

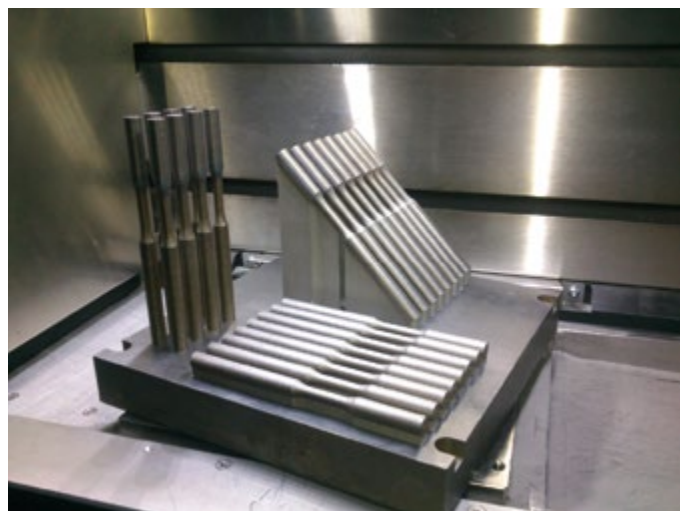
## PRIMENA OPTIČKE DIC MERNE METODE NA PROJEKTU A\_MADAM

Aktivne tehnologije sve više se koriste u izradi funkcionalnih proizvoda koji su za vreme eksploatacije podložni dinamičkim opterećenjima. Cilj projekta AMADAM je utvrditi pravila dizajna, tako da s obzirom na način proizvodnje proizvodi aditivnih tehnologija imaju optimalna dinamička svojstva. Primenili smo optičku mernu metodu baziranu na digitalnoj korelaciji slike (DIC) za potrebe ispitivanja materijala, merenja pomaka i deformacija kod propagacije naprslina i verifikaciju i kalibraciju numeričkih simulacija. Eksperimente u prvoj fazi projekta provodimo na uzorcima od poliamida (PA) proizvedenim na SLS 3D printeru. Dosadašnja iskustva pokazala su da se odabrana DIC metoda pokazala jednostavnom za korišćenje a rezultati koje daje pružaju detaljni uvid u stvarno ponašanje konstrukcija.

**Autori teksta:** prof. Snežana Čirić Kostić, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu dr Jelena Janković Tomić, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu dr Tommaso Maria Brugo, University of Bologna, Italija dr Nenad Drvar, TOPOMATIKA d.o.o, Zagreb

### UVOD

Poslednjih nekoliko godina, u okviru brzo razvijajuće oblasti aditivne proizvodnje (Additive Manufacturing, AM), fokus se pomera sa izrade prototipova na proizvodnju funkcionalnih delova i alata. Zahvaljujući specifičnom principu izrade objekata sukcesivnim dodavanjem tankih slojeva materijala, aditivna proizvodnja omogućava izradu delova kompleksne geometrije koje nije moguće izraditi konvencionalnim postupcima proizvodnje - čime se omogućavaju veće fleksibilnosti u razvoju i proizvodnji, brži proces razvoja proizvoda, pojedinačna (personalizovana) proizvodnja i dr.

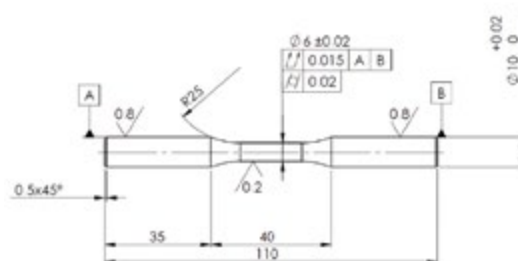


Metal 3D print standardnih epruveta za ispitivanje dinamičke izdržljivosti

Sa druge strane, zbog relativno visokih troškova izrade, ograničenja u izboru vrste materijala i nepostojanja jasno definisanih pravila projektovanja, AM tehnologija još uvek ne nalazi masovnu primenu u proizvodnji. Prepoznavši aditivnu proizvodnju kao tehnologiju koja poseduje potencijal da regionu Evrope omogući industrijsko liderstvo, poslednjih nekoliko godina Evropska unija finansijski podržava istraživačke projekte sa ciljem masovnije primene aditivnih tehnologija u izradi funkcionalnih proizvoda, komponenti i alata.

### EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

U skladu sa planom istraživanja AMADAM projekta [1], u cilju ispitivanja dinamičkih karakteristika metalnih delova, sprovodiće se 45 eksperimenata kojima će biti obuhvaćeno 645 uzoraka izrađenih od tri vrste čelika. Ispitivanjima će se odrediti dinamička izdržljivost standardnih epruveta, podvrgnutih rotacionim savijanju.



Geometrija standardne epruvete za ispitivanje dinamičke izdržljivosti

Pored uzoraka standardnog oblika, konstruisani su i posebni uzorci za određivanje dinamičkih karakteristika metalnih delova proizvedenih primenom aditivne tehnologije. Data ispitivanja će se sprovoditi kroz 10 eksperimenata kojima će biti obuhvaćeno 93 uzorka.

Pored ispitivanja dinamičke izdržljivosti metalnih delova, za potrebe ispitivanja mehanike loma proizvedeno je 96 uzoraka u skladu sa tehničkim crtežom. Ispitivanje mehanike loma sprovodi se kroz 16 eksperimenata nad uzorcima od čelika i kompozita. Opisanim planom istraživanja predviđeno je najobimnije istraživanje ikada sprovedeno u oblasti aditivne proizvodnje, uzimajući u obzir kolekciju uzoraka, korišćene materijale i vrste ispitivanja. S obzirom na to da se radi o istraživanju koje je krenulo 2017. i traje 4 godine, u sklopu ovog rada donosimo nekoliko primera trenutno dostupnih rezultata merenja na uzorcima od poliamida (PA) 3D štampanih SLS tehnologijom

Za potrebe merenja mehaničkih svojstava, verifikaciju numeričkih simulacija i analizu propagacije naprslina za mehaniku loma, odabrana je moderna optička merna metoda bazirana na digitalnoj korelaciji slike (eng. DIC - Digital Image Correlation). Omogućuje dinamičko merenje prostornih pomaka i površinskog tenzora deformacija na površini uzorka, bez direktnog kontakta mernog uređaja i mernog objekta. Opterećenje uzorka može se provoditi na svim postojećim dostupnim uređajima (npr. elektrostatičke ili hidrauličke kidalice, preše, oviri za opterećenje i slično).

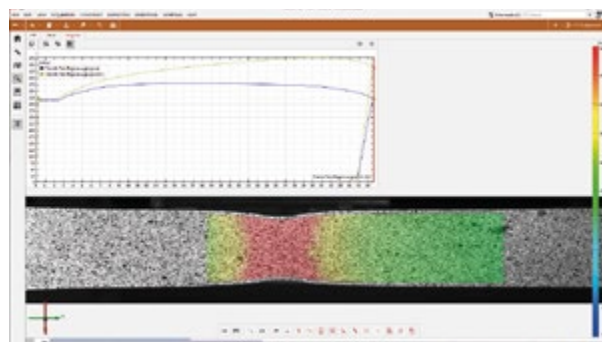
DIC metoda zahteva prethodnu pripremu uzorka nanošenjem stohastičkog rasterskog uzorka koji mora biti tako izveden da se pomera zajedno s osnovnim materijalom.

Brzina pripreme uzorka je znatno veća nego kada se koriste tenzometarske trake jer nije potrebna posebna priprema površine i pažljivo lepljenje mernih traka, jer se svodi na sprejanje površine uzorka belim i crnim mat lakovima.



GOM ARAMIS sistem za merenje pomaka i deformacija korišćenjem digitalne korelacije slike

Partner na projektu TOPOMATIKA d.o.o. [2] raspolaže sistemom ARAMIS nemačkog proizvođača GOM GmbH [3] u nekoliko varijanti: ARAMIS 3D Camera 6Mpixel i ATOS Core 5Mpixel koji su korišćeni da se u sklopu radnog paketa WP3-TEST provedu preliminarna merenja na uzorcima od 3D štampanog polimera koje prikazujemo u ovom radu. Pojednostavnjeno je objašnjen princip DIC metode. Uzorak sa stohastičkim uzorkom nalazi se u prihvatit uređaja za opterećivanje (na primerima u ovom radu korišćena je elektromehanička kicalica Inspekt table 20kN nemačkog proizvođača Hegewald & Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH) i opterećuje se npr. konstantnim porastom napreznja ili deformacija. ARAMIS kontinuirano istovremeno snima stereo parove slika korišćenjem dve identične kamere. Početno stanje snimljeno je pre aplikacije sile na epruvetu. Usporedo sa snimanjem slika, korišćenjem Testing controllera digitalizuje se i signal iz doze za merenje sile - te se on kasnije može koristiti pri analizi, npr. za konstrukciju sigma-epsilon dijagrama kod testiranja mehaničkih svojstava materijala.



Primer rezultata merenja mehaničkih svojstava epruvete s GOM ARAMIS



## Plastics Knowledge Day 2019

Precizno optičko 3D merenje  
za kompletan proizvodni proces

Upoznajte optičke merne sisteme  
za različite faze proizvodnog procesa  
i povežite se sa stručnjacima kako bi  
prepoznali potencijale za optimizaciju  
vaše proizvodnje.



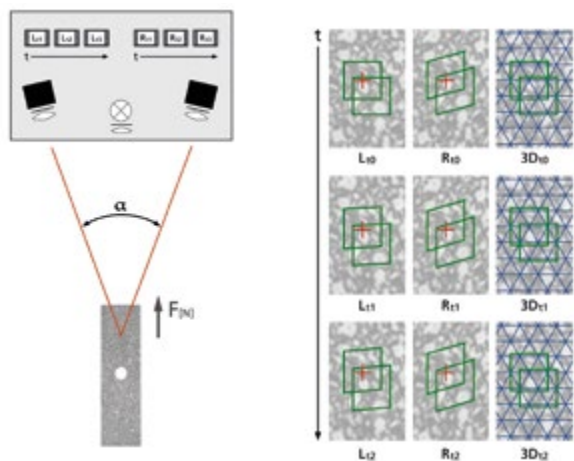
City 1 • Date 1 | City 2 • Date 2  
[www.gom.com/knowledge-day](http://www.gom.com/knowledge-day)



Nakon što su snimljeni svi parovi slika (npr. od neoptrećenog stanja do loma uzorka), snimci se obrađuju s digitalnim operatorima za korelaciju slike. DIC zahteva da se slika podeli na manje delove obično zvane „facete“ (korišćene su facete dimenzija ne većih od 25x25 piksela s 16 piksela preklopa) koje ARAMIS Professional programski paket automatski pronalazi u levoj i desnoj slici, te u svim ostalim slikama koje su redom snimljene u vremenu.

Kao rezultat merenja za svaki par snimaka (stereopar) i za svaku facetu izmeren je položaj centra facete, odnosno dobije se oblak tačaka koji opisuje trenutnu geometriju objekta koji se meri kao i kompletna vizualizacija stanja površinskih pomeranja i deformacija. Stohastički uzorak osigurava da se uvek tačno u vremenu zna koja je koja faceta odnosno tačka. Upoređivanjem stereoparova slika, odnosno njihovih rezultata, računaju se pomeranja u prostoru kao i površinske deformacije - što je takođe postupak koji se provodi automatski.

Software omogućava izradu sopstvenih formula za analizu rezultata, eksport rezultata u druge programske pakete (npr. Matlab) kao i uvoz rezultata numeričkih simulacija radi full-field poređenja radi verifikacije i kalibriranja numeričkih simulacija.



Princip DIC metode, šematski prikaz mernog sistema ARAMIS (levo), vizualizacija faceta u levoj (L) i desnoj (R) kameri te u vremenu t (desno)

## REZULTATI I DISKUSIJA

Struktura materijala proizvoda proizvedenih postupcima aditivnih tehnologija neretko nije izotropna i homogena, već zavisi od same tehnologije. Na primer, kod FDM postupaka koji ekstrudiraju plastičnu žicu svojstva se jako menjaju s obzirom na inicijalnu orijentaciju komada u radnom prostoru 3D štampača. Ovo dodatno komplikuje numeričke simulacije koje ionako pretpostavljaju da se provode na objektima poznate geometrije, poznatih mehaničkih svojstava i uz poznato opterećenje. Geometriju je moguće digitalizovati korišćenjem 3D skenera, a u TOPOMATIKA d.o.o. je korišćen GOM ATOS.

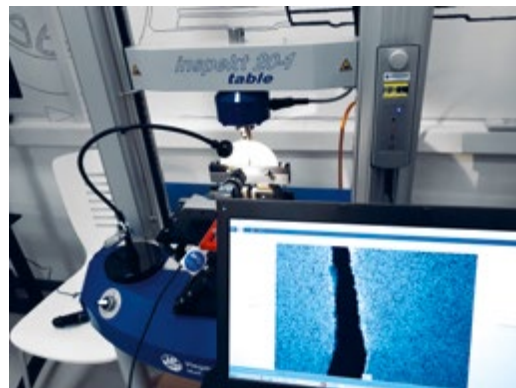
Da bismo verifikovali mogućnosti primene numeričkih simulacija na geometrijski komplikovanijim proizvodima koje nije tako jednostavno ispitati na konvencionalnim uređajima za opterećivanje, proveli smo i inicijalne testove kojima smo napravili poređenje numeričkih simulacija i optičkih merenja. Upoređivanje se provodi tako da se rezultati merenja i simulacija najpre poravnaju u istom koordinatnom sistemu te zatim upoređuju iste vrednosti, npr. poređenje rezultata pomeranja u Y smeru. Ovaj tip upoređivanja omogućuje jasnu vizualizaciju po celoj površini, gde se vidi da postoji razlika u rasporedu pomaka kao i da su razlike bile u rasponu od -0,12 do +0,08 mm, te je jasno vidljiva forma

razlike kao i mesta u kojima su razlike najveće. U idućim koracima optimizacije numeričkih simulacija moguće je promeniti tip/broj konačnih elemenata da bi se minimizirale ove razlike. Napominjemo da DIC otvara i zanimljivu funkcionalnost da se rezultati merenja pomeranja i deformacija iskoristite i u obrnutom smeru, tako da se preslikaju na mrežu konačnih elemenata i na temelju poznatih pomaka rekonstruišu mehanička svojstva promatranog objekta.

Da bi se istražio uticaj naprslina i njihova propagacija s obzirom na nagib naprsline i smer gradnje, u toku su ispitivanja na polukružnim diskovima (eng. Semi-circular bend), kod kojih je naprslina inicirana prilikom izrade uzorka. Primer nekoliko lomova za prvi mod pukotina prilikom pseudostatičkog opterećenja - s obzirom da se radi o pretežno dvodimenzionalnom efektu, merenja su provedena s jednom kamerom i velikim uvećanjem. U idućoj fazi planiraju se ista merenja provesti i na metalnim epruvetama.



Merenje propagacije naprsline kod testa savijanja u tri tačke



## ZAKLJUČAK

S obzirom na dosadašnja iskustva, odabrana DIC metoda pokazala se jednostavnom za korišćenje a rezultati koje daje pružaju detaljniji uvid u stvarno ponašanje konstrukcija, za razliku od dosadašnjih konvencionalnih mernih metoda korišćenjem mernih traka ili LVDT/ekstenzometara. Jedan od ciljeva projekta AMADAM je da proizvede bazu podataka koja se kasnije može iskoristiti od strane inženjerske zajednice. Odabir optičkih mernih metoda omogućuje da su rezultati merenja jasno razumljivi, dostupni i mogu se koristiti osim u jednu svrhu (npr. ispitivanje mehaničkih svojstava) i za verifikacije numeričkih simulacija i ispitivanje ponašanja gotovih komponenata komplikovane geometrije i opterećenja koje će se sigurno sve više i više koristiti u npr. potrošačkoj, medicini, auto i vazduhoplovnoj industriji. Baza podataka i besplatni programski paket GOM Correlate koji svakome omogućuje analizu rezultata merenja, omogućuje dodatne analize bez potrebe za ponavljanjem eksperimenata - što dodatno pojeftinjuje buduća istraživanja.

Informacije i prodaja: info@topomatika.rs  
Tel/fax: +385 1 3496 010  
Beljevačka 4, 11412 Jagnjilo, Beograd, Srbija

**TOPOMATIKA**

topomatika.rs