

## » Uporaba optične merilne metode DIC v projektu A\_MADAM

**Prof. Snežana Čirić Kostić**  
**dr. Jelena Janković Tomić**  
**dr. Tommaso Maria Brugo**  
**dr. Nenad Drvar**

Dodajalne izdelovalne tehnologije se vse bolj uveljavljajo v proizvodnji funkcionalnih izdelkov, ki so med uporabo izpostavljeni dinamičnim obremenitvam. Cilj projekta A\_MADAM je določitev konstrukcijskih pravil za optimalne dinamične lastnosti izdelkov, narejenih z dodajalnimi izdelovalnimi tehnologijami.

Za potrebe preizkušanja materialov, merjenje pomikov in deformacij med napredovanjem razpok ter verifikacijo in umerjanje numeričnih simulacij uporabljamo optično merilno metodo na osnovi korelacije digitalnih posnetkov (DIC). Eksperimenti v prvi fazi projekta se izvajajo na preizkušancih iz poliamida (PA), izdelanih s 3D-tiskalnikom po postopku SLS. Dosedanje izkušnje kažejo, da je izbrana metoda DIC preprosta za uporabo, rezultati pa dajejo podroben pregled nad dejanskim vedenjem konstrukcij.

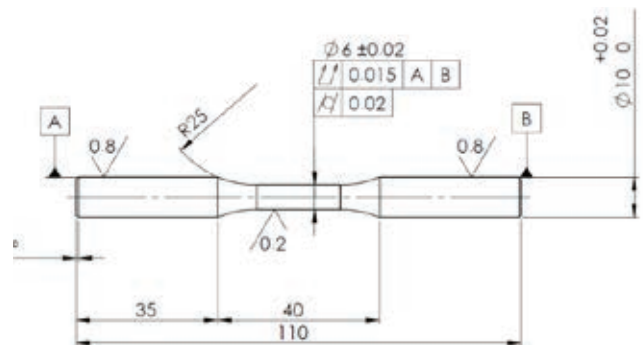
Težišče pozornosti na hitro razvijajočem se področju dodajalnih izdelovalnih tehnologij (Additive Manufacturing, AM) se zadnja leta premika z izdelave prototipov na proizvodnjo funkcionalnih delov in orodij. Specifičen pristop s postopnim dodajanjem tankih plasti materiala omogoča tudi izdelavo delov s kompleksnimi geometrijami, ki so sicer zunaj dosega konvencionalnih proizvodnih tehnologij. Na ta način se med drugim izboljša prilagodljivost razvoja in proizvodnje, pospeši proces razvoja izdelkov in omogoči posamična (personalizirana) proizvodnja.

Po drugi strani pa tehnologija AM zaradi razmeroma visokih stroškov izdelave, omejene izbire materialov in neobstoja jasnih pravil za konstruiranje še ni doživela množične uporabe v proizvo-

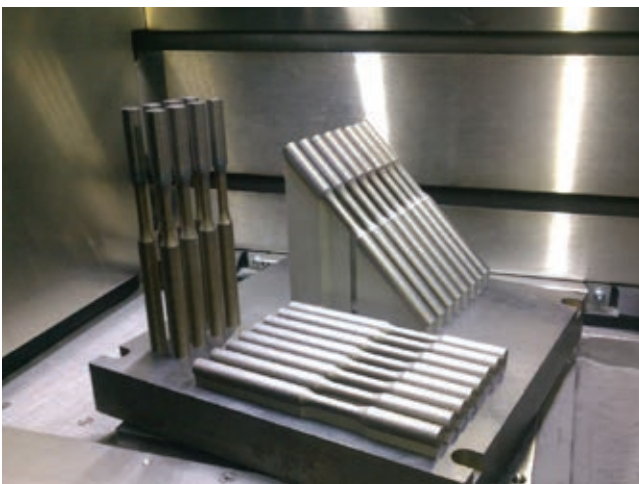
dnji. Evropska unija je prepoznala dodajalne izdelovalne tehnologije kot področje, kjer ima Evropa potencial za vodilni položaj v industriji. Zadnja leta zato finančno podpira raziskovalne projekte s ciljem bolj množične uporabe dodajalnih izdelovalnih tehnologij v proizvodnji funkcionalnih izdelkov, komponent in orodij.

### Eksperimentalni postopek

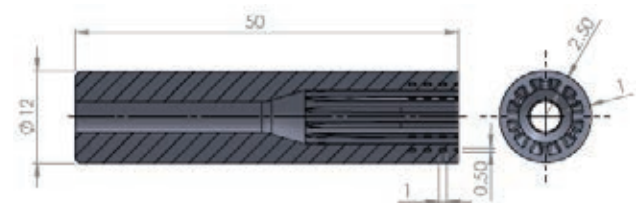
V skladu z raziskovalnim načrtom projekta A\_MADAM [1] bo opravljenih 45 eksperimentov za določanje dinamičnih lastnosti kovinskih delov. V eksperimentih bo vključenih 645 preizkušancev iz treh vrst jekla. S preiskavami bo določena trajna vzvojnja trdnost standardnih epruvel (Sliki 1 in 2).



» Slika 2: Geometrija standardne epruvel za preizkušanje trajne dinamične trdnosti



» Slika 1: Standardne kovinske epruvel za preizkušanje trajne dinamične trdnosti, izdelane po postopku 3D-tiskanja



» Slika 3: "Preizkušavec, konstruiran za potrebe preizkušanja trajne dinamične trdnosti kovinskih delov, narejenih z dodajalnimi izdelovalnimi postopki"

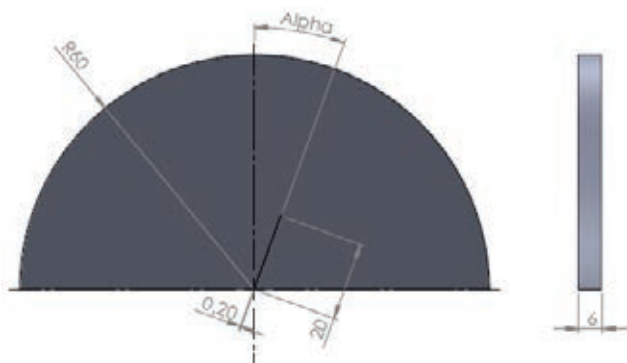
Poleg epruvel standardne oblike so bili konstruirani posebni preizkušanci (Slika 3) za določanje dinamičnih lastnosti kovinskih delov, narejenih z dodajalnimi izdelovalnimi tehnologijami. Te preiskave obsegajo 10 eksperimentov in 93 preizkušancev.

Preizkusom trajne dinamične trdnosti kovinskih delov se pridružujejo tudi preiskave na področju lomne mehanike in v



**Prof. Snežana Čirić Kostić, dr. Jelena Janković Tomić**  
- Fakulteta za strojništvo in gradbeništvo v Kraljevu, Kraljevo, Srbija • **dr. Tommaso Maria Brugo** - Univerza v Bologni, Bologna, Italija • **dr. Nenad Drvar** - TOPOMATIKA, d. o. o., Zagreb, Hrvaška

ta namen je bilo izdelanih 96 preizkušancev po tehnični risbi na Sliki 4. Preiskave lomne mehanike bodo opravljene v 16 eksperimentih s preizkušanci iz jekla in kompozitnih materialov. Opisani raziskovalni načrt je glede na zbirko preizkušancev, uporabljene materiale in načine preiskav osnova za najboljše raziskavo na področju dodajalnih izdelovalnih tehnologij do sedaj. Raziskave so se začele leta 2017 in bodo trajale štiri leta. V tem prispevku zato predstavljamo nekaj rezultatov meritev, ki so že bile opravljene na preizkušancih iz poliamida, 3D-natisnjenih s tehnologijo SLS.



» Slika 4: Preizkušanec za preiskave parametrov lomne mehanike

Za potrebe določanja mehanskih lastnosti, verifikacijo numeričnih simulacij in analizo napredovanja razpok v sklopu lomne mehanike je bila izbrana sodobna optična merilna metoda na podlagi korelacije digitalnih posnetkov (angl. DIC – Digital Image Correlation). Metoda omogoča dinamične meritve prostorskih pomikov in površinskega deformacijskega tenzorja na površini preizkušanca brez fizičnega stika med merilno napravo in merjencem. Za obremenjevanje preizkušanca se lahko uporabijo vse dostopne naprave (npr. električni ali hidravlični trgalni stroji, stiskalnice ipd.).

Metoda DIC zahteva predhodno pripravo preizkušanca z nanosom stohastičnega rastrskega vzorca, ki se mora premikati skupaj z osnovnim materialom.

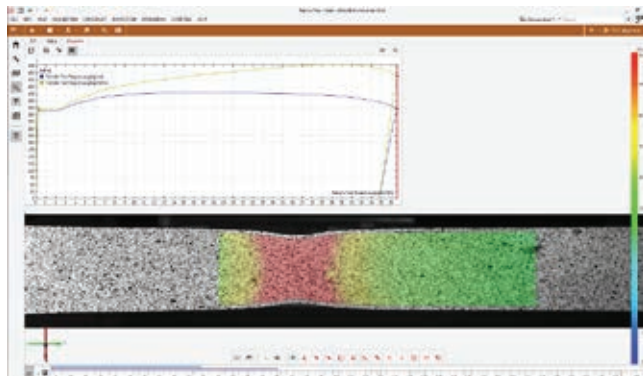
Priprava preizkušancev je znatno hitrejša kot pri uporabi merilnih lističev, saj odpade posebna priprava površin in skrbno lepljenje lističev. Na površino je treba nanesti le bel ali črn mat lak v spreju.

Projektni partner TOPOMATIKA, d. o. o., [2] razpolaga s sistemi ARAMIS nemškega proizvajalca GOM GmbH [3] v več različicah. V okviru delovnega paketa WP3-TEST sta bili uporabljeni napravi ARAMIS 3D-Camera 6Mpixel (Slika 5) in ATOS Core 5Mpixel za izvedbo preliminarnih meritev preizkušancev iz 3D-natisnjenega polimera, ki so predstavljene v tem prispevku. Na Sliki 7 je podana poenostavljena razlaga načela delovanja metode DIC. Preizkušanec s stohastičnim vzorcem na površini je med preizkusom vpet v preizkuševalnem stroju (v tem primeru gre za elektromehanski trgalni stroj Inspekt table 20 kN nemškega proizvajalca Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH) in obremenjen tako, da se napetosti oz. deformacije konstantno povečujejo. Sistem ARAMIS medtem z dvema identičnima kamerama zajema stereopare posnetkov. Začetno stanje je posneto še pred



» Slika 5: Sistem GOM ARAMIS za merjenje pomikov in deformacij z digitalno korelacijo slike

obremenitvijo epruvete. Vzporedno z zajemanjem slik krmilnika za preizkuse digitalizira signal iz priključka za merjenje sile, ki se lahko pozneje uporabi za analizo, npr. za konstruiranje diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  pri preiskavah mehanskih lastnosti materialov (Slika 6).

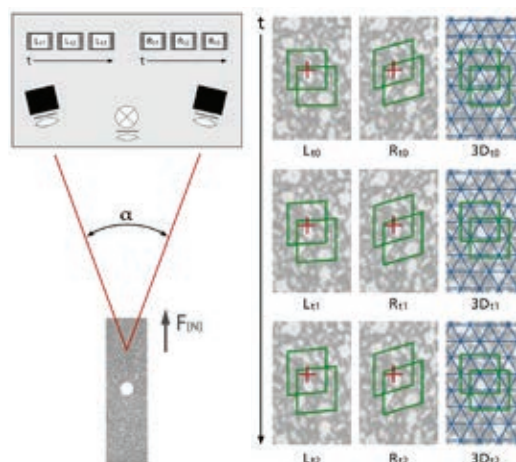


» Slika 6: Primer rezultatov merjenja mehanskih lastnosti epruvete z napravo GOM ARAMIS

Ko so pridobljeni vsi pari slik (npr. od neobremenjenega stanja do pretrganja preizkušanca), se posnetki obdelajo z digitalnimi korelacijskimi operatorji. Metoda DIC zahteva razdelitev posnetkov na manjše dele, ki jih običajno imenujemo »fasete« (uporabljene so fasete, ki niso večje od  $25 \times 25$  slikovnih točk, in prekrivanje v 16 slikovnih točkah), ki jih programski paket ARAMIS Professional poišče samodejno na vseh levih in desnih posnetkih.

Rezultat meritve za vsak par posnetkov (stereopar) in za vsako faseto je položaj središča fasete oz. oblak točk, ki opisuje trenutno geometrijo merjenca, kot tudi popolna vizualizacija stanja površinskih pomikov in deformacij (Sliki 5, 6). Stohastičen površinski vzorec zagotavlja, da je v vsakem trenutku znana točna lega vsake fasete oziroma točke. S primerjavo stereoparov slik oz. rezultatov analize se izračunajo prostorski pomiki in površinske deformacije. Tudi ta postopek poteka samodejno.

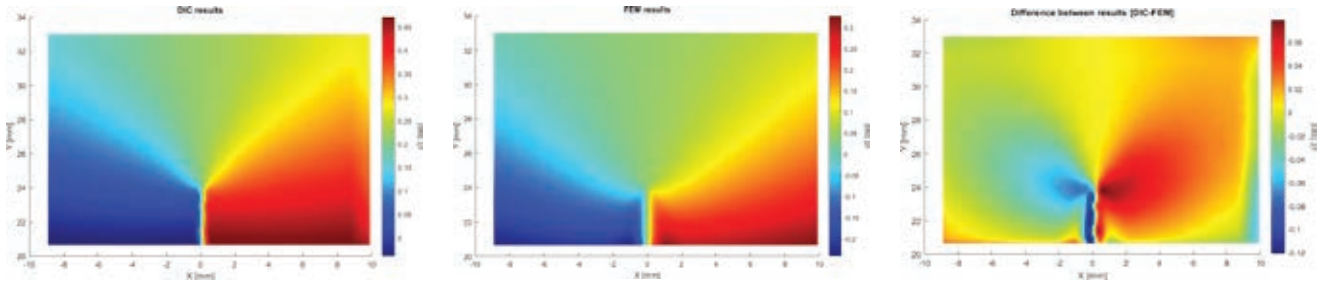
Programska oprema omogoča vnos lastnih formul za analizo rezultatov, izvoz rezultatov v druge programske pakete (npr. Matlab), kakor tudi uvoz rezultatov numeričnih simulacij za primerjavo v celotnem polju ter verifikacijo in umerjanje numeričnih simulacij.



» Slika 7: Načelo delovanja metode DIC, shematski prikaz merilnega sistema ARAMIS (levo), vizualizacija fasete na posnetkih leve (L) in desne (R) kamere, in gibanje fasete v času  $t$  (desno)

## Rezultati in diskusija

Struktura materiala pri izdelkih, ki so narejeni z dodajalnimi izdelovalnimi tehnologijami, pogosto ni izotropna in homogena,



» Slika 8: Primerjava pomikov v smeri Y, določenih optično po metodi DIC in s simulacijo po MKE

temveč je odvisna od uporabljene tehnologije. Pri postopkih FDM z ekstrudiranjem žice iz umetne mase se lastnosti spreminjajo glede na začetno orientacijo izdelka v delovnem prostoru 3D-tiskalnika. Posledično se še dodatno poveča kompleksnost numeričnih simulacij, pri katerih tako ali tako velja predpostavka, da se izvajajo na predmetih znane geometrije, znanih mehanskih lastnosti in z znanimi obremenitvami. Geometrijo je mogoče digitalizirati s 3D-skenerjem in v podjetju TOPOMATIKA, d. o. o., v ta namen uporabljajo napravo GOM ATOS.

Da bi preverili možnosti uporabe numeričnih simulacij tudi pri izdelkih z zahtevnejšo geometrijo, ki jih ni tako enostavno preizkušati z običajnimi preizkuševalnimi stroji, smo opravili tudi prve teste za primerjavo rezultatov numeričnih simulacij in optičnih meritev. Rezultati meritev in simulacij se za primerjavo najprej poravnajo v istem koordinatnem sistemu, čemur sledi primerjava istih velikosti. Na Sliki 8 je predstavljena primerjava pomikov v smeri Y. Takšna primerjava omogoča jasno vizualizacijo celotne površine in razvidno je, da obstajajo razlike v polju pomikov velikostnega razreda od  $-0,12$  do  $+0,08$  mm. Prikazani so tudi predznak razlike in mesta, kjer so razlike največje. V nadaljnjih korakih optimizacije numeričnih simulacij bo mogoče še prilagoditi vrsto/število končnih elementov in tako zmanjšati razlike na minimum. Metoda DIC omogoča tudi zanimivo funkcionalnost uporabe rezultatov meritev pomikov in deformacij v obratni smeri, torej s preslikavo na mrežo

končnih elementov. Na osnovi znanih pomikov se nato lahko rekonstruirajo mehanske lastnosti opazovanega objekta.

Za proučitev vpliva razpok in njihovega napredovanja v odvisnosti od kota razpoke in smeri gradnje potekajo preiskave na polkrožnih diskih (angl. Semi-circular bend) [4, 5, 6], pri katerih je začetna razpoka vdolbena že med izdelavo preizkušanca. Slika 9 prikazuje nekaj prelomov po psevdostatični obremenitvi za prvo vrsto razpok. Glede na pretežno dvodimenzionalne razmere so bile meritve opravljene z eno kamero in z veliko povečavo. V naslednji fazi je načrtovana izvedba enakih meritev še s kovinskimi epruvetami.

## Zaključek

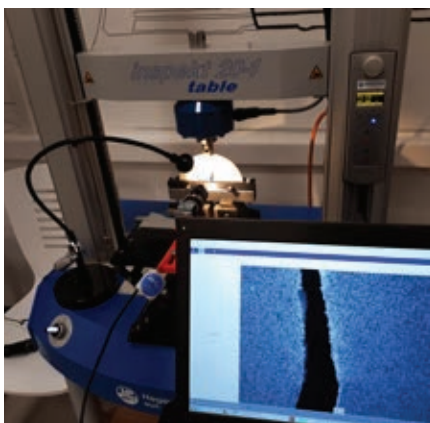
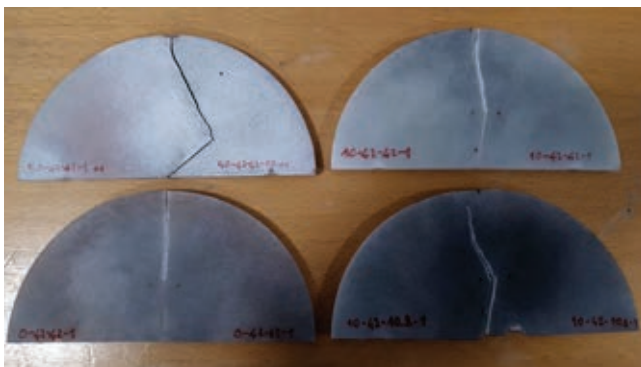
Izbrana metoda DIC je po dosedanjih izkušnjah preprosta za uporabo, rezultati pa v primerjavi s konvencionalnimi merilnimi postopki (merilni lističi, LVDT) zagotavljajo podrobnejši vpogled v dejansko vedenje konstrukcij. Eden od ciljev projekta A\_MADAM je tudi priprava baze podatkov, ki bo pozneje na voljo vsem inženirjem. Izbrana optična merilna metoda zagotavlja razumljivost in dostopnost rezultatov meritev. Razen za preiskave mehanskih lastnosti jih je mogoče izkoristiti tudi za verifikacijo numeričnih simulacij in za proučevanje vedenja teh končnih izdelkov, ki so kompleksnih oblik in izpostavljeni kompleksnim obremenitvam, vse bolj pa se uveljavljajo tudi v industriji proizvodov za široko potrošnjo, medicinskih pripomočkov, v avtomobilski in letalski industriji. Baza podatkov in brezplačni programski paket GOM Correlate, ki vsakomur omogoča analizo rezultatov meritev, bosta omogočila dodatne analize brez ponavljanja eksperimentov in s tem zmanjšanje stroškov prihodnjih raziskav.

## Zahvala

Ta članek je del raziskav, opravljenih v okviru projekta »Advanced design rules for optimal dynamic properties of additive manufacturing products – A\_MADAM«, ki je financiran s strani Evropske unije v okviru raziskovalnega in inovacijskega programa Horizon 2020, pogodba Marie Skłodowska-Curie št. 734455.

## Literatura

- [1] [www.mfkv.kg.ac.rs/a\\_madam/](http://www.mfkv.kg.ac.rs/a_madam/)
- [2] [www.TOPOMATIKA.hr](http://www.TOPOMATIKA.hr)
- [3] [www.GOM.com](http://www.GOM.com)
- [4] Brugo, T., Palazzetti, R., Ćirić-Kostić, S., Yan, X.T., Minak, G., Zucchelli, A. Fracture mechanics of laser sintered cracked polyamide for a new method to induce cracks by additive manufacturing, (2016) Polymer Testing, 50, pp. 301–308.
- [5] Ayatollahi M.R. et. al.: Mixed mode brittle fracture in PMMA — An experimental study using SCB specimens, Materials Science and Engineering A 417 (2006)
- [6] H. Saghafi, A. Zucchelli, G. Minak: Evaluating fracture behavior of brittle polymeric materials using an IASCB specimen, Polymer Testing, 2013, 32, pp. 133–140



» Slika 9: Merjenje napredovanja razpoke med tritočkovnim upogibnim preizkusom