



Получена: 18.09.2020 г.

Приета: 19.10.2020 г.

ИЗГРАЖДАНЕ НА МОДУЛНИ СГРАДИ С ТЕХНОЛОГИЯ НА 3D ПЕЧАТА

А. Мазников¹, Р. Захариева², В. Кърджиев³, М. Гюнелиев⁴

Ключови думи: 3D печат, архитектурно проектиране, модулни сгради, обемен елемент, 3D модел, архитектурен образ, устойчива архитектура, устойчиво развитие

РЕЗЮМЕ

Целта на изследването е да се очертаят възможностите за приложение на технологията на 3D печата за изграждане на модулни сгради, при които специфичната носеща конструкция е обвързана с функционалното предназначение, технологичните изисквания, естетиката на архитектурната форма и икономическата логика. Концепцията е дефинирана като „обемен елемент с обръщане“, като основната предпоставка при избора на геометричните параметри е конструкцията да се изпълни от влакнесто-армиран композит, без необходимост от армировка от стоманени пръти. Извършени са основни измерителни проверки. Установени са редица предизвикателства и са конкретизирани насоките за бъдещи изследвания. Направен е изводът, че перспективите за масово прилагане на технологията на 3D печата у нас зависят не само от инвестициите в тази технология, но и доколко трите стълба на устойчивото развитие ще добият реално отражение в българската архитектурно-строителната практика.

¹ Ангел Мазников, гл. ас. д-р арх., кат. „Технология на архитектурата“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: arinteh@mail.bg

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

³ Васил Кърджиев, проф. д-р инж., кат. „Масивни конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: kardjiev@abv.bg

⁴ Мирослав Гюнелиев, докторант арх., кат. „Технология на архитектурата“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: micarch81@gmail.com

1. Въведение

Тази публикация е резултат от изследванията, проведени през третата година от разработката на научен проект на тема „Предизвикателства и решения при приложението на технологията на 3D печата в строителството“, финансиран от Центъра за научни изследвания и проектиране (ЦНИП) при Университета по архитектура, строителство и геодезия (УАСГ). Това е първият проект в България, целящ да оцени потенциала за приложението на тази нова за нашата строителна практика технология и да разработи национално know-how по отношение на подходящите материали за печат, роботизираната технология на полагане, геометричното 3D моделиране и архитектурно-конструктивното проектиране. Тези научни знания позволяват, при осигуряване на техническа възможност (екструдер и роботизирана ръка), да се осъществи на практика 3D печат на сгради и елементи у нас.

Очаква се 3D печатът на сгради да стане една от предпочитаните технологии, тъй като според оценката на Организацията на обединените нации (ООН) към 2030 г. около 3 млрд. души се очаква да имат нужда от жилища, а 3D печатът осигурява по-голяма бързина и прецизност при по-ниски разходи за изграждане. За приложението на технологията на 3D печата спомага и навлизането на строително-информационното моделиране (BIM).

В предишни изследвания по проекта бе направен анализ на силните и слабите страни, на възможностите и предизвикателствата (т.нар. SWOT анализ) на 3D печата в контекста на устойчивото развитие, с отчитане на всички аспекти – технологична осъществимост, ресурсна и енергийна ефективност, оценка на жизнения цикъл с оглед на въздействия върху компонентите на околната среда. Беше установено, че за приложението на технологията у нас, като най-перспективно се очертава изпълнението на индивидуални елементи със сложна архитектурна форма, както и монолитното изпълнение на относително малки индивидуални жилищни и обществено-обслужващи сгради в райони, пострадали от бедствия, където традиционните технологии крият рискове за здравето на работниците и/или се нуждаят от по-дълго време за елиминиране на последствията от бедствията [1].

Въпреки че през последните няколко години се увеличава приложението на технологията на 3D печата в строителството, тя остава сравнително слабо използвана. Главната причина за това са ограниченията, свързани с печатането на хоризонталните елементи на сградата, което води до загуба на някои предимства на тази технология. Анализът показва, че печатането на отделни елементи също не е атрактивна алтернатива. Затова усилията в настоящото изследване бяха насочени към очертаване на възможностите за изпълнение на цели сгради от относително малки модулни елементи. Оптимално изглежда специфичното конструктивно решение, изпълнено с технологията на 3D печата, да се обвърже с функционалното предназначение, технологичните изисквания, естетиката на архитектурната форма и икономическата логика.

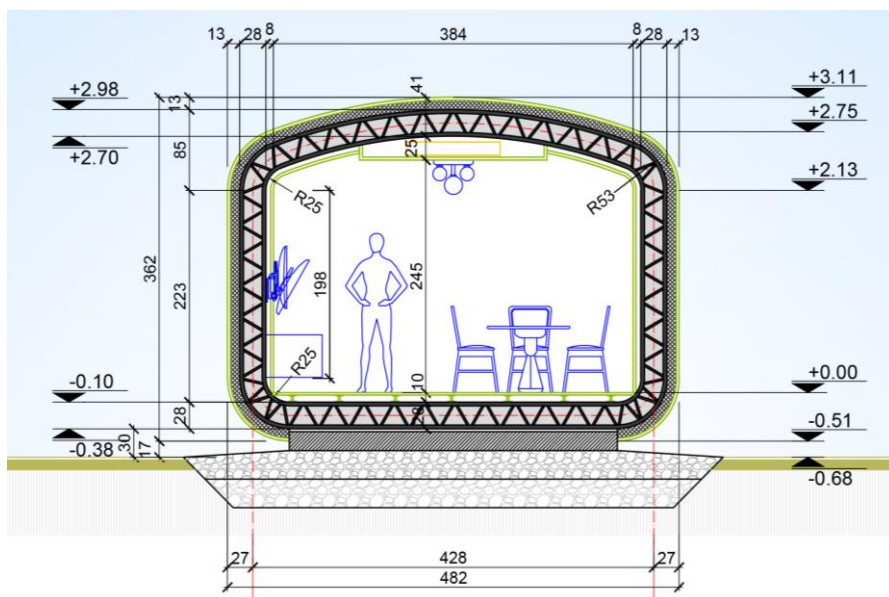
2. Подход, концепция и методология

Изграждането на архитектурни обекти с прилагане на технологията на 3D печата, като специфичен научен обект, е изследвано в контекста на дефиницията за устойчива архитектура – архитектура за устойчивото развитие. Архитектурното изследване е съобразено с изискванията за ефективност на 3D печата, като материалът е вид супервисокоякостен бетон. Монолитното печатане е оптимално като технология и времетраене само

за вертикални и сводови конструктивни елементи, но не и за хоризонтални конструктивни елементи, защото се изисква допълнителен кофраж или се налага сглобяемо изпълнение. А печатането на отделни архитектурно-конструктивни елементи – панели или други, изисква последващ монтаж и многобройни конструктивни съединения. Печатането на цялостната носеща конструкция без прекъсване позволява да се реализират напълно предимствата на 3D печата, като технология на изграждане. Унифицирането на размерите на модулните елементи при съобразяване с функционалните изисквания и серийно производство, намалява инвестиционната стойност на строителството, при запазване на индивидуалността на формата и пространствата, като така се гарантира широка приложимост на архитектурните обекти.

Предмет на изследването е взаимното обвързване на функционалната структура и архитектурно-естетическото решение на едноетажните архитектурни обекти със строително-техническото изпълнение на носещата конструкция чрез 3D печатане.

Целта на изследването е определянето на основните обемно-пространствени характеристики и приложимите архитектурно-конструктивни подсистеми за едноетажните сгради, както и перспективните насоки за развитие на архитектурата на обектите, при дадената технология за носещата конструкция.



Фиг. 1. Вертикален разрез на обемен елемент тип „тръба“ с овално сечение

Приетите методи на изследване са съобразени с научната област и със специфика на определените обект и предмет – приложен е системен подход при проучване на научните трудове и статии, нормативна рамка и съществуващия опит, като са дефинирани критерии за приложимост – сградите да са проектирани така, че да отговарят на основните изисквания към строежите съгласно Регламент ЕС 305/2011 [7]. Обектът на изследването е разглеждан едновременно на ниво архитектурни елементи и като цялостна структура, така че да могат да се анализират взаимовръзките в тяхната цялостност и подчиненост. При направен последващ синтез е определена оптималната строително-конструктивна система при разглежданата технология на изпълнение на конструкцията на архитектурния обект – концепцията е дефинирана като „**обемен елемент с обръщане**“.

Концепцията включва отпечатване, с разработени в рамките на проекта бетонни състави, на цялостната носеща конструкция и на част от ограждащите конструкции на сграда или неин конструктивен модул, а не на отделни архитектурно-конструктивни елементи. Отпечатването на всеки **обемн елемент тип „гръба“ с овално сечение** е във вертикално положение. След достигане на необходимата носеща способност елементът се завърта на 90° и се монтира върху предварително изпълнена стоманобетонна настилка. В следствие се изпълняват довършителните работи по фасадите и във вътрешните пространства (фиг. 1). Оптимално е създаването на цялостен индивидуализиран обемно-пространствен образ с четимо и запомнящо се фасадно третиране и функционално определени интериорни композиции, който да се превърне в част от рекламната стратегия на ползвателя на архитектурния обект.

Според участието на обемните елементи в цялостната структура на архитектурния обект, изследваните решения на обемните елементи се класифицират като самостоятелни единични обекти. Предложени са и варианти на съчетаване на отделни видове обемни елементи с различни координационни размери за изграждане на самостоятелния обект. По функционални и технологични критерии, ефективно е реализирането на следните видове обемни елементи: компактно, редово и свободно по начин на подреждане [10].

В контекста на съвременните обществено-икономически условия е обоснована основната насока на развитие на архитектурни обекти с прилагане на технологията на 3D печата към носещата конструкция на цялостни **едноетажни сгради**. Оптимални типове и подтипове сгради за използване на технологията, при баланс на инвестиционните разходи, срока за строителство и експлоатационните разходи се очертават едноетажни сгради без подземни и тавански етажи при височина на сградата до кота корниз до 4,50 m, сред които:

- жилищна сграда – еднофамилна, като е възможно обитаване от едно семейство при различен брой на членовете му;
- обществено обслужваща сграда – в областите на административното обслужване, на здравеопазването и ветеринарната медицина, на търговията, общественото хранене, услугите, и на транспорта и електронните съобщения;
- обслужващи комплекси към промишлени сгради – за обществено обслужващи елементи, за спомагателни дейности, и за инсталации и съоръжения на техническата инфраструктура [9].

В зависимост от характеристиките, значимостта, сложността и рисковете при експлоатацията, строежите на такива сгради се категоризират в пета категория по Закона за устройство на територията и наредбите към него.

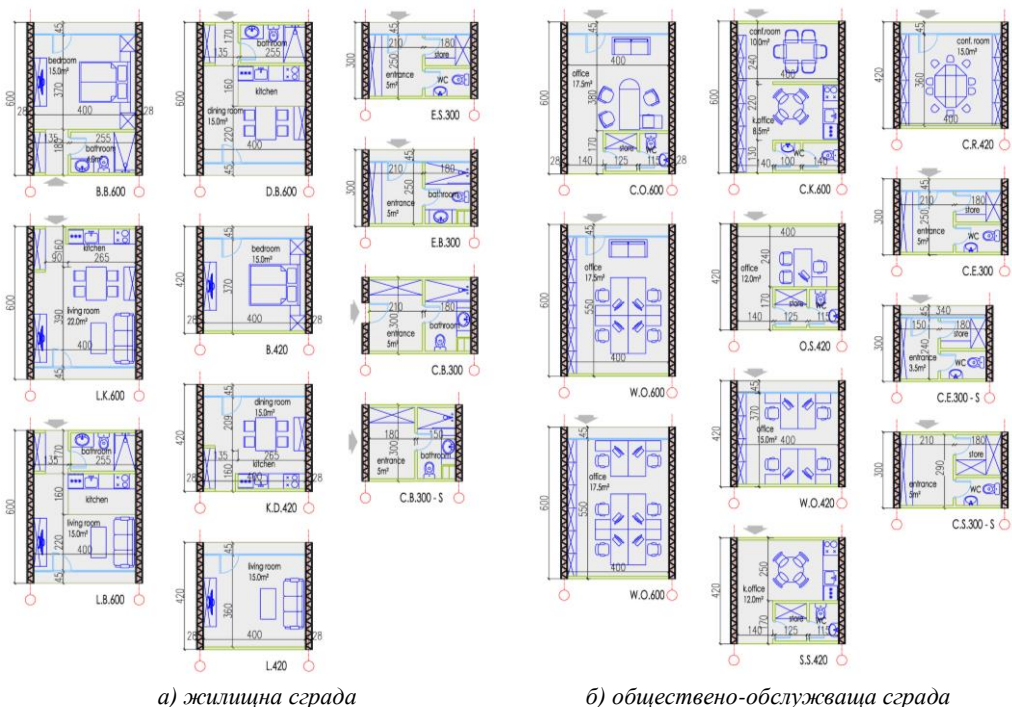
Основна предпоставка за избора на геометричните параметри на предлаганите обемни елементи е масивната конструкция да се изпълни от финодисперсен влакнесто-армиран композит, без необходимост от конвенционална армировка от стоманени пръти, тъй като замонолитването на тази армировка би усложнило, а и до известна степен обесмислило 3D печата. Извършено е конструктивно моделиране и са направени основни оразмерителни проверки с оглед на проверка дали подбраното сечение може да понесе статичните натоварвания (собствено тегло и полезни товари) и климатичното ветрово натоварване, като са приети редица опростявания – при определяне на натоварванията, моделиране на напречното сечение с еквивалентно правоъгълно, приета линейна зависимост в работата на бетон и армировка и др.

В процеса на работата по проекта са разработени състави за 3D печат на циментова основа и в предишни наши публикации са представени основните предизвикателства, свързани с рецептурата им и с технологичните изисквания [2, 3]. В настоящото изследване, предвид желанието да се избегне конвенционална армировка с армировъчни пръти,

са заложени параметрите на бетон с високи експлоатационни показатели, при който финозърнестата високоякостна матрица е армирана с микростоманени влакна, позволяващи постигането на високи якости при огъване и опън, както и придаващи дуктилност на композита. Определените основни параметри на материала са:

- обемна плътност: $2,2 \cdot 10^{-8} \text{ kN/mm}^3$, като обемната плътност е определена по БДС EN 12390-7:2009;
- якост на натиск: $f_c = 150 \text{ MPa}$, определена по адаптирана методика от БДС EN 196-1:2016;
- якост на опън при разцепване: $f_t = 12 \text{ MPa}$, определена по БДС EN 12390-6:2009;
- якост на опън при огъване: $f_f = 32 \text{ MPa}$, определена по адаптирана методика от БДС EN 196-1:2016;
- якост на срязване между два последователни слоя $f_{sh} = 2 \text{ MPa}$, определена по адаптирана методика от БДС EN 1015-12:2016;
- модул на еластичност: $E = 50 \text{ GPa}$, определен по БДС EN 12390-13:2013;
- коефициент на Поасон: $\mu = 0,22$, определен по ASTM C469 / C469M – 14;
- съсъхване (във възд. суха среда): $0,57 \text{ mm/m}$, определено по ASTM C157/C157M–17 [4, 5].

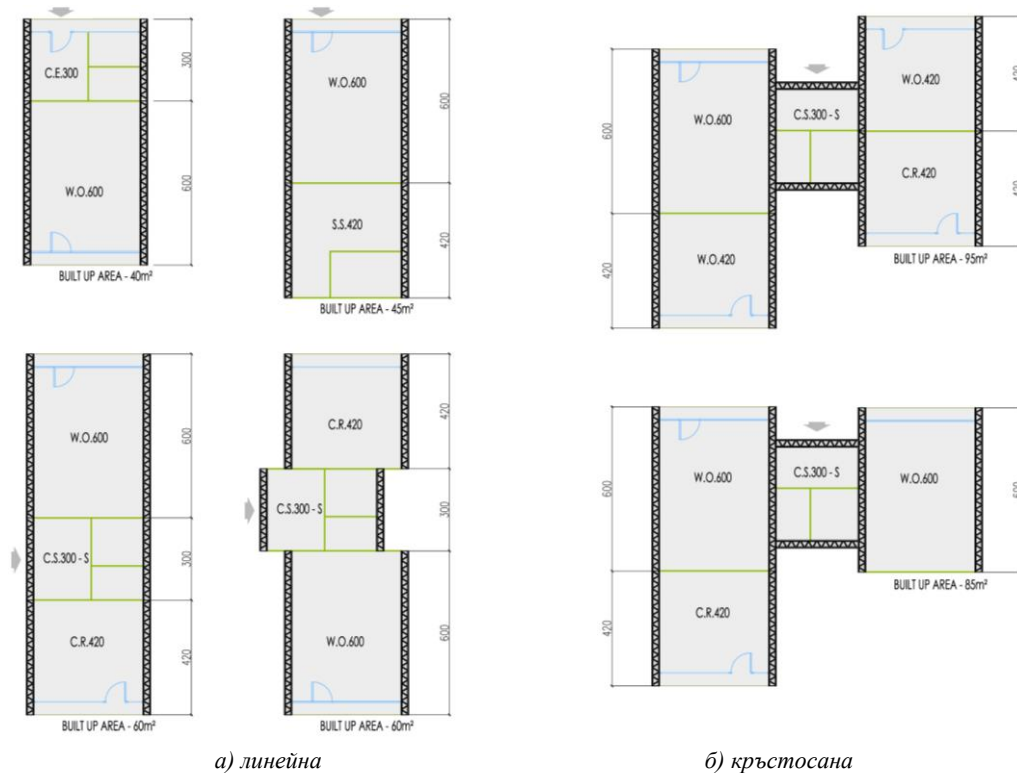
3. Архитектурно-конструктивни решения на сгради с приложение на технологията на 3D печата



Фиг. 2. Функционални схеми

Архитектурно-конструктивните решения на обектите, реализирани с технологията на 3D печата, са систематизирани в следните направления: функционални структура и конструктивно решение, конструктивно изчисляване и оразмеряване, материали и изпълнение, както и архитектурен образ.

Достъпът до нивото е по диференциални стъпала, или чрез рампа.



а) линейна

б) кръстосана

Фиг. 3. Планова схема на обществено-обслужваща сграда

Плановата схема на цялостната едноетажна сграда се изгражда на основата на варианти на композиция на модулни обемни елементи: линейна – по надлъжната ос на „тръба“ (фиг. 3а), и кръстосана – с перпендикулярни надлъжни оси на елементи (фиг. 3б).

3.1. Конструктивно решение при технология с 3D печат

Овалната архитектурна форма на конструкцията на обемни елементи тип „тръба“ е оптимална, тъй като при нейното реализиране не се изискват допълнителни конструктивни мерки, включително полагане и замонолитване на прътова армировка, допълнителни монтажни елементи, кофражи и други. Цялостното изпълнение е основано на използването на унифицирани и максимално индустриално завършени строителни елементи и технологични решения.

Носещата конструкция на проучените едноетажни сгради без полуподземен и подземни етажи и без тавански етажи е стоманобетонна при конструктивна система само с повърхнинни елементи (пространствени носещи стени). Носещата функция се изпълнява от основните ограждащи елементи – стени, под и покрив, които са дефинирани про-

странствени повърхности. Всички повърхнинни елементи са печатани от влакнестоармиран супервисокоякостен бетон с обща дебелина 280 mm, включваща два повърхностни слоя (вътрешен и външен) от по 40 mm и средна решетка с триъгълна конфигурация с дебелина на ребрата от 20 mm. Всички въздействия върху сградата – експлоатационни, ветрови и сеизмични, се поемат от тях и се предават към земната основа. Нормативната устойчивост на хоризонтални въздействия (включително и от земетръс) на сградата се осигурява от съвместното им действие. Освен за осигуряване на съответната носимоспособност, тази 3D структура допринася за енергийната ефективност на сградата.

Конструктивните полета са с размери в план от 4,28×3,00 m, 4,28×4,20 m и 4,28×6,00 m, които съответстват на размерите на помещения до 24 m² при определеното функционално съдържание. Максималната конструктивна височина на овалното сечение на тръбата е 3,08 m. Определени са оптимални конструктивни радиуси на огъването в преходите стена-покрив и стена-под съобразно строителната технология и функционалните изисквания.

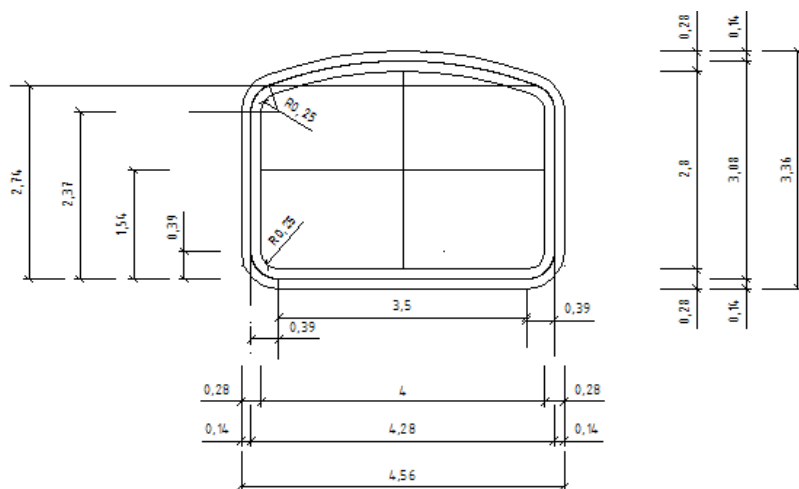
Конструктивната схема на архитектурните модули в план е линейна – праволинейна надлъжна. Вертикалната конструктивна схема е криволинейна конвексна.

Строително конструктивната система „обемни елементи“ се характеризира с висока степен на индустриална завършеност, като конструкцията се изпълнява на местостроежа. Има възможност да се композират печатаните на местостроежа модули. В зависимост от поемането на въздействията и осигуряването на общата устойчивост изследваните обмени елементи на системата са носещи, а според степента на затвореност – частично затворени [10].

След принтирането и технологичното обръщане на обемния елемент се изпълнява неговото монтиране върху предварително изпълнена стоманобетонна настилка. Настилка се армира и бетонира върху подложен противозамръзващ пласт (баластра с подбрана зърнометрия), носещ пласт от трошен камък и топлоизолация от екструдирани пенополистирен.

Изследваните модулни сгради са със степен на огнеустойчивост II-ра, съобразно строително-техническите норми за осигуряване на безопасност при пожар.

3.2. Особенности при изчисляване и оразмеряване на обемния элемент



Фиг. 4. Геометрия на напречното сечение на обемния елемент

Основната цел на статическото моделиране и извършените проверки е да се направи приблизителна оценка дали така подбраното сечение би могло да понесе статичните натоварвания (собствено тегло и полезни товари) и ветрово натоварване, без необходимост от влагане на конвенционална армировка. Геометрията на напречното сечение с решетъчна структура е съобразена с архитектурното решение (фиг. 4).

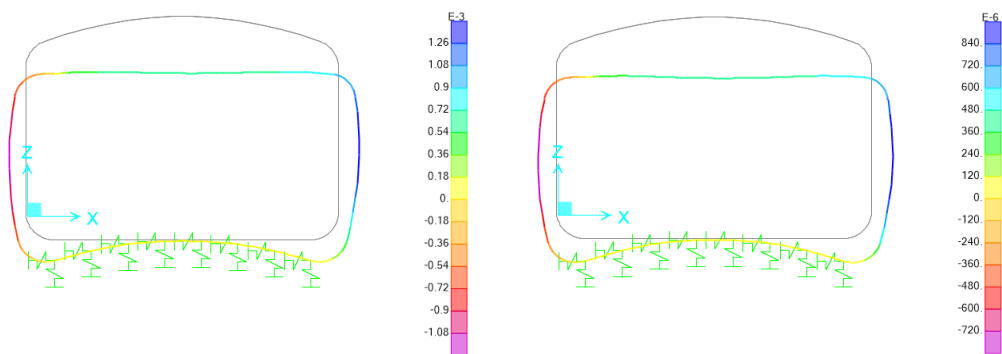
Товарните въздействия са определени по БДС EN 1990, БДС EN 1991-1-1, БДС EN 1991-1-3, БДС EN 1991-1-4 и съответните национални приложения. Анализирани са основните комбинации от товарни въздействия за крайни и експлоатационни гранични състояния, съгласно изискванията на конструктивната система Еврокодове.

Моделирането на напречното сечение на обемния елемент е направено с програмния продукт SAP 2000. Отчитат се характеристиките на материала, вида на напречното сечение, геометрията, опорните условия и основните степени на свобода, различните видове натоварвания и техните комбинации и други. Както бе подробно дискутирано в [5], бетонът в елементи, произведени с 3D печата не (послойно нанасяне) е с нелинейно поведение и е анизотропен. При проверките са приети редица опростяващи предпоставки: материалът е изотропен, и с линейно поведение, което е характерно за супер-високоякостния бетон; използван е установеният минимален секущ модул на еластичност; свойствата на бетона са непроменливи и са заложили стойностите, отговарящи на 28-дневна възраст; решетъчната структура на стената е моделирана с еквивалентно плътно правоъгълно сечение (с еднаква коравина с тази на решетката).

Проверката за нормалните напрежения показва, че те остават по-ниски от допустимите с голям резерв (4 – 5 пъти). Максималните тангенциални напрежения са около два пъти по-малки от якостта на срязване. Максималната хоризонтална реакция от вятър е три пъти по-малка от силата на триене между обемния елемент и основата.

Изчислените провисвания са много по-малки от допустимите. При експлоатационните гранични състояния максималното отчетено вертикално преместване е 0,6 mm (покрив) и 0,24 mm (плоча), а ограниченията са съответно 17,1 mm и 14,3 mm (фиг. 5). По отношение на хоризонталните премествания на стените, те също са многократно по-малки (1,3 mm) от граничните (12,3 mm).

Тези резултати следва да се интерпретират като съвсем приблизителни. В действителност, статическото изчисление и проверките за крайни и експлоатационни гранични състояния за елементи, изготвени чрез технологията за 3D печатане, е доста сложна в теоретично отношение задача и доста трудно осъществима на практика. Ето защо в световната практика при прилагането на тази система за строителни конструкции се разчита главно на експериментални изследвания и реално прилагане на тестово натоварване директно върху готовите елементи или конструкции.



Фиг. 5. Деформирано състояние от комбинации ENV_d и ENV_k (стойностите са в метри)

Основните проблеми при изследването на тези елементи са свързани, от една страна, с технологията при печат на основната форма на напречно сечение, което наподобява много ферма с носещи долен и горен пояс и свързващи наклонени диагонали. Отделните елементи на фермата се изпълняват в различни етапи от време, което предопределя и основните проблеми при проверката на носещата им способност, и възможността за преразпределение на напрежения и усилия между основните горен и долен пояс на структурата. Основното преимущество на фермите в строителните конструкции е, че те поемат главно опънни и натискови сили. В случаите, когато искаме фермите да работят и да предават усилия перпендикулярно на равнината им, се губят основните им предимства и възникват редица проблеми, свързани с действащите напрежения и разрезни усилия и трансфера им между отделните елементи на фермата. Необходимо е експериментално да се докаже граничната носимоспособност за трансфер на тези напрежения и запазването на целостта на напречното сечение при действащите товарни въздействия и евентуалното провисване на целия елемент.

От друга страна, проблемите са свързани и с технологията за повдигане, транспорт и монтаж на вече готовата конструкция на обемния елемент на строителната площадка. Тук от съществено значение е запазване на връзката между отделните слоеве, отпечатани в различни етапи от време при действащите вертикални и хоризонтални товарни въздействия. За целта е необходимо правилно определяне на граничната носимоспособност на срязване и сцепление между два отделни слоя от готовия елемент.

От трета страна, важна характеристика на използвания за печатане материал е значителната разлика между якостта при опън и при натиск и съответно, граничните деформации при опън и натиск. А отделни части от елементите работят при сложно тримерно напрегнато състояние, което води до сложна система от пукнатини. Тези пукнатини са трудни за прогнозиране и теоретичен анализ и от своя страна променят разпределението на напреженията в рамките дори на един елемент. Необходимо е да се отбележи и очакваното нелинейно еласто-пластично поведение на материала при сложно напрегнато състояние и сравнително високите нива на напреженията и деформациите. Изчислителната схема се усложнява допълнително при предвиждане на влагане в материала за печатане на стоманени микровлакна.

Тези проблеми налагат провеждането на редица натурни експерименти при действие на различни по вид и направление въздействия за доказване или опровергаване на приетите значително опростени методи за проверка на носещата способност.

3.3. Материали и изпълнение на довършителните работи, технически инсталации и пожарна безопасност

Покривът на модулния обемна елемент е скатен по наклон, с два ската с криволинейно напречно сечение. Отвън върху покривната конструкция от повърхнинен елемент от 3D печат се изпълнява обшивка от профилиран конвексен еднослоен панел от стоманна тънколистна студеноогъната поцинкована при предварително монтирана изолация по наклона от плочи минерална вата полутвърда и мембрани. Аналогично на покрива е изпълнението на фасадните стени ограждания на обемния елемент. Структурата на вътрешните стени е щендерна с гипсокартонени импрегнирани плочи.

Оформянето на повърхностите на помещенията в обемните елементи е с инсталационен двоен под с HDF-плочи, и обшивка, и окачен таван от гипсокартонени импрегнирани плочи при влагане на допълнителни ефективни топлоизолационни продукти. Обработката на лицевите повърхности на помещенията се съобразява със спецификата им и санитарно-хигиенните изисквания, техните предназначение и представителност.

Проучването предвижда използваните материали да са с високи технико-експлоатационни качества и да съответстват на изисквания за създаване на комфортна и екологична среда. Определени са групи от основните материали за довършителните работи по интериора, които са съобразени с цялостната концепция.

В архитектурните модули с прилагане на технологията на 3D печата са проучени условията за изграждане на различните технически инсталации и системи. Инсталационните решения са с енергоспестяващи елементи с цел постигане на оптимална енергийна ефективност.

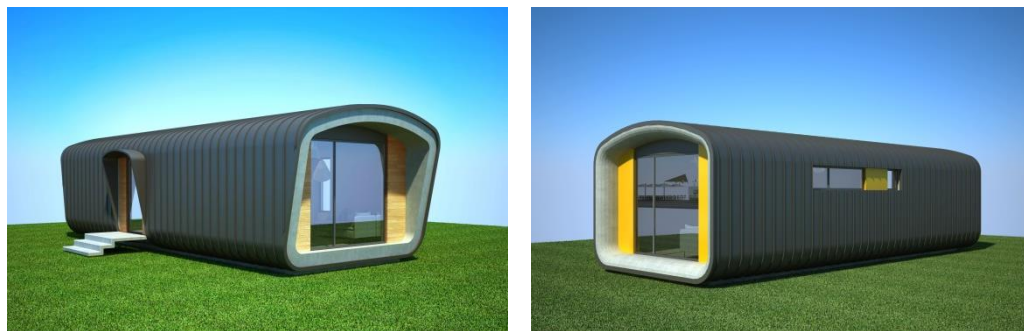
За концептуалното проучване на архитектурните обекти се определя клас в зависимост от функционалната пожарна опасност:

- за жилищна сграда: клас Ф1, като жилищна сграда за постоянно обитаване, в която има спални помещения; подклас Ф1.4, като еднофамилна жилищна сграда;
- за обществено обслужваща сграда: клас Ф3, като сгради за обществено обслужване в областта на търговията, общественото хранене, транспорта, здравеопазването, съобщенията и услугите; и административното обслужване; от подкласове Ф3.1, Ф3.2, Ф3.3, и Ф3.4;
- за комплекси за спомагателни дейности и за техническата инфраструктура към промишлени сгради: клас Ф5, като производствена сграда с постоянен режим на работа; и подклас Ф5.1 – производствени сгради и съоръжения, производствени и лабораторни помещения, или работилници [8].

При изграждането на модулни елементи се влагат само продукти с оценено и удостоверено съответствие със съществените изисквания, като всички използвани строителните продукти съответстват на условията и реда за влагане на строителни продукти в строежите. Производството на обемните елементи е основно монолитно от бетон и последващо сглобяемо на площадката. Съответства оптимално на изискванията за безопасност при пожар и обща техническа безопасност.

3.4. Архитектурен образ на сградите при технология с 3D печат

Архитектурната форма на едноетажната сграда с приложена технологията на 3D печата е определена от функционалната характеристика на вътрешните пространства и дефиниращата ги специфична архитектурна конструкция. Постигнатата силна зависимост между изявата на архитектурно конструктивната структура и естетическото отражение във формата определя тектониката на концептуалните сгради.



Фиг. 6. Едноетажна модулна сграда – павилионен вид с ясна геометрична форма

Обоснованият вид на концептуалните едноетажни моделни сгради е преобладаващо **павилионен с ясна геометрична форма** и с ниско застрояване по височина с издължаване по две от фасадите (фиг. 6).

При създаването на архитектурния образ водещи са обемно-пространственото решение и ролята на обемните елементи в структурата на сградата. Ясното извявяване на пространствената форма на обемните елементи – **линейна тръба с овално сечение**, в архитектурната композиция и във фасадното членение формира тектоничното естетическо въздействие на самата сграда с тази система. Фасадите на архитектурните обекти са изцяло или почти плътни по овалното сечение на обемния елемент и с максимално остъкляване в напречните коси пространствени срезове в краищата (фиг. 7). Във фасадното изграждане водещи са пропорциите, членението, фактурата и цветът на външните повърхности. Изчистеното членение се постига с единичния вид на стенни/покривни малки панели, както и ограничено с дограми. Фактурата на материалите и профилирането могат да обогатят фасадните повърхнини. Цветовото третиране подчертава фасадните елементи, идентификацията в обекта, създава цветова композиция по фасадите (фиг. 8).



Фиг. 7. Фасади на обемния елемент – съпоставка на плътни и остъклени части по пространствените му повърхности



Фиг. 8. Членение и цветово третиране на фасадите на обемните елементи

За пластичното третиране във външния образ са характерни напречно разположените фасадни дограми и ниската височина на обекта, които в голяма степен създават връзката с човешкия мащаб. Допълнителна пластика се постига и с различни слънцезащитни устройства, релефни панели и други.

Интериорният образ на обектите се определя от функционалността им и от архитектурно планировъчната структура при ограничения обем на помещенията. Предвид

ролята на някои от сградите за създаване на представителност в пространствата им се включва и художественият синтез на архитектурата с другите изкуства.

Ясната вътрешна организация и прецизният избор на използваните материали – вид, фактура и цвятова гама, във фасадите и интериора се постигнаха подходящи нива на утилитарност, комфорт и представителност. Външното осветление акцентира или обобщава архитектурната форма през тъмната част от денонощието.

4. Изводи и насоки за бъдещи изследвания

Обосновано е, че технологията на 3D печата с бетон в строителството има сериозен потенциал за развитие при реализирането на едноетажни сгради с индивидуален архитектурен образ, с прецизни и унифицирани архитектурно-конструктивни детайли, създаващи богато естетическо въздействие. Тази строителна технология изисква известна архитектурно-конструктивна гъвкавост, но позволява бързо реализиране на инвестиционни предложения в критична обстановка (например за осигуряване на подслон след природни или антропогенни бедствия и катастрофи) при редуциране на инвестиционните разходи. Технологията на 3D печата допринася и за подобряването на условията на труд в строителството, развитието на други сектори на икономиката и дава възможност за оползотворяване на отпадъци, тъй като за рецептурите могат да се ползват пепели от ТЕЦ, микросилициев прах, бетонна и керамична пудра от строителни отпадъци и др.п.

Доказана е архитектурно-конструктивната и строително-технологичната възможност за реализиране на строежи по дефинираната концепция „обемн елемент с обръщане“. Характерната 3D технология на печатане е в най-голяма степен приложима при носещ частично затворен обемн елемент тип „тръба“ с овално сечение, чиито геометрични размери са определени с отчитане на функционалните изисквания и носещата способност.

Конкретизирани са насоките за бъдещи изследвания в следните направления:

а) архитектурни – детайлни решения на архитектурно-строителните подсистеми във взаимовръзка с техническите инсталации в обектите; оценка на общия и специфичен годишен разход на енергия при концептуалните сгради и оптимизиране от гледна точка на повишаване на енергийната ефективност; интегриране на фотоволтаични елементи на ограждащите конструкции или на други слънчеви инсталационни системи;

б) конструктивни – подробното конструктивно изследване и оразмеряване изисква провеждането на редица натурни експерименти при действащи различни по вид и направление товарни въздействия за доказване (или опровергаване) на приетите значително опростени методи за проверка на носещата способност на тези конструкции;

в) икономически – подробен анализ на финансовите параметри на сграда с конкретната технология на отпечатване по време на цялостния жизнен цикъл на обекта проектиране, строителство, експлоатация и поддръжка, реконструкция или премахване на строежа;

г) опазване на околната среда – оптимизиране на решенията с оглед на намаляване на екологичния отпечатък на сгради, построени с технологията на 3D печата.

В заключение, перспективите за масово прилагане на технологията на 3D печата в архитектурните обекти у нас зависят както от инвестирането в тази технология, така и от това, доколко дефинираните три стълба на устойчивото развитие ще добият реално отражение в българската архитектурно-строителна практика, тъй като икономическите показатели запазват определящата си роля, но екологичните аспекти и социалните аспекти увеличават непрекъснато своето значение за обществото.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка е подкрепена финансово от Центъра за научни изследвания и проектиране при УАСГ по договор БН-192/2016.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Захариева, Р., Кънчева, Я.* SWOT-анализ на технологията на 3D печата в контекста на устойчивото строителство. Сборник доклади от VIII Международна научна конференция по архитектура и строителство ArCivE 2017, 01 – 03 юни 2017, Варна.

2. *Захариева, Р., Бошнаков, Д.* Предизвикателства пред създаването на материал за приложение на технологията на 3D печата в строителството. Сборник доклади от Международна научна конференция „Проектиране и строителство на сгради и съоръжения“, Варна, 15 – 17 септември 2016 г.

3. *Иванова, Ст., Захариева, Р.* Основни технологични параметри при 3D печата с композити на циментова основа. // Годишник на УАСГ, 2017, 50 (4): 213 – 220.

4. *Захариева, Р., Манолова, Е.* Особености при поведението на огъване на супер-високоякостен бетон (СВЯБ). Сборник доклади от Международна научна конференция ДСБ‘ 2014, септември 2014 г., Варна.

5. *Захариева, Р., Първанова, С., Кърджиев, В., Добелаере, Ж.* Предизвикателства при моделиране и оразмеряване на вертикален елемент, изпълнен от бетон по технологията на 3D печата. // Годишник на УАСГ, 2018, 51 (12): 29 – 42.

6. <https://www.3dprintingmedia.network/first-3d-printed-office-building-inaugurated-in-dubai/>, посетен на 12.12.2018.

7. Регламент (ЕС) № 305/2011 на Европейския парламент и на Съвета от 9 март 2011 година за определяне на хармонизирани условия за предлагането на пазара на строителни продукти и за отмяна на Директива 89/106/ЕИО на Съвета, ОJ L 88, 4.4.2011, р. 5 – 43.

8. Наредба № Из-1971 от 29 октомври 2009 г. за строително-технически правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар. Обн. ДВ бр. 96 от 4 декември 2009 г., посл. изм. и доп. ДВ бр. 63 от 31 юли 2018 г.

9. *Мазников, А.* Съвременни складови сгради и стопанства. УАСГ, София, 2018, ISBN 978-954-724-119-0, стр. 176.

10. *Кръстев, Б.* Сгради от стоманобетонни обемни елементи. Техника, София, 1985, 168 стр.

CONSTRUCTION OF MODULAR BUILDINGS USING 3D PRINTING TECHNOLOGY

A. Maznikov¹, R. Zaharieva², V. Kadrjiev³, M. Guneliev⁴

Keywords: 3D printing, architectural design, modular buildings, prefabricated volume produced elements, prefabricated modular house, 3D model, sustainable architecture, sustainable development

ABSTRACT

The study aims to outline the possibilities of applying the 3D print technology to the construction of small modular buildings where the specific bearing structure is linked to the functional purpose, the technological requirements, the aesthetics of the architectural form and the economic viability. The construction system is optimised and the concept is defined as a "volume element with a reversal". The main prerequisite for choosing the geometric parameters of the volume element is the structure to be made without conventional reinforcement of steel bars, but of finely-grained fibre-reinforced composite. Basic dimensional checks have been carried out to determine whether the selected section can bear certain loads (dead load, payload and wind). Several challenges have been identified and some future research directions have been specified. It is concluded that the prospects for wide application of the 3D print technology in Bulgaria depend on both the investment in this technology and the extent to which the three pillars of sustainable development will have a real impact on the Bulgarian architectural and construction practice.

¹ Angel Maznikov, Senior Assist. Prof. Dr. Arch., Dept. "Technology of Architecture", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: arinteh@mail.bg

² Roumiana Zaharieva, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. "Building Materials and Insulations", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: roumiana.zaharieva@gmail.com

³ Vasil Kardjiev, Prof. Dr. Eng., Dept. "Reinforced Concrete Structures", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: kardjiev@abv.bg

⁴ Miroslav Guneliev, Arch. PhD student, Dept. "Technology of Architecture", UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: micarch81@gmail.com