



Получена: 03.01.2023 г.

Приета: 23.02.2023 г.

ТЕХНОЛОГИЯ ЗА ИЗПЪЛНЕНИЕ НА ЕЛЕМЕНТИ С НЕСТАНДАРТНА ФОРМА

Евг. Богданова¹

Ключови думи: кофраж, технология на изпълнение, роботизирано производство, 3D принтиране, поръчков бетон, цифровизиран бетон, армиране

РЕЗЮМЕ

Тази статия описва иновативни технологии за изпълнение на елементи с нестандартна форма. Разглежда варианти за монтаж на армировка и полагане на бетонната смес. Направени са сравнения и изводи за приложимостта на разглежданите методи в България.

1. Въведение

Използването на различни технологии за изпълнение на бетонни и стоманобетонни елементи се развива. Разработките са насочени към все по-иновативни начини с цел постигане на съвършени резултати във формообразуването при въздействащите архитектурни решения.

Насоките на развитие са към прецизиране на състава и консистенцията на бетонната смес, скоростта на полагане на бетонната смес, към стриктно следене на крайния резултат по отношение на качеството на готовата повърхност, към съкращаване на срока на изпълнение и към екологично изпълнение.

¹ Евгения Богданова, гл. ас. д-р инж., кат. „Технология и механизация на строителството“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: evg_bogdanova@abv.bg

2. Формообразуване в зависимост от начина на изпълнение

Формообразуването е важен момент при изпълнение на монолитните елементи.

Съгласно конвенционалните методи за изпълнението на стоманобетонните носещи и декоративни елементи е необходимо да бъде изготвена кофражна форма, в която да бъде положена и уплътнена бетонната смес.

Ако разгледаме монолитни елементи с нестандартна форма, ще видим, че формообразуването може да бъде по един от следните начини [1]:

- Монолитно изпълнение.
- Послойно, поетапно изпълнение.
- Двумерно изпълнение.
- Тримерно изпълнение.

В зависимост от формата на образуване може да бъде направена следната класификация:

- Монолит.
- Линейна структура.
- Плоскостна структура.
- Обемна структура.

Иновативният метод, който се прилага при изпълнение на елементи с нестандартна форма, е 3D принтирането. То представлява послойно, поетапно изпълнение при формообразуване, което създава обемна структура, използвайки цифровизирана база данни, с предварително уточнени критерии за изпълнение.

Този метод може да бъде използван при прякото изпълнение на самия бетонен елемент, при направата на кофражна форма за монолитни елементи, както и за едновременно изпълнение на двете. Методът се характеризира с бързина и прецизност.

3. Технологични средства и методи за изпълнение на елементи с нестандартна форма

Различни научни, университетски и корпоративни организации в света разработват нови начини за изпълнение на бетонни и стоманобетонни елементи с нестандартна форма.

3.1. Роботи манипулатори [2]

Този метод представлява дигитализирано и роботизирано оптимизиране на формата на кофража, която представлява мембрана със специфични свойства, след което механизирано или ръчно се полага бетонна смес. Използват се 6-осни роботи, които могат да създадат всяка зададена форма. В допълнение, мембраната за кофраж е изключително еластична и може да пресъздаде различни варианти на формообразуване. Степента на разтягане (и въртене) води до поредица от променливи резултати (тела) между фиксирани крайни точки (точките на захват). По този начин тази система създава не само точно позиционирани геометрии, но също така позволява различни вариации, текстура и

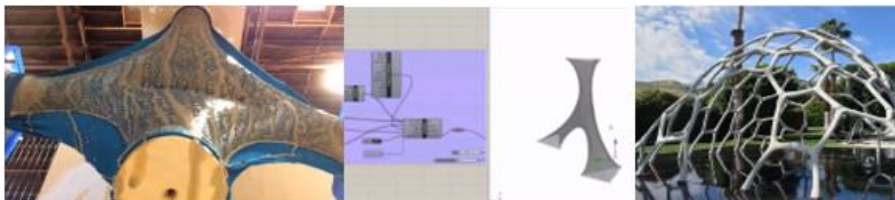
естествена непредсказуемост, продиктувана от свободното движение на точките на захват. Методът е представен през 2016 г. [2].

Предимствата на метода:

- Възможност за изпълнение на уникални по своята форма бетонни елементи.
- Относително ниски производствени разходи.

Недостатъци:

- Невъзможност за изпълнение на монолитни конструкции.
- Невъзможност за армиране.
- Производство основно на декоративни елементи.
- Липса на комплексно механизизирано изпълнение.



Фиг. 1. Роботи манипулатори [3]

3.2. Адаптивна кофражна система [4]

Адаптивната кофражна система дава възможност да се изпълняват черупкови елементи с произволна кривина.

Първоначално с помощта на софтуер се анализира и оптимизира всяка форма на елемента. С помощта на електрически стъпкови двигатели металните цилиндри на адаптивната форма се моделират, като всеки елемент заема необходимата позиция. Двигателите се управляват софтуерно. Цилиндрите в горния си край завършват с магнити, на които се закрепва силиконова феромагнитна композитна мембрана. Тя е с дебелина 18 mm и поема натоварванията. Върху мембраната вакуумно се закрепва тънък силиконов слой, който има защитна функция и оформя видимата повърхност на бетонния елемент.

Адаптивната система може да се използва за монолитни и сглобяеми елементи [5].



Фиг. 2. Адаптивна кофражна система [5]

Предимства:

- Една кофражна форма може да бъде използвана многократно.
- Гъвкава и бърза промяна в геометрията на кофража.

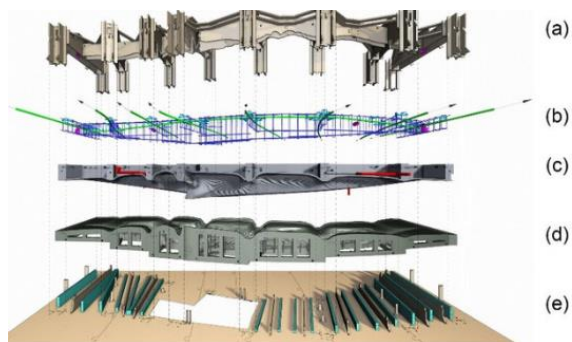
Недостатъци:

- Необходимост от специализиран транспорт при преместване на кофражната форма.
- Голямо собствено тегло на кофражната форма.
- Единично или двойно извити повърхности.

3.3. The smart slab [6]

Подобно на адаптивната кофражна система, при този метод се използват дигитални продукти за оптимизиране на формата. Разликата е в това, че софтуерът е разработен с цел да се оптимизира дебелината на елемента, а в същото време той да поема необходимото натоварване. Крайната цел е да се намали собственото тегло на плочата.

Системата се състои от лазерно изрязан кофраж за опорни ребра (а), армировъчни пръти и въжета за армиране на елемента (b), бетонни сегменти (c), 3D принтиран кофраж (d) и дървена основа с дистанционери (e), вж. фиг. 3.



Фиг. 3. Елементи на кофража при The smart slab [6]

Кофражът е с дебелина 20 mm, като носимоспособността му се увеличава от допълнителната система от усилващи ребра с дълбочина 70 mm и дебелина 20 mm, разположени приблизително в квадратна мрежа от 250 mm.

Повърхността на кофража поради порестата си структура е необходимо да се запечата с полимер и обмаже с кофражно масло.

Предимства:

- Оптимизирано собствено тегло на изготвения бетонен елемент.
- Изготвяне в производствени условия.

Недостатъци:

- Индивидуален кофраж.
- Многокомпонентност на кофража.

3.4. Eggshell formwork [7]

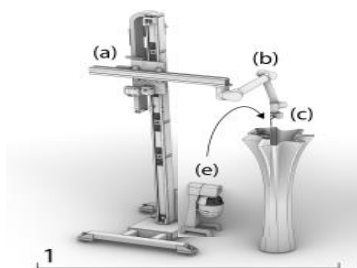
Разработена от Швейцарския федерален технологичен институт през 2019 г.

Кофражната форма представлява принтиран модел тип черупка от полимер с приблизителна дебелина 2 mm, произведена от 3D принтиращ модем, прикачен за

роботизирана ръка. Армировката е изчислена с помощта на специализиран софтуер. Бетонната смес е бързовтвърдяваща. Разглеждат се два варианта на изпълнение.

3.1.1. Вариант 1: вж. фиг. 4 – едновременно протичане на процесите

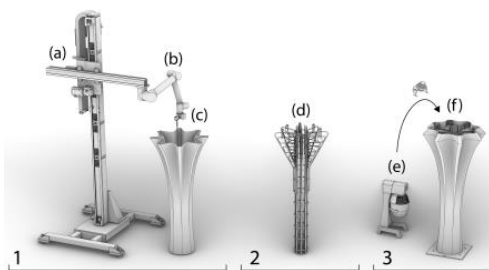
- 3D принтиране на кофражната форма и едновременно бетониране – а) вертикална линейна ос, б) шестосна роботизирана ръка, с) екструдер, е) бетоносмесител.
- Декофриране.



Фиг. 4. Вариант 1 на изпълнение на Eggshell formwork [7]

3.1.2. Вариант 2: вж. фиг. 5 – последователно протичане на процесите

- 3D принтиране на кофражната форма – а) вертикална линейна ос, б) шестосна роботизирана ръка, с) екструдер.
- Армиране – d) армировъчен скелет.
- Бетониране – е) бетоносмесител, f) кофражна форма.
- Декофриране.



Фиг. 5. Вариант 2 на изпълнение на Eggshell formwork [7]

Декофриране на Eggshell formwork е чрез нагряване. Следва измиване на материала, смилането му, след което, той се претопява в полимер за повторна употреба.

Като предимства на тази технология могат да се посочат:

- Свободна геометрична форма.
- Напълно преработваем материал; един и същи кофраж може лесно да бъде рециклиран и пригоден към всякакви елементи за неограничен брой пъти.
- Процесът по изготвяне на кофража е изцяло автоматизиран, отстранена е възможността от човешка грешка при изготвяне на елемента.

- Елементите могат да бъдат изпълнени на място с машинна прецизност в позиционирането.

Недостатъци:

- Индивидуални кофражни форми.
- Висока цена на първоначалната инвестиция – необходими са няколко машини за пълен цикъл.

4. Приложимост на разглежданите технологични средства и методи в България

След анализ на разглежданите системи може да бъде направено следното обобщение:

- Всички технологични решения изискват индивидуално разработен специализиран софтуер, който да управлява формообразуването на кофража, на самия елемент или на двете. Разработката или закупуването на такъв е въпрос на инвестиция.
- Изискванията за специфично оборудване и системи, които трябва да бъдат разработени и подsigурени, ограничават приложимостта, тъй като много от тях са на етап проучване и не са достъпни за пазарния сегмент.
- Специфичните материали, които се използват при този вид технологии, тяхното многообразие изискват адаптиране и въвеждане в нормативните документи.
- На този етап липсват разработени технологични карти и схеми, които да дефинират начина на изпълнение, което представлява сериозен проблем при прилагането на разглежданите технологични средства и методи за изпълнение на елементи с нестандартна форма в нашата страна.
- Предвид това, че тези технологии предлагат производството на бетонни елементи, които да са част от сглобяеми конструкции, можем да твърдим, че в България има достатъчно производствени предприятия, които да могат да бъдат преоборудвани и да покрият пазарните нужди в случай, че изброените по-горе проблеми бъдат решени. В този случай приложимостта на разглежданите технологични средства и методи в България, на етапа на разработка, в който се намират, биха се използвали успешно за направата на декоративни или ограждащи бетонни елементи.

5. Заключение

С достигнатото ниво на съвременните възможности могат да се постигнат по-адаптивни технологии, от които се нуждае строителството. Оптимизацията на процесите, иновацията в механизацията може да доведе до създаването на елементи с по-динамична форма, които да са част от конструктивните елементи.

Разглежданите методи в статията дават насоки за развитието в тази област и разглеждат постиженията, свързани с използване на 3D технология и цифровизацията в изпълнението, както и приложимостта им в България.

Остават много нерешени въпроси относно повишаване на производителността, намаляване на разходите, изясняване на рецептурния състав на бетонните смеси, определяне на материалите за кофражните форми, комплексно механизирание на процесите, внедряване и индустриализация на иновативните методи и средства по отношение на изпълнението на елементите.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Bakarzhi, M., Bogdanova, Evg.* Parametric design-technological solutions for the implementation of formwork. Conference UACEG 2017.
2. *Culver, R., Koerner, J. J.* Fabric Forms: The Robotic Positioning of Fabric Formwork, Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016, pp 106–121.
3. <https://www.josephsarafian.com/fabric-formwork>, visited on 3.6.2022.
4. *Raun, C., Kirkegaard, P. H.* Adaptive mould – A cost-effective mould system linking design and manufacturing of double-curved GFRC panels, GRC 2015 Dubai.
5. <https://adapamoulds.com/portfolio-item/adaptive-mould-d200-2/>, visited on 6.8.2022.
6. *Jipa, A., Meibodi, M., Giesecke, R., Shammas, D., Leschok, M., Bernhard, M., Dillenburger, B.* 3D-Printed Formwork for Prefabricated Concrete Slabs, 1st International Conference on 3D Construction Printing Swinburne University of Technology, Melbourne, Australia 26th – 28rd November 2018.
7. *Burger, J.* Eggshell: Design and fabrication of non-standard, structural concrete columns, using 3D printed thin-shell formwork, 2019.

CONSTRUCTION TECHNOLOGY FOR NON-STANDARD CONCRETE ELEMENTS

Evg. Bogdanova¹

Keywords: *formwork, construction technology, robotic fabrication, 3D printing, set-on-demand concrete, digital concrete, reinforcement*

ABSTRACT

The paper describes the innovation of fabrication process of concrete elements cast in non-standard forms. Options for integration of reinforcement and for laying the concrete mixture are discussed. Comparisons and conclusions about the applicability of the methods in Bulgaria are made.

¹ Evgenia Bogdanova, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Construction Technology and Mechanisation”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: evg_bogdanova@abv.bg