

## RAZVOJ 3D TISKANEGA ORODJA ZA IZDELAVO KIRIGAMI LED SVETILKE

Aleš Hančič, Dragan Kusić, Matjaž Milfelner  
TECOS Razvojni center orodjarstva Slovenije

### POVZETEK

*V prispevku je predstavljen razvoj 3D tiskanega orodja za izdelavo kirigami LED svetilke v okviru evropskega projekta 3DoP – 3D Printing Optimized Production. Projekt združuje napredne tehnologije hibridno tiskanih elektronskih vezij (HPE), brizganja plastike z uporabo 3D tiskanih kovinskih orodij in procesa termoformiranja. Kirigami svetilka je demonstrator, ki ponazarja prehod od dvodimenzionalne tiskane elektronske folije do kompleksne tridimenzionalne strukture z integriranimi LED diodami. Prispevek obravnava razvoj LED folije, simulacijo procesa brizganja, načrtovanje in 3D tisk orodja, postopek zabrizgavanja folije ter testiranje funkcionalnosti končnega izdelka.*

### 1. UVOD

Napredne tehnologije hibridno tiskanih elektronskih vezij (HPE) omogočajo nizkocenovno in okoljsko trajnostno izdelavo elektronskih sistemov na fleksibilnih substratih (PET, PEN, TPU). V projektu 3DoP je bil cilj povezati to tehnologijo z aditivno izdelavo kovinskih vložkov za orodje ter s postopki brizganja plastike in termoformiranja, ustvariti tridimenzionalne izdelke z integrirano funkcionalno elektroniko. [1]

Med ključnimi demonstratorji projekta je kirigami LED svetilka, ki združuje umetnost rezanja in pregibanja (kirigami) s funkcionalno LED folijo in napredno tehnologijo izdelave. [2] Končni cilj je razvoj postopka, ki omogoča hitro prilagoditev geometrije svetilke, optimizirano hlajenje orodja in zanesljivo delovanje v industrijskem okolju.

### 2. IDEJA ZA KIRIGAMI LED

Izraz kirigami pomeni “rezanje in pregibanje papirja”, tehniko, ki omogoča ustvarjanje tridimenzionalnih oblik iz dvodimenzionalnih ploskev. [2] Prenos tega koncepta na področje tiskanih elektronskih vezij je omogočil razvoj prilagodljivih struktur, ki se med sestavljanjem razprejo v prostorsko konfiguracijo.

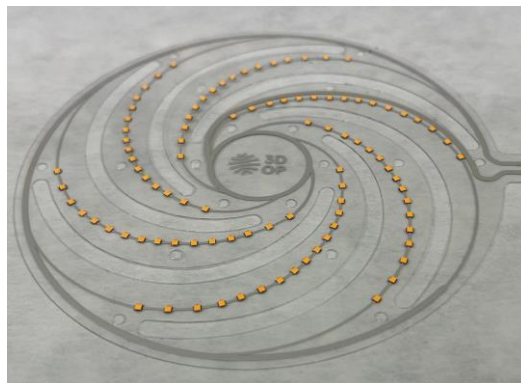
Za izdelek kirigami LED svetilka je bila izbrana geometrija s centralno osno simetrijo in

šestimi kraki (“legs”). Vsak krak vsebuje zaporedje LED diod. Ta zasnova omogoča homogeno prostorsko osvetlitev in enakomerno mehansko deformacijo krakov.

Pomemben del razvoja je bilo usklajevanje električne sheme z mehansko zasnovo – vsaka sprememba geometrije folije vpliva na potek in ukrivljenost tiskanih vodov na foliji. [3]

### 3. IZDELAVA LED FOLIJE

LED folija je bila zasnovana kot hibridni elektronski modul z visoko mehansko prožnostjo. [3] Osnovni material je PET folija debeline 125  $\mu\text{m}$ , ki je bila izbrana zaradi nizke toplotne prevodnosti in dobre dimenzijske stabilnosti tekom termoformiranja. [1]



**Slika 1:** LED folija

Postopek izdelave LED folije je vključeval tisk prevodnih in dielektričnih slojev s srebrnimi

pastami po postopku sitotiska. Po tisku je sledil nanos zaščitnega laka z UV-sušenjem in termično stabilizacijo, nato pa avtomatizirana namestitev LED komponent s sistemom pick-and-place ter spajkanje s termokomprimirnim postopkom in optičnim testiranjem. Na koncu je sledil laserski razrez folije kirigami vzorca.

Na vsakem kraku je nameščenih 16 LED diod (skupno 96), kar omogoča enakomerno prostorsko osvetlitev. (Slika 1)

#### 4. SIMULACIJA BRIZGANJA

Simulacija procesa brizganja je bila izvedena na podlagi geometrijskega dizajna LED folije in vmesne oblikovne konfiguracije izdelka, pri čemer je bil cilj določiti optimalne pogoje za stabilen tok taline, popolno zapolnitev votline ter minimalne mehanske obremenitve na nameščene LED diode. Numerične analize so bile izvedene z uporabo Autodesk Moldflow programa, kjer je za simulacijo brizganja bil uporabljen material PMMA zaradi njegove visoke transparentnosti, nizke viskoznosti in dobre adhezije na PET podlago. [1]

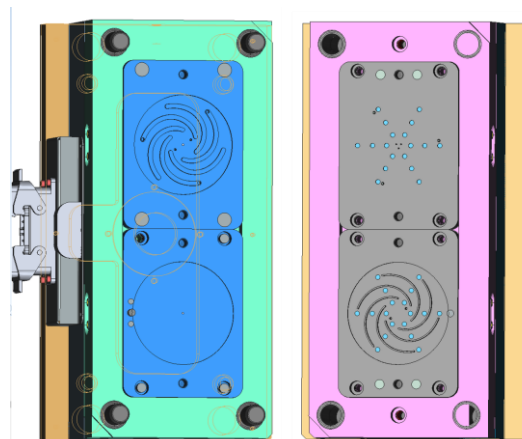
V prvem koraku je bila izvedena analiza toka taline, ki je potrdila ustreznost položaja dolivka v centralni osi izdelka ter enakomerno polnjenje vseh šestin krakov kirigami strukture. Nadaljnja analiza zračnih vključkov in spojnih linij je pokazala, da se kritična območja pojavljajo le na robovih krakov, kjer ni elektronskih komponent, kar omogoča varno brizganje brez poškodb LED diod. V drugem delu simulacije je bila izvedena termična analiza hlajenja, za določitev konformnih kanalov v vložkih natisnjenih po postopku DMLS [4,5], saj zagotavlja temperaturno enakomernost z razliko manjšo od 5°C po celotni površini orodja.

Na podlagi dobljenih rezultatov je bila določena optimalna kombinacija procesnih parametrov. Simulacija je tako omogočila napoved stabilnega polnjenja brez deformacije PET folije in zagotovila optimalne pogoje za nastavev realnega procesa brizganja, kar je bistveno zmanjšalo potrebo po obsežnih eksperimentalnih iteracijah in zagotovilo

zanesljivost funkcionalne integracije LED folije v končni kirigami izdelek.

#### 4. RAZVOJ ORODJA

Razvoj orodja je bil izveden s poudarkom na zasnovi dvognezdnega orodja, namenjenega postopku obojestranskega zabrizgavanja LED folij. Glavni cilj je bil razviti orodje, ki omogoča enakomerno in učinkovito hlajenje, hkrati pa zagotavlja ustrezno stabilnost folije med zaporednima brizgalnima fazama. Orodje je bilo načrtovano tako, da se postopek brizganja izvede v dveh korakih: v prvem koraku se folija zabrizga z zgornje strani, kar ustvari optično difuzno zaščitno plast nad LED diodami, v drugem koraku pa sledi zabrizgavanje z nasprotni strani, s čimer se folija mehansko stabilizira.



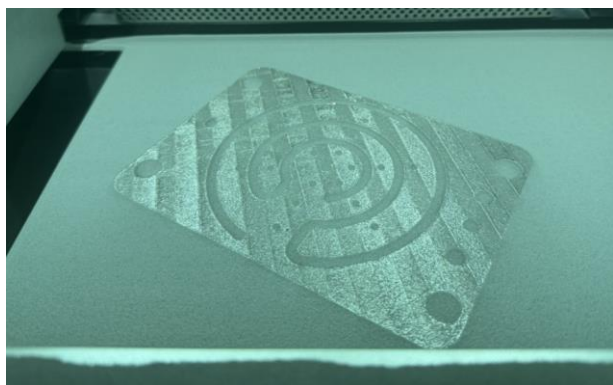
**Slika 2:** Konstrukcija orodja

V vsakem gnezdu so konstruirani vložki z integriranim konformnim hlajenjem, zasnovani po principu spiralnih kanalov, ki sledijo oblikovni površini izdelka na razdalji 2–3 mm. [4,5] Tak pristop omogoča izjemno enakomerno odvajanje toplote po celotni površini orodja, s čimer se zmanjšajo temperaturna nihanja in notranje napetosti v izdelku.

#### 6. 3D TISK ORODNIH VLOŽKOV

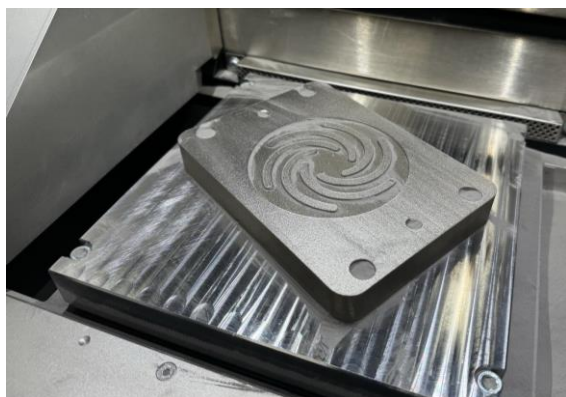
Izdelava orodnih vložkov je potekala s tehnologijo DMLS (Direct Metal Laser Sintering) na napravi EOS M280, pri čemer je bil uporabljen material Maraging Steel MS1 [6], znan po visoki

trdnosti, toplotni stabilnosti in dobri obdelovalnosti. Tehnologija DMLS omogoča realizacijo kompleksnih geometrij z integriranim konformnim hlajenjem, ki bi bile z običajnimi postopki rezkanja neizvedljive, kar je bilo ključno za zagotavljanje natančnega temperaturnega nadzora pri procesu zabrizgavanja folij. [4,7]



**Slika 3:** 3D tisk orodnega vložka

Pred začetkom tiska je bil pripravljen tridimenzionalni model vložkov z dodatkom za naknadno mehansko obdelavo (+0,7 mm). Sam tisk je potekal v plasteh debeline 40  $\mu\text{m}$ , z lasersko močjo 400 W in skupnim časom tiska približno 45 ur. Po končanem tisku je sledila odstranitev preostalega prahu iz votlin in kanalov. Izdelani vložki so bili nato toplotno obdelani po dvofaznem postopku – žarjenje za sprostitvev notranjih napetosti in staranje s čimer je bila dosežena končna trdota materiala ~53 HRC.



**Slika 4:** Izdelan orodni vložek

V nadaljevanju je bila izvedena natančna CNC obdelava na petosnem centru, kjer so bile obdelane delovne površine in referenčne točke,

do določene kakovosti površine. Po končnem poliranju je bila opravljena merska kontrola z CT merilnim sistemom.

Tako izdelani vložki z integriranimi spiralnimi hladilnimi kanali zagotavljajo izjemno enakomerno porazdelitev temperature po površini orodja, kar zmanjša toplotne napetosti v izdelku. Integracija DMLS tehnologije pri razvoj orodja omogoča krajši cikel hlajenja, višjo ponovljivost ter izboljšano kakovost zabrizganih izdelkov, kar predstavlja pomemben tehnološki korak pri in-mold integraciji tiskanih elektronskih struktur v kompleksne 3D izdelke.

## 7. IZDELAVA IZDELKA – ZABRIZGAVANJE FOLIJE

Proces zabrizgavanja LED folije je bil izveden na električnem brizgalnem stroju. Za izvedbo postopka je bil uporabljen material PMMA (polimetil metakrilat), ki se odlikuje po visoki optični prosojnosti, dobri dimenzijski stabilnosti in ustrezni adheziji na PET folijo.



**Slika 5:** Končna oblika kirigami LED svetilke

Postopek je bil zasnovan dvofazno. V prvi fazi je bilo izvedeno brizganje PMMA materiala na sprednjo stran folije, tako da tanek sloj PMMA služi kot zaščita za LED diode in hkrati kot difuzni sloj za enakomerno razpršitev svetlobe. V drugi fazi je sledilo brizganje z zadnje strani, s katerim je bila dosežena mehanska utrditev izdelka ter popolna inkapsulacija folije.

Po procesu zabrizgavanja folija je sledil postopek termoformiranja, kjer je bila dosežena končna oblika kirigami LED svetilke. (Slika 5)

## 8. FUNKCIONALNOSTNI TEST KIRIGAMI LED

Meritve po brizganju so potrdile popolno, 100-odstotno funkcionalnost LED diod, kar potrjuje, da je PMMA primeren material za optično učinkovito in mehansko stabilno integracijo LED folij v postopku dvofaznega brizganja. Po uspešni izdelavi je bil prototip kirigami LED svetilke funkcionalno testiran v laboratorijih TNO in Signify, kjer so bile izvedene optične in električne karakterizacije.

Električne meritve so potrdile stabilno delovanje vseh LED diod brez sprememb svetlobne jakosti ali napetostnih padcev.

Rezultati testiranj so potrdili, da zasnova kirigami LED svetilke omogoča homogeno prostorsko osvetlitev ter visoko stabilnost v delovnih pogojih. Izdelek je s tem dokazal tehnično izvedljivost in industrijsko relevantnost kombinacije tiskanih LED folij in brizganja plastike za razvoj novih tipov svetlobnih izdelkov. [8]



**Slika 6:** Delujoča LED svetilka

## 5. ZAKLJUČEK

Z razvojem kirigami LED svetilke smo potrdili izvedljivost integracije tiskanih LED folij v postopku procesa brizganja. Uporaba materiala PMMA se je izkazala kot optimalna zaradi visoke optične prosojnosti, stabilnosti in dobre adhezije na tiskano kirigami LED folijo. Testiranja so potrdila popolno funkcionalnost LED diod po brizganju ter homogeno porazdelitev svetlobe, kar dokazuje zanesljivo združljivost elektronskih

komponent s standardnimi postopki brizganja plastike.

Tehnologija DMLS izdelave orodnih vložkov s konformnim hlajenjem je omogočila natančno temperaturno kontrolo in krajši cikel hlajenja, s čimer se izboljšata ponovljivost in kakovost izdelkov. Kirigami LED svetilka tako predstavlja pomemben korak k razvoju naprednih in-mold rešitev z vgrajeno elektroniko za prihodnjo generacijo pametnih svetlobnih aplikacij.

Projekt 3DoP (3D Printing Optimized Production) je sofinanciran iz Instrumenta I3 (Interregional Innovation Investments Instrument).

Raziskava je bila izvedena v okviru projekta 3DoP skupaj s partnerji TNO/Holst Centre, Signify, TracXon in PORIN.

## Literatura

- [1] H. Akkerman, 3D Kirigami Lighting enabled by 2D Printed Electronics, Holst Centre, 2025.
- [2] Chen, S., et al. (2020). Kirigami/origami: unfolding the new regime of advanced 3D microfabrication/nanofabrication. *Light: Science & Applications*, 9, 132.
- [3] Yang, Y., et al. (2024). A Review of Multimaterial Additively Manufactured Electronics and 4-D Printing / Origami Shape-Memory Devices. *Materials Today Communications*, 37, 105-129.
- [4] Shen, S., Kanbur, B. B., Wu, C., & Duan, F. (2024). Three-Dimensional Printing Conformal Cooling with Structural Lattices for Plastic Injection Molding. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 22(2), 397–415.
- [5] Dimla, E., Camilotto, M., & Miani, F. (2005). Conformal cooling channels in injection moulding. *Journal of Materials Processing Technology*, 164–165, 1294–1300.
- [6] EOS GmbH. (2024). Material Data Sheet – Maraging Steel MS1.
- [7] Dvorak, K., et al. (2019). Quality Parameters of 3D Print Products by the DMLS Method. *Manufacturing Technology*, 19, 209–215.
- [8] Yang, Y., et al. (2024). Bridging Additive Manufacturing and Electronics Printing in Multi-material/Hybrid 3D Structures. *Nanomaterials*, 15(11), 843.