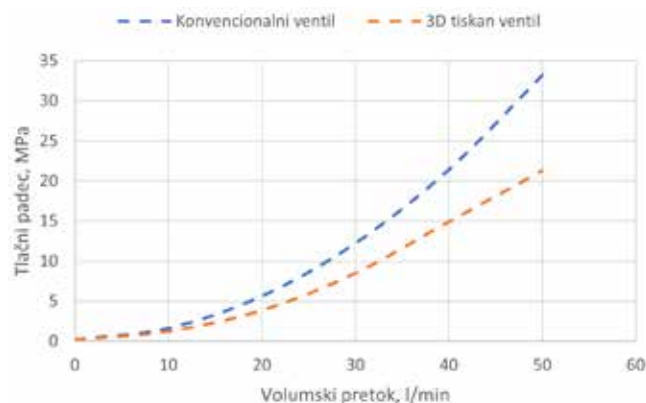
Slika 3 : 3D natisnjen 4/3-potni ventil, spodaj ventilska plošča in integrirana tlačna zaznavala v sestavu na preizkuševališču med testiranjem



Slika 4 : Prikaz sestavnih delov ventila, uporabljenega pri testiranju

4 Rezultati

Rezultat eksperimentalne meritve padca tlaka skozi konvencionalni in 3D natisnjen ventil je prikazan na *sliki 5*. Jasno je vidna razlika v zmogljivosti med konvencionalno izdelanim ventilom in ventilom, proizvedenim z uporabo Metal Binder Jetting (MBJ). Meritve so bile izvedene pri 90-odstotnem odprtju krmilnega bata. Ena najpomembnejših ugotovitev je zmanjšanje padca tlaka za približno 4 MPa pri prostorninskem pretoku 30 l/min pri aditivno izdelanem (AM) ventilu, praktično pa v celotnem območju meritve. Ta izboljšava je ključna in



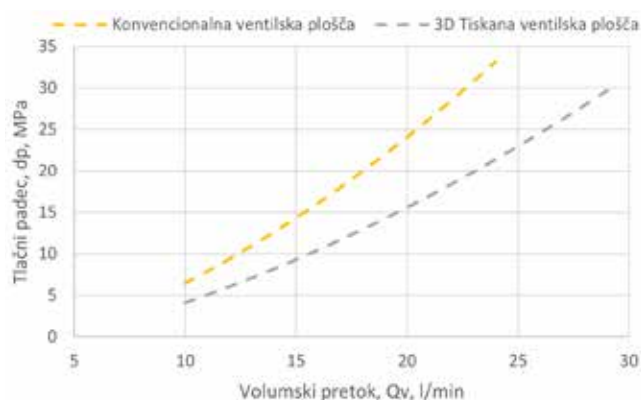
Slika 5 : Izmerjene karakteristike konvencionalnega in 3D natisnjenega hidravličnega ventila

je posledica optimizirane notranje geometrije, ki je bila zasnovana posebej za aditivno proizvodnjo in je ne bi bilo mogoče izdelati s konvencionalnimi odzemnimi metodami.

Poleg izboljšanih tokovnih zmogljivosti je ventil, izdelan z metodo Metal Binder Jetting (MBJ), pokazal tudi znatno zmanjšanje mase za 67 % v primerjavi s konvencionalnim ventilom. To je bilo doseženo z uporabo oblikovne optimizacije, ki jo omogoča oblikovna svoboda, značilna za proces MBJ.

5 Primerjava konvencionalne in 3D tiskane ventilske plošče

Aditivno izdelana ventilska plošča je prav tako pokazala jasne prednosti pred konvencionalno izdelano, kot je prikazano na *sliki 6*. Zaradi pretoku prilagojene notranje geometrije lahko opazimo izboljšane tokovne značilnosti z zmanjšano turbulenco in nižjimi tlačnimi izgubami. Poleg tega je plošča bistveno lažja, kar prispeva k zmanjšanju celotne teže sistema in olajša rokovanje med montažo in testiranjem. Ključna funkcionalna izboljšava je integracija tlačnih senzorjev neposredno v geometrijo plošče, kar omogoča natančnejše in bolj dosledne meritve tlaka brez dodatnih priključkov ali zunanjih povezav. Ta integracija predstavlja povezanost delov, kjer se več komponent in funkcij združi v en sam tiskani del, s čimer se poenostavi tako zasnovna kot tudi proces montaže. Rezultati obeh meritev, ki sta bili izvedeni pri 30-odstotni odprtosti ventila, so prikazani na *sliki 6*. Jasno je razvidno, da 3D tiskana plošča omogoča natančnejše merjenje značilnosti ventila zaradi integriranih senzorjev. Pri pretoku 20 l/min znaša ta razlika skoraj 10 MPa.



Slika 6 : Izmerjene karakteristike ventila na konvencionalno izdelani in pri 3D natisnjeni ventilski plošči. 3D natisnjena ventilska plošča uporablja integrirana tlačna zaznavala.

6 Zaključki

Iz predstavljenih rezultatov lahko zaključimo, da je v hidravliki smiselno uporabljati aditivno izdelane (AM) ventile in ventilske plošče namesto konven-

cionalno izdelanih delov. Kot je že omenjeno, obstaja veliko prednosti: od lažjega montažnega procesa do boljše zmogljivosti in natančnejših meritev. Komponente AM so deloma omejene le zaradi višjih stroškov, vendar pa, kot jasno kaže ta študija, nizka raven merilne natančnosti, dosežena s konvencionalno ploščo, naredi uporabo plošče AM z integriranimi senzorji bolj smiselno, zlasti pri višjih pretokih.

Viri

- [1] O. Diegel, A. Nordin, D. Motte, A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing, Springer Singapore, Singapore, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-8282-6>.
- [2] M. Arena, P. Ambrogiani, V. Raiola, F. Bocchetto, T. Tirelli, M. Castaldo, Design and qualification of an additively manufactured manifold for aircraft landing gears applications, Aerospace 10 (2023) 69. <https://doi.org/10.3390/aerospace10010069>.
- [3] G. Matthiesen, D. Merget, M. Rückert, K. Schmitz, J. H. Schleifenbaum, Additive manufacturing processes in fluid power – properties and opportunities demonstrated at a flow-optimized fitting, in: Proc. Int. Conf. Hydraulics and Pneumatics – HERVEX, 2018, pp. 1–6. ISSN 1454-8003.
- [4] U. Hofmann, M. Fankhauser, S. Willen, D. Inniger, C. Klahn, K. Löffel, M. Meboldt, Design of an additively manufactured hydraulic directional spool valve: an industrial case study, Virtual Phys. Prototyp. 18 (2023) 1–18. <https://doi.org/10.1080/17452759.2023.2167905>.
- [5] Tappeiner Z.*, Donners M., Schmid M., Schmitz K., Resource saving process route for integrated hydraulic components. HyRes Project poster; RWTH Aachen University; Octubre 2014. Available from: HyRes – Resource saving Process Route for Integrated Hydraulic Components [Internet]. RWTH Aachen University; [cited 2025 Jul 30]. Na voljo na: <https://acam.rwth-campus.com/wpcontent/uploads/sites/11/2014/10/HyRes Resource saving Process Route for Integrated Hydraulic Components.pdf>.
- [6] K. Wegener, M. Zäh, P. Frankenberger, H. Heußner, K. Hufnagl, C. Kokeisl, P. Mayr, M. Schmidt, J. Seitz, F. Vollertsen, T. Graf, Advanced manufacturing processes: New insights into additive and hybrid manufacturing, Addit. Manuf. 35 (2020) 101530. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101530>.
- [7] S. Lloyd, "Least squares quantization in PCM," in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 28, no. 2, pp. 129–137, March 1982, doi: 10.1109/TIT.1982.1056489.
- [8] Han, J.; Kamber, M.; Pei, J. Data Mining: Concepts and Techniques; Morgan Kaufmann Publishers Inc.: Burlington, MA, USA, 2011
- [9] Pušnik, T.; Hace, A. Region-Based Approach for

Machining Time Improvement in Robot Surface Finishing. Appl. Sci. 2024, 14, 9808. <https://doi.org/10.3390/app14219808>

[10] Stradovnik, S.; Hace, A. Task-Oriented Evaluation of the Feasible Kinematic Directional Capabilities for Robot Machining. Sensors 2022, 22,

4267. <https://doi.org/10.3390/s22114267>.

[11] Stradovnik, S.; Hace, A. Workpiece Placement Optimization for Robot Machining Based on the Evaluation of Feasible Kinematic Directional Capabilities. Appl. Sci. 2024, 14, 1531. <https://doi.org/10.3390/app14041531>

Additive Technology in Practice: Test Analysis of a Hydraulic Valve with an Innovative Valve Plate

Abstract:

The study investigates the use of additive manufacturing technologies in the production of hydraulic components, focussing on 3D-printed valves and manifolds with integrated pressure sensors. Additive technologies such as Metal Binder Jetting (MBJ) and Selective Laser Melting (SLM) enable design freedom, component consolidation and optimisation of internal geometry to reduce pressure losses and mass. In the study, metal valves were manufactured and tested using the MBJ process, which enables high productivity and the production of complex structures without supports. A comparison with the SLM process shows the advantages of the MBJ process through higher production speeds, lower costs and a reduced need for support structures. Flow and pressure measurements showed that the additively manufactured valve manifold has a lower pressure drop of around 4 MPa at the same flow rate, which means greater efficiency. In addition, the 3D-printed valve body is 67% lighter than the conventionally manufactured one. The results confirm that additively manufactured components are suitable for series use in the hydraulics industry, as they offer better efficiency, shorter assembly times and the possibility of design optimisation despite higher costs compared to conventional parts.

Keywords:

Additive technologies, geometry optimization, hydraulic valves, connection plates, measurements



JAKŠA

MAGNETNI VENTILI

od 1965

- vrhunska kakovost izdelkov in storitev
- zelo kratki dobavni roki
- strokovno svetovanje pri izbiri
- izdelava po posebnih zahtevah
- širok proizvodni program
- celoten program na internetu



www.jaksa.si






Jakša d.o.o., Šlandrova 8, 1231 Ljubljana
T (0)1 53 73 066, F (0)1 53 73 067, E info@jaksa.si