



Получена: 28.02.2017 г.

Приета: 02.05.2017 г.

## ОСНОВНИ ТЕХНОЛОГИЧНИ ПАРАМЕТРИ ПРИ 3D-ПЕЧАТА С КОМПОЗИТИ НА ЦИМЕНТОВА ОСНОВА

Ст. Иванова<sup>1</sup>, Р. Захариева<sup>2</sup>

*Ключови думи: 3D-печат, циментови композити, технологични параметри*

### РЕЗЮМЕ

Настоящата публикация отразява една част от работата, извършена през първата година на финансиране на научноизследователски проект на тема „Предизвикателства и решения при приложението на технологията на 3D-печата в строителството“, финансиран с договор БН 192/16 от ЦНИП при УАСГ. Дискутирано е влиянието на основните технологични параметри – форма и размер на дюзата, широчина и дебелина на полагащия пласт, скорост на движение на печатащата глава и др. върху качеството и скоростта на принтиране. Установено е, че съществува тясната обвързаност на технологичните параметри и свойствата на материала за печат – когато този материал е на циментова основа, от съществено значение е реологичното поведение на сместа, тиксотропията, началото и краят на свързване, якостните свойства в много ранна и ранна възраст. Очертани са насоките на бъдещите изследвания. Подчертана е необходимостта от симулиране на технологията на 3D-печата в полуиндустриални условия.

### 1. Въведение

Представените научни изследвания са извършени в рамките на първата година на работа по проекта „Предизвикателства и решения при приложението на технологията на 3D-печата в строителството“, финансиран с договор БН 192-16 с ЦНИП при УАСГ. Целите на проекта могат да бъдат формулирани в няколко направления:

<sup>1</sup> Стоянка Иванова, доц. д-р арх., кат. „Автоматизация на инженерния труд“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: solarina@mail.bg

<sup>2</sup> Румяна Захариева, доц. д-р инж., кат. „Строителни материали и изолации“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: roumiana.zaharieva@gmail.com

1) да се оцени потенциала за приложението на тази нова, за нашата строителна практика, технология в България;

2) да се разработи национално know-how по отношение на състава и свойствата на подходящите материали за печат, роботизираната технология на полагане, на геометрично 3D-моделиране, на конструктивно детайлиране и статико-динамичен анализ, с оглед осигуряване на съществените изисквания към строежите;

3) да създаде научни и организационни предпоставки за включване на ЦНИП при УАСГ в международни изследователски и приложни проекти, свързани с технологията на 3D-печата.

През първата година изследванията са насочени към разработване на концепция за 3D-печат и създаване на 3D-модел, към избор на технология за 3D-печат и към създаване на подходящ материал.

След анализ на световния опит по отношение на технологиите за 3D-печат в строителството, като перспективни за България се очертават класическата технология на изграждане на контури (Contour crafting, САЩ), принтирането на бетон, разработено в Loughborough University, Великобритания и технологията „Yingchuang“ на едноименната китайска компания, при която се принтират външен и вътрешен контур, който се запълва със зигзагообразна част. В последния случай изграждането на конструкцията става чрез сглобяване на големи сградни елементи, предварително изготвени посредством 3D-печат в заводски условия [1 – 5].

По отношение на използваните материали (полимери, глина, на циментова основа, на гипсова основа и др.), като най-приложим се оценява композитен състав на циментова основа – той дава възможност за изготвянето на носещи и/или самоносещи сградни елементи, за изпълнение на стоманобетонни конструкции и за приложение при различни условия на въздействие на околната среда [1, 6 – 11].

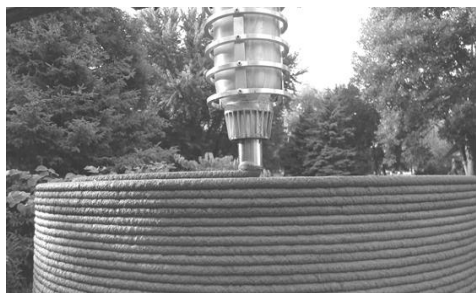
Основните свойства на създадения финозърнест композитен материал на циментова основа са представени в предишна публикация на членове на научния колектив [12].

## **2. Технологични параметри при моделирането на елементите**

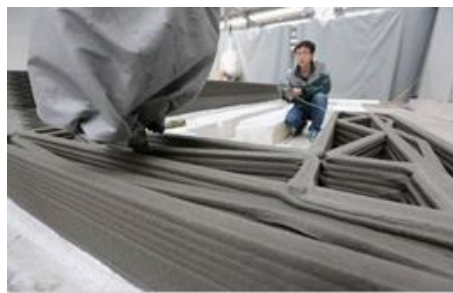
### **2.1. Форма на дюзата**

Възможните форми на дюзата на бетоновата глава са кръгла и правоъгълна, в частност – квадратна. При кръгла форма воденето е най-лесно, понеже ротацията (ориентацията) на дюзата в различните моменти от печатането е без значение. В този случай ръбовете на отпечатания степенен елемент са заоблени с радиус, равен на радиуса на дюзата. Неправилни по форма и криволинейни елементи (дъговидни, кръгли, под неправи ъгли) се изчертават с еднаква лекота. Това вероятно е причината един от пионерите на 3D-принтирането на сгради, арх. Андрей Руденко (САЩ), да избере кръгла дюза за своя 3D-принтер – вж. фиг. 1а.

При квадратна форма на дюзата задачата е малко по-сложна – трябва да се следи и управлява ориентацията на дюзата, така че винаги квадратът да е ориентиран под прав ъгъл според посоката на чертане. Това води до по-изявени прави ръбове на отпечатания степенен елемент. При неправилни по форма и криволинейни елементи от значение е съотношението на кривината на елемента и размерът на дюзата. При по-малки съотношения могат да се очакват несъвършенства на получения контур.



а)



б)

**Фиг. 1. Печат с различна форма на дюзата: а) кръгла дюза [2]; б) правоъгълна дюза [3]**

Добре очертани и правилни ръбове могат да се постигнат и при правоъгълна форма на дюзата, ако се печатат праволинейни сградни елементи. При тази форма на дюзата трябва да се управлява ориентацията на дюзата, като по-малкият ѝ размер трябва да е перпендикулярен на посоката на движение, а по-големият размер – да съвпада с посоката на движение. При криволинейни и неправилни по форма елементи, с по-малко съотношение между техния размер и размера на дюзата, могат да се очакват неточности, дори по-големи от тези при квадратна дюза.

Правоъгълна форма на бетонната дюза на печатащата глава е избрана от китайската фирма WinSun [3] – вж. фиг. 1б.

При лабораторните изследвания по създаване на композитния материал е използвана кръгла дюза с отвор от 9 mm – вж. фиг. 2а.



а)



б)

**Фиг. 2.**

- а) ръчно полагане на бетонната смес с помощта на силиконов ролче и дюза с отвор 9 mm;  
 б) запазване на целостта и формата на стената при полагане на 5 последователни пласта

## 2.2. Ширина на полагания пласт бетон

Широчината на полагания пласт бетон в хоризонтална посока е приблизително равна на размера на дюзата и зависи от няколко фактора, сред които са:

- размер и форма на дюзата: при еднакъв максимален отвор, широчината е по-голяма при правоъгълна и квадратна дюза, отколкото при кръгла;

- характеристики на бетонната смес – зърнометрия и реологично поведение: по-едрозърнестите смеси предполагат по-голяма широчина, смесите с по-голям вискозитет – също;
- желани характеристики на сградния елемент като носимоспособност за вертикални и хоризонтални товари, деформируемост и др.п.: колкото е по-широк полагащият пласт бетон, толкова по-силно сцепление ще има между два съседни по височина пласта и рискът от разрушение през връзката между пластове е по-малък;
- желани топлотехнически и звукоизолационни параметри на ограждащия елемент: по-широкият пласт предполага по-малка прецизност при изпълнение на контура и пълнежните елементи.

Очевидно, изборът на широчина е оптимизационна задача. При известните изпълнения на 3D печата на сградни елементи, широчината на пласта варира между 1 и 5 cm [1]. При лабораторното симулиране на 3D-печата (със силиконов пош и ръчна екструзия), широчината на полагащия пласт е от порядъка на 10 mm – вж. фиг. 2б.

### 2.3. Дебелина на полагащия пласт бетон

Дебелината на полагащия пласт бетон във вертикална посока зависи от няколко фактора:

- характеристики на бетонната смес и бетона – реологично поведение (напряжения на срязване, вискозитет), начало и край на свързване, време за запазване на консистенцията на сместа, якост на натиск в ранна и много ранна възраст и др.;
- необходима носимоспособност на елемента за поемане на вертикални и хоризонтални товари и др.

Могат да бъдат формулирани три времеви параметъра, които са свързани помежду си:

- T1, време преди полагане на следващ пласт, в което може да се осъществи необходимото сцепление между отделните пластове, без полагането на следващия пласт да доведе до извънредно деформиране на предходния;
- T2, време за обхождане на контура, което зависи от неговата дължина и скоростта на движение на печатащата бетонова глава;
- T3, време за престой (изчакване) между печата на два последователни пласта, което се определя както от технологични особености (например – пълнене на екструдера), така и от необходимостта да се достигне до определена много ранна якост на бетонната смес.

Очевидно е, че времето T1 трябва да е по-малко от сумата на T2 и T3, тъй като в противен случай (ако започне полагането на втори пласт, преди предният да е набрал достатъчна якост), можем да очакваме по-малко или по-голямо деформиране и загуба на желаната форма. От друга страна, прекалено голямото изчакване между полагането на два съседни по височина пласта ще доведе до по-малко сцепление между тях и носимоспособността на елемента може да бъде компрометирана. При проведените изпитвания в

лабораторни условия бе установено, че адхезията на 14-дневна възраст е около 2,5 МПа при полагане на следващия пласт в рамките на 10 минути и се понижава до 1,5 МПа, когато полагането на следващия слой е след 20 минути. Якостните характеристики в много ранна възраст са предмет на продължаващи изследвания.

Дължината на контура зависи от сложността на сградния елемент. Ако той е с опростена форма и малки размери, можем да считаме, че тази дължина ще е малка. В такива случаи вероятно е по-удачно да се печатат едновременно няколко елемента, за да се синхронизира времето на печат, без да има голям престой (време Т3).

Ако се печата наведнъж не отделен сграден елемент, а фрагмент/секция от сграда, дължината на контура ще е по-голяма, а оттам и необходимото време Т2.

В разработения от Winsun 3D-принтер за сградни елементи тази дебелина на пласта е около 1,5 cm. Приблизително същата е и при 3D-принтера на Андрей Руденко [2]. Технологията на компанията „Total Kustom“ – САЩ – предполага малки дебелини на слоевете (5 mm), но се постига високо качество на конструкцията и въпреки че се изисква повече време, се счита, че тази технология е по-ефективна по отношение на ВиК инсталации, изолации и електрическо окабеляване [1].

## 2.4. Постъпателна скорост на движение на печатащата бетонова глава

За определяне на оптималната скорост на движение на главата са нужни натурни експерименти. Тази скорост зависи от характеристиките на бетона и дизайна на печатащата бетонова глава. Прекалено ниската скорост води до слаба производителност, а прекалено високата скорост ще е свързана с по-лошо качество на отпечатване – например, по ръбовете на елементите се наблюдава нежелан ефект на „замятане” на материала – вж. фиг. 3.



Фиг. 3. Дефекти при изпълнението на 3D-печат на бетон

За да се избегне този дефект, е желателно намаляване на скоростта на движение в близост до ръбове и ъгли, където се променя посоката на чертане. От друга страна, в праволинейните участъци може да се поддържа по-висока от средната скорост.

Хоризонталната скорост на постъпателното движение на печатащата глава  $V_m$  [m/s] е свързана със скоростта на изтичане на бетонната смес от дюзата  $V_c$  [m<sup>3</sup>/s], както и с желаната площ на сечението  $S$  [m<sup>2</sup>] на полагания пласт във вертикална посока,

площта на дюзата  $A$  [ $m^2$ ] в хоризонтална посока и линейната скорост на изтичане на бетона  $V_l$  [ $m/s$ ] със следната формула:

$$V_c = V_m S = V_l A, \quad (1)$$

където  $V_m S$  е полаганият обем бетонна смес за единица време, а  $V_c = V_l A$  е обемът на изтичащата смес от дюзата за единица време, като очевидно тези стойности трябва да са равни.

Следователно, значителната промяна в хоризонталната скорост на движение около ъгли и ръбове трябва да бъде съобразена и с останалите участващи компоненти в посочената формула, като може да се наложи някои от тях също да претърпят промяна.

Площта  $S$  на вертикалното сечение на полагания пласт представлява произведение от диаметъра  $D$  на дюзата и височината на пласта  $h$  [ $m$ ], които би следвало да са константни и да не се променят.

Площта  $A$  на дюзата в хоризонтална посока се изчислява по формулата  $\pi D^2/4$  при кръгла дюза и е също константа.

От равенството

$$V_c = V_m D h = V_l \pi D^2 / 4 \quad (2)$$

произлиза следната формула за определяне на скоростта на хоризонтално движение на печатащата глава  $V_m$ :

$$V_m = \frac{V_l \pi D}{4 h}. \quad (3)$$

Понеже в (3) участват параметрите  $D$  и  $h$ , които са константни по време на печат, промяната на  $V_m$  е свързана с промяна на  $V_l$ , която може да се контролира с увеличаване или намаляване на площта на сечението на тръбата, подаваща бетона към дюзата.

Досегашните решения на китайската фирма WinSun [3] и на американската Total Kustom на Андрей Руденко [2] се базират на равномерно движение на печатащата глава. Първите са избрали по-висока скорост на движение с цел постигане на по-висока производителност, но това се отразява на качеството на отпечатаните повърхности в зоните, в които се променят ускорението и скоростта – фиг. 3. От друга страна, принтерът на Руденко поддържа по-ниска постъпателна скорост, при която се получава по-качествена повърхност в проблемните зони, но пък от друга страна технологията е подходяща за обекти, където производителността няма да е най-важната характеристика.

Независимо от конкретната стойност на израза  $(\pi D)/(4 h)$ , линейната скорост  $V_m$  на постъпателното движение на печатащата глава е пропорционална на скоростта  $V_l$ , с която трябва да се подава бетонната смес през дюзата.

### 3. Заключение и насоки за бъдещи изследвания

Зависимостта на технологичните параметри от свойствата на материала, както и обратно, е много по-изразена при технологията на 3D-печата, отколкото при традиционните технологии за полагане на бетон. Като определящи технологични параметри се очертават видът и размерът на дюзата на екструдера, скоростта на движение на принтиращата глава и размерите (дебелина и широчина) на слоя. Анализът показва, че носещата способност в началото се подобрява с увеличаване на скоростта на принтиране

поради уякчаване на връзките между слоевете. Твърде високите скорости обаче оказват негативно влияние и носещата способност намалява. Високата скорост води до дефекти при криволинейни елементи и/или при смяна на посоката на печата. По-малка дебелина на слоя обуславя по-добра прецизност, но пък увеличава значително общото време за строителство.

Проведените досега изследвания доведоха до създаването на финозърнест циментов композит, подходящ за 3D-печат. По-нататъшните усилия на колектива са насочени към замяната на някои от използваните досега материали с други, които са по-евтини и/или по-ресурсо-ефективни (например произведени от рециклирани отпадъци).

Тъй като съставът на материала влияе изключително много върху възможностите на (и ограниченията за) 3D-печата, се предвижда моделиране на технологичните параметри в лабораторни условия, така че да се оптимизират едновременно съставът на материала и технологията на 3D-печата. След това е предвидено провеждане на експерименти в полупроизводствени условия, с помощта на индустриален робот и специално конструиран за целта екструдер, което ще даде възможност за допълнително уточняване на параметрите и максимална приложимост на резултатите в строителната практика.

Другите предизвикателства пред 3D-печата на сгради са свързани с моделирането и роботизираното изпълнение – ще бъдат анализирани системите, подходящи за генериране на модели, които да бъдат отпечатани чрез 3D-печат. За оценката на цялостната приложимост на 3D-печата, се предвижда разработване на проект (включително статико-динамично изследване и оразмеряване) на моделна сграда и/или съоръжение. За очертаване на най-перспективните в български условия възможности на 3D-печата – за изготвяне цели сгради или за отделни техни елементи, ще бъде изготвен SWOT анализ с отчитане на всички аспекти (технологична осъществимост, ресурсна и енергийна ефективност, оценка на жизнения цикъл с оглед на въздействията върху компонентите на околната среда, икономическата целесъобразност и др.) на устойчивото развитие.

## Благодарности

Авторите изказват благодарност на ЦНИП при УАСГ за финансиране на проекта „Предизвикателства и решения при приложението на технологията на 3D-печата в строителството“ (Договор БН 192/16), както и на партньора по проекта – „Смарт Фаб Лаб“ ООД.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Wolfs, R. J. M.* 3D printing of concrete structures. Graduation Thesis, Report A-2015.85, Eindhoven University of Technology, 2015.
2. <http://www.3ders.org/articles/20150129-andrey-rudenko-plans-to-3d-print-a-full-sized-fantasy-style-concrete-village.html>, последно посетен на 28.02.2017 г.
3. <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>, последно посетен на 28.02.2017 г.
4. <http://www.curbed.com/2016/6/28/12053256/3d-printer-concrete-construction-netherlands>, последно посетен на 10.08.2016 г.
5. <http://www.lboro.ac.uk/news-events/news/2014/november/204-skanska.html>, последно посетен на 10.08.2016 г.

6. Le T. T. et al, Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. // *Materials and Structures*, Volume 45, Issue 8, pp. 1221-1232, 2012.

7. Perrot A., Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. // *Materials and Structures*, Volume 49, Issue 4, pp. 1213–1220, 2016.

8. Le T. T. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. // *Cement and concrete research*, Volume 42, Issue 3, pp. 501-582, 2012.

9. [www.dinitech.it](http://www.dinitech.it), последно посетен на 20.01.2017 г.

10. [www.emergingobjects.com](http://www.emergingobjects.com), последно посетен на 20.01.2017 г.

11. <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/3d-printed-bridge/>, последно посетен на 20.01.2017 г.

12. *Захариева, Р., Бошнаков, Д.* Предизвикателства пред създаването на материал за приложение на технологията на 3D-печата в строителството. Сб. докл. Межд. научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения – 2016“, 09.2016 г., Варна.

## MAIN TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF 3D-PRINTING WITH CEMENTITIOUS COMPOSITES

St. Ivanova<sup>1</sup>, R. Zaharieva<sup>2</sup>

*Keywords: 3D-print, cementitious composites, technological parameters*

### ABSTRACT

The present paper reflects one part of the work performed during the first year of research on the project entitled “Challenges and solutions for the application of 3D-print technology in construction”, funded under contract ref. Nr BN 192/16 with the R&D centre at UACEG. The influence of the main technological parameters, such as shape and size of the nozzle, width and thickness of printed layer, speed of printhead, etc., on the quality and the rate of printing are discussed. It has been established that there is a close relationship between those technological parameters and the material’s properties – when this material is cement-based, of significant importance are the rheological and thixotropic behavior of the fresh mix, initial and final setting time, as well as the strength at very early and early age. Future research directions are presented. The necessity of 3D-printing simulation in semi-industrial conditions is outlined.

---

<sup>1</sup> Stoyanka Ivanova, Assoc. Prof. Dr. Arch., Dept. “Computer-Aided Engineering”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: solarina@mail.bg

<sup>2</sup> Roumiana Zaharieva, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Building Materials and Insulations”, UACEG, 1 H. Smirnenki Blvd., Sofia 1046, e-mail: roumiana.zaharieva@gmail.com