

» Primjena optičke DIC mjerne metode na projektu A_MADAM

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

Aditivne tehnologije sve više se koriste u izradi funkcionalnih proizvoda koji su tijekom eksploatacije podložni dinamičkim opterećenjima. Cilj projekta AMADAM je utvrditi pravila konstruiranja, tako da s obzirom na način proizvodnje proizvodi aditivnih tehnologija imaju optimalna dinamička svojstva.

Primijenili smo optičku mjernu metodu baziranu na digitalnoj korelaciji slike (DIC) za potrebe ispitivanja materijala, mjerenja pomaka i deformacija kod propagacije napuklina i verifikaciju i kalibraciju numeričkih simulacija. Eksperimente u prvoj fazi projekta provodimo na ispitnim tijelima od poliamida (PA) proizvedenim na SLS 3D printeru. Dosadašnja iskustva pokazala su, da se odabrana DIC metoda pokazala jednostavnom za korištenje, a rezultati koje daje pružaju detaljni uvid u stvarno ponašanje konstrukcija.

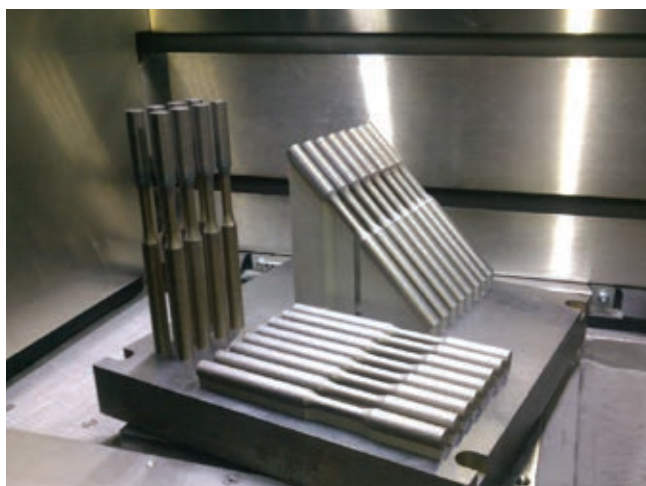
Posljednjih nekoliko godina, u okviru brzo razvijajućeg područja aditivne proizvodnje (Additive Manufacturing, AM), fokus se pomiče sa izrade prototipova na proizvodnju funkcionalnih dijelova i alata. Zahvaljujući specifičnom načelu izrade objekata sukcesivnim dodavanjem tankih slojeva materijala, aditivna proizvodnja omogućava izradu dijelova kompleksne geometrije, koje nije moguće izraditi konvencionalnim postupcima proizvodnje, čime se omogućavaju veća fleksibilnost u razvoju i proizvodnji, brži proces razvoja proizvoda, pojedinačna (personalizirana) proizvodnja i dr.

S druge strane, zbog relativno visokih troškova izrade, ograničenja u izboru vrste materijala i nepostojanja jasno definiranih

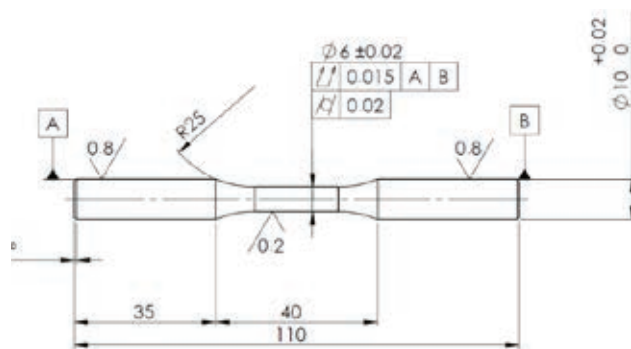
pravila projektiranja, AM tehnologija još uvijek ne nalazi masovnu primjenu u proizvodnji. Prepoznajući aditivnu proizvodnju kao tehnologiju koja posjeduje potencijal da regiji Europe omogući industrijsko liderstvo, posljednjih nekoliko godina Europska unija financijski podržava istraživačke projekte sa ciljem masovnije primjene aditivnih tehnologija u izradi funkcionalnih proizvoda, komponenti i alata.

Eksperimentalna procedura

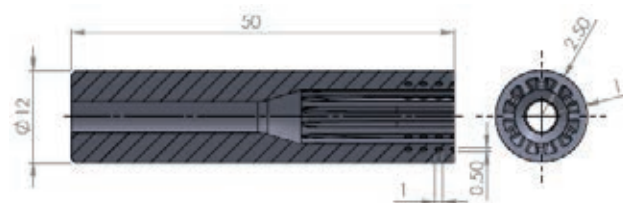
U skladu s planom istraživanja AMADAM projekta [1], u cilju ispitivanja dinamičkih karakteristika metalnih dijelova provoditi će se 45 eksperimenata kojima je obuhvaćeno 645 ispitnih tijela izrađenih od tri vrste čelika. Ispitivanjima će se odrediti dinamička izdržljivost standardnih epruveta (slika 1 i 2) podvrgnutih rotacijskom savijanju.



» Slika 1 Metal 3D print standardnih epruveta za ispitivanje dinamičke izdržljivosti



» Slika 2 Geometrija standardne epruvete za ispitivanje dinamičke izdržljivosti



» Slika 3 Ispitno tijelo konstruirano za potrebe ispitivanja dinamičke izdržljivosti metalnih dijelova izrađenih aditivnom proizvodnjom

Pored ispitnih tijela standardnog oblika, konstruirani su i posebna ispitna tijela (slika 3) za određivanje dinamičkih karakteristika metalnih dijelova proizvedenih primjenom aditivne tehnologije. Data ispitivanja će se provoditi kroz 10 eksperimenata, kojima će biti obuhvaćeno 93 ispitna tijela.



Prof. Snežana Čirić Kostić, dr. Jelena Janković Tomić
 - Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, Srbija • **dr. Tommaso Maria Brugo** - Fakultet u Bologni, Bologna, Italija • **dr. Nenad Drvar** - TOPOMATIKA, d. o. o., Zagreb, Hrvatska

Pored ispitivanja dinamičke izdržljivosti metalnih dijelova, za potrebe ispitivanja mehanike loma proizvedeno je 96 ispitnih tijela u skladu s tehničkim crtežom prikazanim na slici 4. Ispitivanje mehanike loma provodi se kroz 16 eksperimenata nad ispitnim tijelima od čelika i kompozita. Opisanim planom istraživanja predviđeno je najopsežnije istraživanje ikada provedeno u području aditivne proizvodnje, uzimajući u obzir kolekciju uzoraka, korištene materijale i vrste ispitivanja. S obzirom da se radi o istraživanju koje je krenulo 2017. godine i traje 4 godine, u sklopu ovog rada donosimo nekoliko primjera trenutačno dostupnih rezultata mjerenja na ispitnim tijelima od poliamida (PA) 3D printanih SLS tehnologijom.



» Slika 4 Ispitno tijelo za ispitivanje parametara mehanike loma

Za potrebe mjerenja mehaničkih svojstava, verifikaciju numeričkih simulacija i analizu propagacije napuklina za mehaniku loma, odabrana je moderna optička mjerna metoda bazirana na digitalnoj korelaciji slike (eng. DIC - Digital Image Correlation). Omogućuje dinamičko mjerenje prostornih pomaka i površinskog tenzora deformacija na površini ispitnog tijela, bez izravnog kontakta mjernog uređaja i mjernog objekta. Opterećenje ispitnog tijela može se provoditi na svim postojećim dostupnim uređajima (npr. elektrostatičke ili hidrauličke kidalice, preše, okviri za opterećenje i slično).

DIC metoda zahtijeva prethodnu pripremu ispitnih tijela nanošenjem stohastičkog rasterskog uzorka, koji mora biti tako izveden da se pomiče zajedno s osnovnim materijalom.

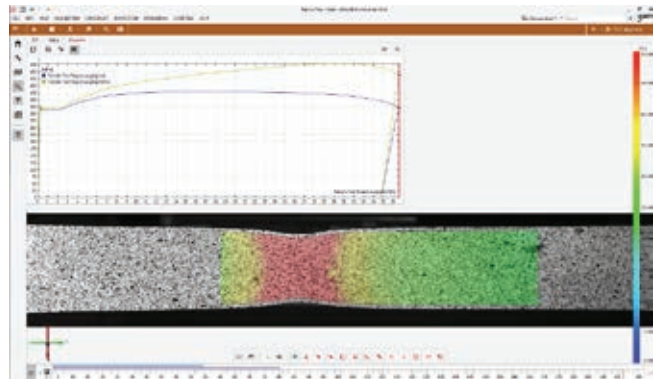
Brzina pripreme ispitnog tijela je znatno veća, nego kada se koriste tenzometrijske trake, jer nije potrebna posebna priprema površine i pažljivo lijepljenje mjernih traka, jer se svodi na sprejanje površine ispitnog tijela bijelim i crnim mat lakovima.

Partner na projektu TOPOMATIKA d.o.o. [2] raspolaže sa sustavom ARAMIS njemačkog proizvođača GOM GmbH [3] u nekoliko varijanti: ARAMIS 3D Camera 6Mpixel (slika 5) i ATOS Core 5Mpixel koji su korišteni da se u sklopu radnog paketa WP3-TEST provedu preliminarna mjerenja na ispitnim tijelima od 3D printanog polimera koje prikazujemo u ovom radu. Slika 7 pojednostavnjeno objašnjava načelo DIC metode. Ispitno tijelo sa stohastičkim uzorkom nalazi se u prihvatu uređaja za opterećivanje (na primjerima u ovom radu korištena je elektromehanička kidalica Inspekt table 20 kN njemačkog proizvođača Hegewald & Pesch-



» Slika 5 GOM ARAMIS sustav za mjerenje pomaka i deformacija korištenjem digitalne korelacije slike

ke Meß- und Prüftechnik GmbH) i opterećuje se npr. konstantnim prirastom napreznja ili deformacija. ARAMIS kontinuirano istovremeno snima stereo parove slika korištenjem dvije identične kamere. Početno stanje snimljeno je prije aplikacije sile na epruvetu. Usporedo sa snimanjem slika, korištenjem Testing controllera, digitalizira se i signal iz doze za mjerenje sile te se on kasnije može koristiti pri analizi, npr. za konstruiranje sigma-epsilon dijagrama kod testiranja mehaničkih svojstava materijala (slika 6).

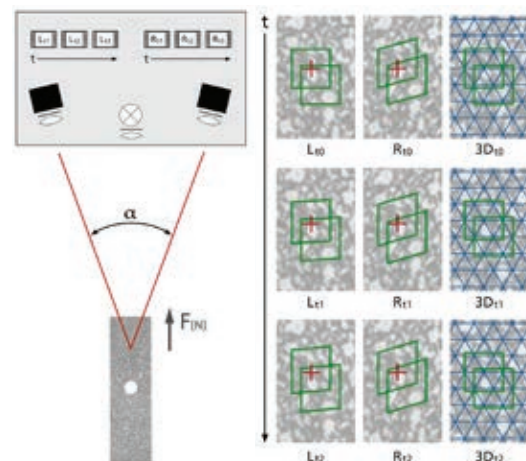


» Slika 6 Primjer rezultata mjerenja mehaničkih svojstava epruvete s GOM ARAMIS

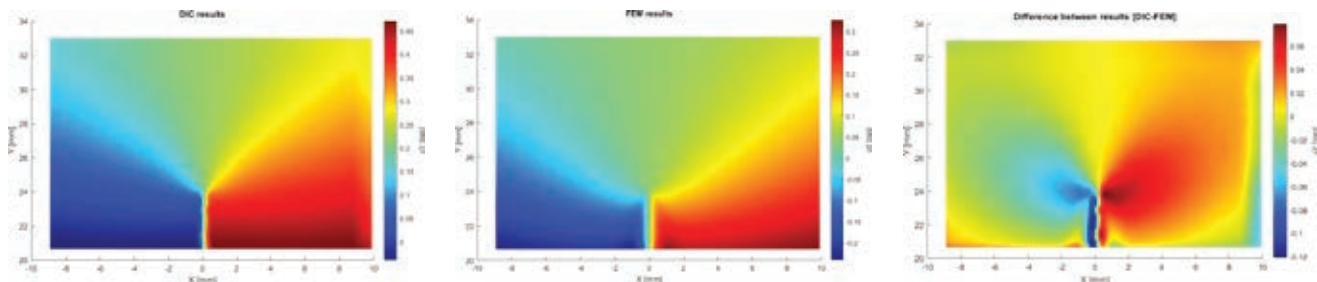
Nakon što su snimljeni svi parovi slika (npr. od neopterećenog stanja do loma epruvete) snimke se obrađuju s digitalnim operatorima za korelaciju slike. DIC zahtijeva da se slika podijeli na manje dijelove obično zvane „facete“ (korištene su facete dimenzija ne većih od 25x25 piksela sa 16 piksela preklopa) koje ARAMIS Professional programski paket automatski pronalazi u lijevoj i desnoj slici, te u svim ostalim slikama koje su slijedno snimljene u vremenu.

Kao rezultat mjerenja za svaki par snimaka (stereopar) i za svaku facetu, izmjeren je položaj centra facete, odnosno dobije se oblak točaka koji opisuje trenutačnu geometriju objekta koji se mjeri kao i kompletna vizualizacija stanja površinskih pomaka i deformacija (slika 5,6). Stohastički uzorak osigurava da se uvijek točno u vremenu zna koja je koja faceta odnosno točka. Usporedbom stereoparova slika, odnosno njihovih rezultata, računaju se pomicanja u prostoru kao i površinske deformacije, što je također postupak koji se provodi automatski.

Software omogućava izradu vlastitih formula za analizu rezultata, eksport rezultata u druge programske pakete (npr. Matlab) kao i



» Slika 7 Načelo DIC metode, shematski prikaz mjernog sustava ARAMIS (lijevo), vizualizacija faceta u lijevoj (L) i desnoj (R) kameri te u vremenu t (desno)

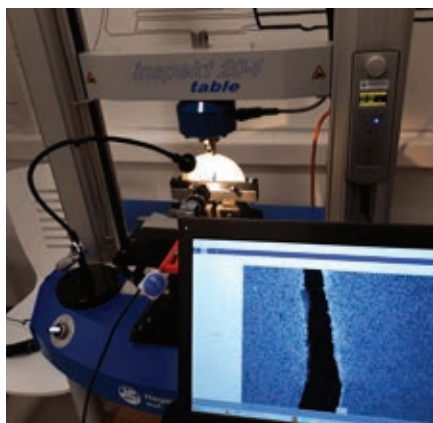


» Slika 8 Usporedba pomaka u Y smjeru izmjerenih s DIC optički i FEM simulacijom

uvoz rezultata numeričkih simulacija radi full-field usporedbe radi verifikacije i kalibriranja numeričkih simulacija.

Rezultati i rasprava

Kako bismo verificirali mogućnosti primjene numeričkih simulacija na geometrijski kompliciranijim proizvodima koje nije tako jednostavno ispitati na konvencionalnim uređajima za opterećivanje, proveli smo i inicijalne testove kojima smo napravili usporedbu numeričkih simulacija i optičkih mjerenja. Usporedba se provodi tako, da se rezultati mjerenja i simulacija najprije poravnaju u istom koordinatnom sustavu te zatim uspoređuju iste vrijednosti, npr. slika 8 prikazuje usporedbu rezultata pomicanja u Y smjeru. Ovaj tip usporedbe omogućuje jasnu vizualizaciju po cijeloj površini, što prikazuje slika 8, gdje 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 mjesta u kojima su razlike najveće. U idućim koracima optimiranja numeričkih simulacija, moguće je promijeniti tip/broj konačnih elemenata kako bi se minimirale ove razlike. Napominjemo da DIC otvara i zanimljivu funkcionalnost da se rezultate mjerenja pomaka i deformacija može iskoristiti i u obrnutom smjeru, tako da se preslikaju na mrežu konačnih elemenata i na temelju poznatih pomaka rekonstruiraju mehanička svojstva promatranog objekta.



» Slika 9 Mjerenje propagacije napukline kod testa savijanja u tri točke

Kako bi se istražio utjecaj napuklina i njihova propagacija s obzirom na nagib napukline i smjer gradnje, u tijeku su ispitivanja na polukružnim diskovima (eng. Semi-circular bend) [4,5,6] kod kojih je napuklina inicirana prilikom izrade ispitnog tijela. Primjer nekoliko lomova za prvi mod pukotina prilikom pseudostatičkog opterećenja pokazuje slika 9. S obzirom da se radi o pretežno dvodimenzionalnom efektu, mjerenja su provedena s jednom kamerom i velikim uvećanjem. U idućoj fazi planira se ista mjerenja provesti i na metalnim epruvetama.

Zaključak

S obzirom na dosadašnja iskustva, odabrana DIC metoda pokazala se jednostavnom za korištenje, a rezultati koje daje pružaju detaljniji uvid u stvarno ponašanje konstrukcija, za razliku od dosadašnjih konvencionalnih mjernih metoda korištenjem mjernih traka ili LVDT/ekstenzometara. Jedan od ciljeva projekta AMADAM je da proizvede bazu podataka koji se kasnije mogu korisno iskoristiti od strane inženjerske zajednice. Odabir optičkih mjernih metoda omogućuje da su rezultati mjerenja 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 komplicirane geometrije i opterećenja, koje će se sigurno sve više i više koristiti u npr. potrošačkoj, medicinskoj, auto i zrakoplovnoj industriji. Baza podataka i besplatni programski paket GOM Correlate, koji svakome omogućuje analizu rezultata mjerenja, omogućiti će dodatne analize bez potrebe za ponavljanjem eksperimenata što dodatno pojeftinjuje buduća istraživanja.

Zahvala

Članak je dio istraživanja, provedenih u okviru projekta >>Advanced design rules for optimal dynamic properties of additive manufacturing products - A_MADAM<<, koji je financiran od strane Europske unije u okviru istraživačkog i inovacijskog programa Horizon 2020, ugovor Marie Skłodowska-Curie br. 734455.

Literatura

- [1] www.mfkv.kg.ac.rs/a_madam/
- [2] www.TOPOMATIKA.hr
- [3] www.GOM.com
- [4] Brugo, T., Palazzetti, R., Čirić-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