

## Na pragu novog postupka 4D tiskanja

Prof.dr.sc. **Gojko Nikolić**  
Sveučilište u Zagrebu  
Tekstilno-tehnološki fakultet  
Zagreb, Hrvatska  
e-mail: gojko.nikolic@ttf.hr  
Prispjelo 12.6.2018.

UDK (677+687).66.09  
Pregled

*Postupak 4D tiskanja je nastavak evolucije 3D postupka aditivne proizvodnje kod koje otisnuti objekti mijenjaju svoj oblik tijekom vremena. Kod 3D tiskanja otisnuti objekt stalno zadržava isti, konačni oblik, dok kod 4D postupka otisnuti objekti, potaknuti vanjskim podražajem, mijenjaju svoj oblik i funkciju. Razvoj je usmjeren na osmišljavanje novih tzv. pametnih materijala ovisno o krajnjoj namjeni. Ti metamaterijali s novim svojstvima imali bi široke, gotovo neslućene mogućnosti, posebno u području medicine. Primjena je i u drugim područjima, od vojske, građevinarstva, odjeće, do proizvoda široke potrošnje.*

**Ključne riječi:** 3D tiskanje, 4D tiskanje, pametni materijali za tiskanje

### 1. Uvod

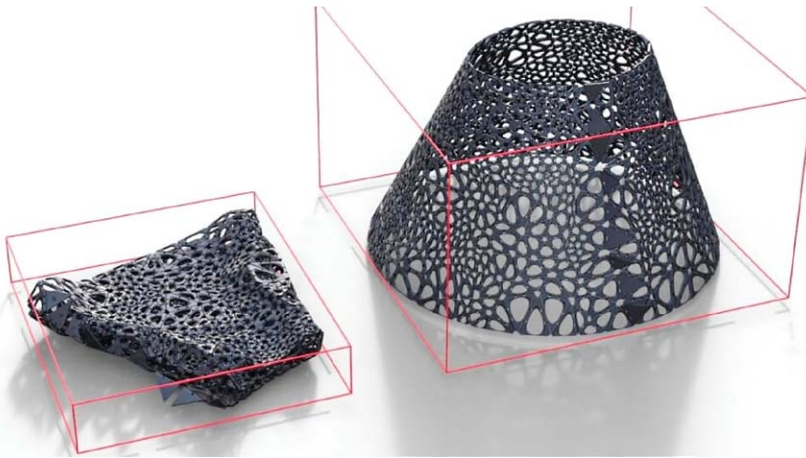
Nakon tridesetak godina od svog nastajanja tehnika 3D tiskanja postaje nezaobilazni proces rada ne samo u izradi prototipa i dijelova za održavanje, već i u postupcima proizvodnje različitih vrsta proizvoda. Prisutna je u gotovo svim područjima ljudske djelatnosti. Danas 3D pisači imaju više glava za tiskanje (multi-head) različitih materijala, a neki rade istodobno i s više mlaznica (multi-nozzle). Postoje mogućnosti proširenja linije 3D pisača s obradnim glavama za konačno oblikovanje proizvoda. Postupci 3D tiskanja već su zauzeli posebno važno mjesto u biomedicini. Najavljuju se skoro izrada umjetnih ljudskih organa. Sve više je prisutna i u tekstilnim dizajnerskim proizvodima, izradi namještaja, građevinarstvu, brodogradnji i drugim područjima rada. Posljednjih godina sve se više objavljuju članci o novom „revolucionar-

nom“ postupku – 4D tiskanja, kao nastavku razvoja 3D. Već se predviđa da će se do 2023. godine uložiti velika financijska sredstva u istraživanju tog postupka danas još daleko od komercijalne dostupnosti [1]. To novo, fascinantno područje otvara velike i nevjerovatne mogućnosti za nove proizvode i proizvodnju. Davaњem 3D tiskanim proizvodima još jedne dimenzije, kroz programabilnu funkciju materijala, može se promijeniti ne samo sam proizvod već i način proizvodnje. Utjecaj 4D ispisa mogao bi biti znatan, primjenjiv u gotovo svim područjima ljudske djelatnosti. Novost postupka 4D tiskanja nije toliko u procesu izrade, jer se koristi postojeći način rada 3D pisača nego u korištenim materijalima koji su sposobni preoblikovati se i samoizgraditi. To su programabilni i napredni “pametni materijali”, koji se oblikuju pod utjecajem određenog podražaja [2].

### 2. Što je to 4D tisak?

4D tiskanje je aditivna proizvodnja i predstavlja, kako je rečeno, evoluciju 3D ispisa objekata koji mogu nakon što su proizvedeni mijenjati svoj oblik tijekom vremena. Pojam četvrte dimenzije odnosi se na *vrijeme*. Tijekom vremena, pod utjecajem vanjskih podražaja ili poticaja (toplina, hladnoća, pokret, tlak, svjetlo, voda, magnetsko polje, određene vrste kemikalije i sl.), mijenja se izrađeni proizvod, oblikom ili funkcijom. Zato su za ovu tehniku rada najvažniji materijali koji se tiskaju. Autonomne promjene oblika imaju velike implikacije za budućnost projektiranja proizvoda [1, 3, 4].

Tijekom procesa 4D tiskanja dodaje se kôd koji sadrži upute o tome kako će se oblik pomicati ili mijenjati jednom kada ga pokrene podražaj. Ovaj korak preprogramiranja omogućuje stvaranje pametnih, osjetljivih obje-



Sl.1 Volumen tiskanog proizvoda je smanjen za 87 % u odnosu na onaj koji će kasnije poprimiti konačni oblik [4]

kata koji se mogu prilagoditi specifičnim čimbenicima okoline [1].

Da bi se to ostvarilo koriste se posebno razvijeni tzv. pametni materijali koji imaju jedno ili više svojstava koja se mogu promijeniti vanjskim „okidačima“. Ti materijali se intenzivno razvijaju [1]. Sposobnost promjene ili anizotropija (grč. *ἀνισο-*: nejednak) posebnih materijala nastaje na molekularnoj razini te se formiraju različite konfiguracije molekula materijala, a mogu se izazvati izvana. Mikromaterijali trebaju biti raspoređeni tako da postoji gotova usmjerenost prema završenom ispisu [5].

Za 4D tiskanje koristi se stereolitografija s ultraljubičastim svjetlom koje se najčešće koristi za očvršćenje slojevitih materijala nakon završetka procesa tiskanja [5].

Vanjski „okidači“ kojima se tiskani proizvodi mogu potaknuti da se razvijaju u unaprijed određene oblike su različiti i ovisni o konačnoj namjeni proizvoda [1].

Za 4D tiskanje bitna je mogućnost tiskanja više vrsta materijala 3D pisanim. To je omogućeno postupkom Binder Jetting koja koristi mlaz materijala i omogućava sigurno kontroliranje taloženja [1]. Binder Jetting je proces jedinstven po tome što ne koristi toplinu tijekom procesa izrade. Drugi aditivni postupci koriste izvor topline koji može stvoriti naprezanja u proizvodima. Brzine raspršivanja za Binder Jetting i dalje bitno nadma-

šuju ostale postupke. Binder Jetting je sličan tradicionalnom ispisu na papiru. Vezivo funkcionira kao tinta dok se kreće preko slojeva praha, koji poput papira, oblikuje konačni proizvod. Zbog svoje sposobnosti da proizvodi čvrste slojeve, Binder Jetting se često smatra najboljom opcijom za 3D ispisivanje. Može ispisivati različite vrste materijala [6].

4D ispis se ostvaruje tako da tijekom procesa 3D ispisa, stroj programski nanese slojevitou strukturu i dodaje precizan geometrijski kôd za stvaranje konačnog oblika proizvoda. Ovo

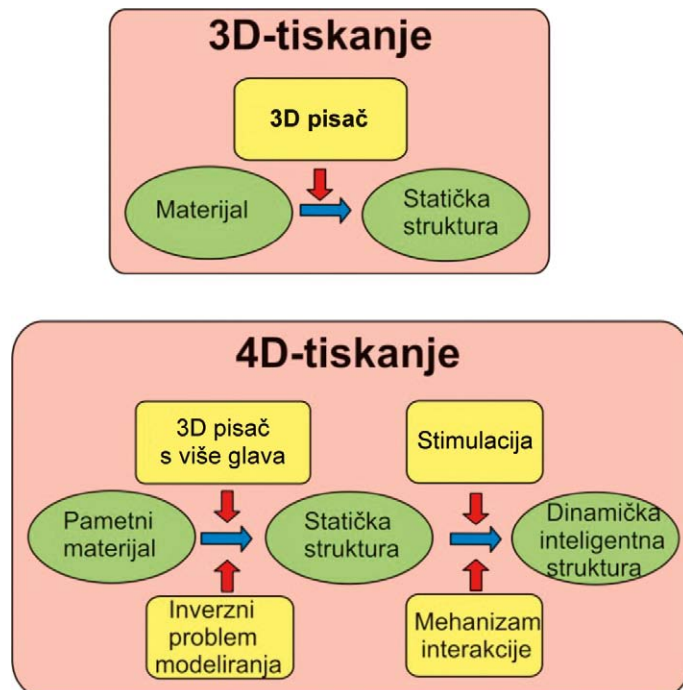
kodiranje se temelji na geometriji i dimenzijama oblika. Tiskani oblik „prisjeća“ se putem uputa komponentama na koji način ili kako se promijeniti kada se nađu u određenim uvjetima okoline kao što su primjerice voda, toplina i zvuk. Proces 4D tiska mijenja statički 3D oblik proizvoda u odgovarajući pametni objekt, koji poprima drugačiji oblik od onog tiskanog [7].

Jedna od prednosti 4D ispisa je da se mogu načiniti proizvodi čiji bi konačni oblik bio prevelik za pisac, jer nakon što je tiskan postiže svoju pravu veličinu, sl.1 [4, 7].

Na sl.2 prikazana je shema 3D i 4D tiskanja i razlika u procesu izrade proizvoda [4].

### 3. Materijali za 4D tiskanje

Za 4D ispis koriste se različiti specijalno razvijeni „pametni“ materijali, koji imaju jedno ili više svojstava koja se mogu aktivirati vanjskim okidačima [1]. Intenzivna su istraživanja i razvoj metamaterijala („meta“, znači „više“ ili „iznad“) - konstruiranih tako da imaju neuobičajena i nova svojstva koja se ne nalaze u prirodi. Projektiraju se materijali koji npr. po-



Sl.2 Dijagram usporedbe procesa 3D i 4D tiskanja (dorađen dijagram iz [4])

staju kruti kada oni udaraju, ali postanu mekani kao spužva kada trebaju apsorbirati udarac. Ranije su oblik i svojstva metamaterijala bili nepovratni nakon što su proizvedeni, ali sada se to mijenja, mijenjaju se uslijed nekog vanjskog utjecaja, a imaju i svojstva reverzibilnosti [8].

Navedena su neka od potencijalnih vrsta materijala za moguću primjenu u postupku 4D tiskanja.

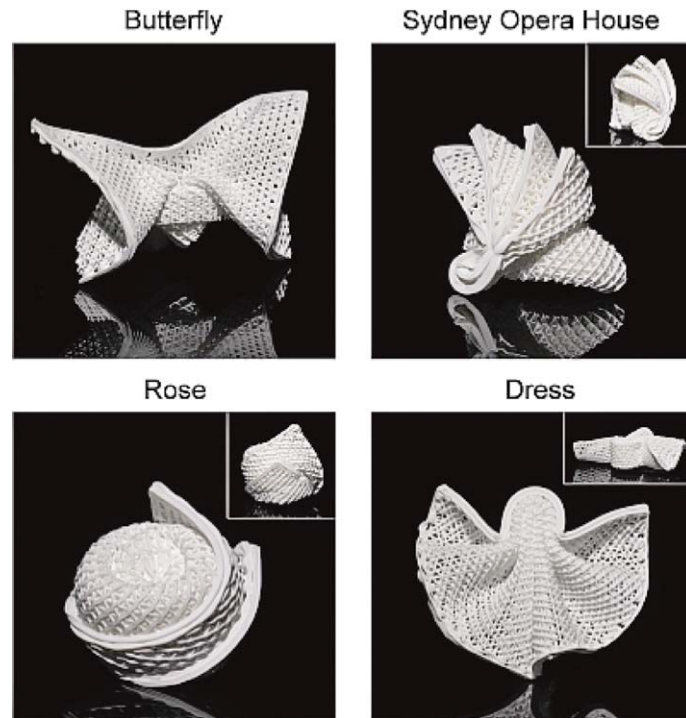
**Hidrogelovi** su hidrofilne mreže polimernih lanaca, odnosno trodimenzionalne rešetke polimera koje mogu zadržati vodu ili vodene otopine.

Postupkom 3D tiska, odnosno UV zračenjem se skrutnjaju, a programirani su da mijenjaju oblik pri promjeni temperature [1]. Koriste oba svojstva elemenata od kojih su sastavljeni - vrlo hidrofilnih i neaktivnih, krutih elemenata [5]. Hidrogelovi su biokompatibilni materijali i posebno pogodni za medicinsku primjenu [1].

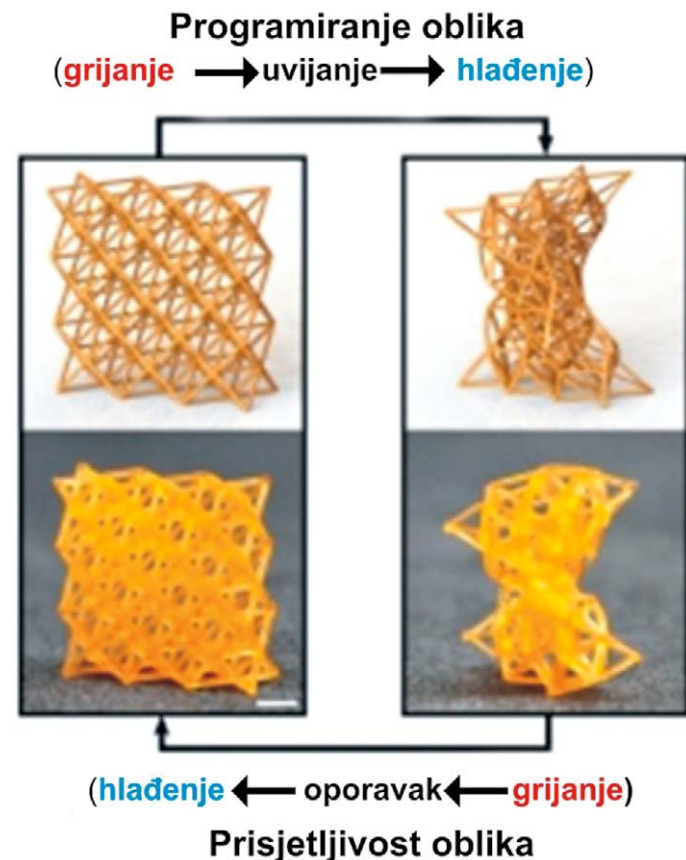
**Kompoziti celuloze** su materijali koji reagiraju na vlagu kao što su celulozni sterolni esteri (CSE) s različitim stupnjevima supstitucije (DS). Koriste se dvoslojni materijali s različitim DS-om. Jedan ester (CSE) ima stupanj supstitucije (DS) od 0,3 (vrlo hidrofilan - upija vodu), a drugi 3 (vrlo hidrofoban - odbija vodu). Kada se uzorak ohladi s 50 na 22 °C, a relativna vlažnost se povećala s 5,9 na 35 %, hidrofobna strana se steže (skuplja), a hidrofilna bubri odnosno širi. Takav kompozitni materijal se pritom preoblikuje, sklupčavana i sl. Proces je reverzibilan, vraćanjem temperature i vlažnosti na prethodne vrijednosti proizvod se ponovno vraća u prvobitno stanje [5].

**Prisjetljivi polimeri** su pametni materijali (SMP) koji imaju sposobnost preoblikovanja iz fiksnog privremenog oblika u izvorni oblik kada su izloženi vanjskom poticaju [1, 5].

**Prisjetljive legure** (SMA) su pametni metalni materijali, te slično SMP-ima, zadržavaju „sjećanje“ svog izvornog oblika i mogu se vratiti na taj oblik nakon deformacije djelovanjem vanjskog poticaja [1].



Sl.3 Oblikovanje vrlo složenih oblika 3D otisnut oblik (prekursor) s keramičkom tintom (Gradsko sveučilište Hong Kong) [1]



Sl.4 Promjena prostorne rešetkaste strukture u otpornu tenzegritsku strukturu (istraživanje inženjera sa Sveučilišta u Brunswicku objavljeno je u časopisu Materials Horizons) [9, 10]

**Keramičku tintu** razvio je istraživački tim sa Sveučilišta u Hong Kongu koja kombinira polimere i keramičke nanočestice [1]. Ona omogućuje mekoću i rastezljivost 3D tiskanih objekata te njihovo oblikovanje u vrlo složene oblike, sl.3. Mogu se rastegnuti na trostruku početnu dimenziju [1].

Proizveden je materijal čija se krutost može podesiti s više od 100 mogućnosti pri temperaturama između 23 i 90 °C, što omogućuje veliku kontrolu apsorpcije udara. Mogu privremeno poprimiti tenzegritsku (tensegrity, izraz nastao od *tensional* i *integrity*) strukturu otpornu na deformaciju, a zatim kada se zagriju, vratiti u izvorni oblik, sl.4 [8-10].

**Kapljeviti (liquid) kristalni elastomeri** (LCE) su meko-aktivni materijali koji mogu postići brze i reverzibilne promjene oblika. Svoje djelovanje ostvaruju kroz prijelaz molekularnih lanaca između uređenog stanja kapljevito kristala i izotropnog stanja, kao odgovor na vanjski poticaj koji je okidač [5].

**Električni i magnetski pametni materijali** mogu mijenjati svoju veličinu i oblik ovisno o intenzitetu i/ili smjeru vanjskog električnog polja. Radi se o materijalima polianilinu (*Polyaniline-PANI*) i polipirolu (PPy) koji se mogu stisnuti ili proširiti ovisno o električnom podražaju. Koriste se za kretanje robota davanjem električnog impulsa malog napona (3V).

Istraživanja uključuju i korištenje ugljikovih nano-cjevčica (CNT) koji imaju izuzetna mehanička i električna svojstva a ujedno su i biokompatibilne.

Razvijeni su gelovi osjetljivi na magnetsko polje, nazvani ferogelovi (ferrogels). Pomoću gradijenta magnetskog polja koje proizvodi elektromagnet utječe se na oblik cijevi od gela i mogućnost induciranja produženja i skupljanja. Pokazalo se da i koncentracija čestica magnetita i gustoća umrežavanja ferogela imaju bitnu ulogu u magneto-elastičnom ponašanju [5, 10].



Sl.5 Prototip programabilnog namještaja rezultat je razvoja MIT-a (Self-Assembly Lab), u suradnji s Wood-Skin S.r.l [1]

#### 4. Primjena 4D tiskanja

Ovaj novi postupak 4D tiskanja s pametnim materijalima već sada zaoкупlja maštu otvarajući cijeli novi svijet mogućnosti u području medicine, građevinarstva, strojarstva, avionske industrije, elektronike, robotike, vojne industrije i niz drugih. [2]

Najveća iščekivanja možda i najvažnije buduće područje primjene, biti će medicina. 4D tiskanje moglo bi se upotrijebiti od izrade pametnih biomedicinskih uređaja do izrade nanočestica i nanorobota za kemoterapiju [1]. 3D ispis već danas proizvodi ili izrađuje „rezervne“ dijelove za tijelo, od kralježaka, hrskavice uha i nosa, dijelova lica, raznih kostiju, vilice, kože, dušnika do krvnih žila. Razvija se u pravcu izrade funkcionalnih organa poput bubrega, srca i jetre. Sigurno na tom putu 4D tiskanje može odigrati važnu ulogu. Veliku će pomoć ostvariti kod samopodesivih implantanata koji će funkcionirati i bez vanjske intervencije [1]. Izrađeni stentovi 4D tiskanjem proširivati će se u krvnim žilama te propuštati veću količinu krvi ovisno o tjelesnoj temperaturi i naporima [2, 3].

Jednako tako trahealni stent - postavljen kako bi pacijentu omogućilo disanje - može se proizvesti s brtvom koja reagira na određenu količinu tlaka zraka i osigurava normalno disanje pacijenta. Ovim postupkom mogli bi se proizvesti ligamenti koljena koji mijenjaju položaj ili veličinu nakon promjene tjelesne temperature ili povećanog pritiska mišića nogu [11].

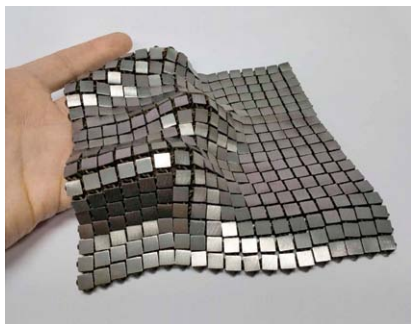
Istraživački tim Lijie Grace Zhang na Sveučilištu George Washington razvio je biokompatibilnu smolu, koja ima svojstvo da pospješuje rast mezenhimalnih matičnih stanica ljudske koštane srži (hMSCs), koja bi se mogla koristiti kod 4D (3D) tiska [5]. Istraživači na MIT-u razvili su tintu koja se može ispisati 3D pištalom, a kojom se mogu oblikovati senzori na magnetskim mikro-česticama, te s njima daljinski upravljati [1]. 4D postupci pomoći će kod stvaranja tableta za dijagnostiku probavnog sustava, koje će moći obaviti i medicinsku intervenciju (uzimanje uzoraka tkiva, snimanje, isporučivanje lijeka na točno određeno bolesno mjesto i sl.).

Budući proizvodi izrađeni 4D tiskanjem koristiti će se i kao svakodnevna roba poput samoslagajućeg namještaja kao što su stolice i stolovi, sl.5. Time bi se eliminira potreba za ručnim sastavljanjem dijelova [1].

Vojska bi koristila 4D tiskanje za objekte poput skloništa ili mostova koji se sami sastavljaju [1]. U građevinarstvu 4D opeke mogu mijenjati svoj oblik kako bi se prilagodile naprezanju u zidu. Ova sposobnost mogla bi imati važnu ulogu tijekom prirodnih katastrofa [3].

Na Tehnološkom institutu u Georgiji uspjeli su razviti strukturu tkanine nalik cvijetu s 3D tiskanim laticama, s mogućnošću prilagodbe konfiguracije u skladu s promjenama temperature [2].

U Španjolskoj je Raúl Pulido Casillas pomoću 4D ispisa razvio pametnu tkaninu za NASA, sl.6. Na strukturi od žičane mreže pričvršćeni su srebr-



Sl.6 Tekstilni materijal načinjen 4D postupkom [2]

ni dijelovi s programiranom toplinskom regulacijom. Uz oblik tiskana je i funkcionalnost njezinih materijala. Sposobna je reflektirati toplinu izvana i sačuvati je iznutra, što bi bilo prikladno za izradu svemirskih odijela ili oblaganje svemirskih brodova [2].

Kod izlaganja svjetlu adaptivna svojstva ovih materijala mogla bi mijenjati boje te prilagoditi svoju propusnost vlage iz okoliša. Daljnja istraživanja su u pravcu da materijali imaju sposobnost povećanja otpornosti na vanjske sile [2]. Za takva rješenja jako je zainteresirana vojska jer bi vojne uniforme mogle promijeniti kamuflažu ili bolje zaštititi vojnika od otrovnih plinova ili šrapnela [1].

Nedavno je Nervous System dizajn studio iz Massachusettsa razvio potpuno nosivu haljinu tiskanu u jednom komadu pomoću 4D tiska, sl.7 [12]. Daljnja razmišljanja su usmjerena na odjeću koja bi pri niskim temperaturama mogla automatski proizvesti dodatne slojeve ili majice čiji rukavi mogu rasti [7].

U obučenstvu cipele bi se mogle same prilagoditi stopalu. Jednako tako mijenjao bi se gazivi dio sukladno vrsti terena, mogu postati vodonepropusne ako počne padati kiša i sl. [13]. Proteze bi se savršeno mogle prilagodile anatomiji pacijenta kada se pokrene određeni stimulans [1].

Postoji namjera izraditi temperaturno prilagodljive fasade, a otvore na krovu izvesti da budu samoregulirajući s obzirom na vremenske uvjete. To bi imalo utjecaja na uštedu energije [5].



Sl.7 Potpuno nosiva haljina tiskana u jednom komadu pomoću 4D tiska [12]



Sl.8 Promjene promjera kod 4D tiskanih cijevi [13]

Cijevi za vodovod izrađene s 4D postupkom mogle bi dinamički mijenjati svoj promjer s obzirom na brzinu protoka i potrebu za vodom, sl.8 [13]. Predviđa se da bi se mogle i automatski popravljati ako puknu uslijed smrzavanja ili slijeganja terena [4, 7].

Ovo je samo mali broj potencijalnih primjena 4D tiskanja, a već ih je dovoljno da se uoče velike mogućnosti primjene [1].

## 5. Zaključak

Pred nama je nova skupina postupaka koja će donijeti mnogo važnih promjena, i u proizvodima i u postupcima njihove proizvodnje ili izrade. Njena prethodnica 3D tiskanje, tek što se započela primjenjivati

ostvarila je velike rezultate u svim područjima ljudske djelatnosti. Promijenila je način rada, dala neslućene mogućnosti koje se već uveliko koriste. Ona se i dalje razvija, povećava se broj glava za tisak različitih materijala, koje imaju više mlaznica tako da se proces znatno ubrzava. Cjelokupne proizvodne linije sada se sastoje od kombinacija aditivne proizvodnje 3D tiska i postupaka odvajanja čestica, te se dobiva gotov proizvod. Sada se kao dodatak tom intenzivnom razvoju dodaje nova dimenzija - pametni materijali koji unaprijed programirano mijenjaju svoj otisnuti oblik temeljem vanjskog „okidača“.

Pametni materijali koji su temelj 4D tiska, još su u fazi istraživanja i eks-

perimentiranja. Koliko će trajati njen put razvoja prije nego što postane komercijalno prihvatljiva za primjenu, nije moguće procijeniti, ali odvija se izuzetno brzo i neće proći mnogo vremena do njene komercijalizacije.

#### Literatura:

- [1] *What is 4D printing, Anyway?*, dostupno na <https://amfg.ai/2019/02/05/what-is-4d-printing/>
- [2] *From 3D to 4D printing*, dostupno na <https://www.imnovation-hub.com/science-and-technology/from-3d-to-4d-printing/>
- [3] *What is 4D printing technology?*, dostupno na <https://www.tektonikamag.com/index.php/2019/02/14/what-is-4d-printing-technology/>
- [4] Papageorgiou M.: *4D Printing: A technology coming from the future*, dostupno na <https://www.sculpteo.com/blog/2017/10/25/4d-printing-a-technology-coming-from-the-future/>, objavljeno 25. 10.2017.
- [5] *4D printing*, Wikipedia, dostupno na [https://en.wikipedia.org/wiki/4D\\_printing](https://en.wikipedia.org/wiki/4D_printing)
- [6] Ex One uses Binder Jetting technology to 3D print complex in industrial-grade materials, dostupno na <https://www.exone.com/en-US/resources/what-is-binder-jetting>, pristup 29.6.2019.
- [7] Deavall S.: *What is 4D Printing?*, dostupno na <https://www.tonergiant.co.uk/blog/2017/12/4d-printing/>
- [8] *4D printed materials can be stiff as wood or soft as sponge*, dostupno na <http://www.dpaonthenet.net/article/169068/4D-printed-materials-can-be-stiff-as-wood-or-soft-as-sponge.aspx>
- [9] *Teseegrity*, Wikipedia, dostupno na <https://en.m.wikipedia.org/wiki/Tensegrity>
- [10] Zrínyi M., Barsi L., Büki A.: *Ferrogel: a new magneto-controlled elastic medium*, časopis Polymer Gels and Networks, Volume 5, Issue 5, stranica 415-427, dostupno na <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966782297000105>, objavljeno 1997
- [11] Wilkins J.: *How 4D printing is impacting manufacturing*, dostupno na <http://www.dpaonthenet.net/article/171425/How-4D-printing-is-impacting-manufacturing.aspx>
- [12] Vrama A.: *What is 4D Printing and Its 4th Dimension?*, dostupno na <https://fossbytes.com/4d-printing-4th-dimension/>
- [13] Rieland R.: *Forget the 3D Printer: 4D Printing Could Change Everything*, dostupno na <https://www.smithsonianmag.com/innovation/Objects-That-Change-Shape-On-Their-Own-180951449/>

## SUMMARY

### At the threshold of a new 4D printing process

G. Nikolić

The 4D printing process is the continuation of the evolution of the 3D additive manufacturing process in which imprinted objects change shape over time. In 3D printing, the imprinted object keeps the same final shape, while in the 4D process, imprinted objects, stimulated by external stimuli, change their shape and function. The development focuses on designing new “smart” materials depending on the end use. These “metamaterials” with new features would have wide, almost unimagined possibilities, especially in the field of medicine. It is also used in other fields ranging from military, construction field, clothing to consumer goods.

Key words: 3D printing, 4D printing, smart printing materials

University of Zagreb

Faculty of Textile Technology

Zagreb, Croatia

e-mail: [gojko.nikolic@ttf.hr](mailto:gojko.nikolic@ttf.hr)

Received June 12, 2018

## An der Schwelle eines neuen 4D-Druckverfahrens

Das 4D-Druckverfahren ist die Fortsetzung der Entwicklung des additiven 3D-Fertigungsprozesses, bei dem bedruckte Objekte im Laufe der Zeit ihre Form ändern. Im 3D-Druck behält das bedruckte Objekt die gleiche endgültige Form bei, während im 4D-Prozess bedruckte Objekte, angeregt durch äußere Anreize, ihre Form und Funktion verändern. Die Entwicklung konzentriert sich auf das Entwerfen neuer “intelligenter” Materialien, was vom Endgebrauch abhängig ist. Diese ‘Metamaterialien’ mit neuen Eigenschaften hätten breite, fast ungeahnte Möglichkeiten, insbesondere auf dem Gebiet der Medizin. Es wird auch in anderen Bereichen verwendet, von Militär, Bauwesen, Kleidung bis hin zu Konsumgütern.