АРХІТЕКТУРНО - КОНСТРУКТИВНО - ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА ЗД - ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Колективна монографія



Дніпро
2019

Міністерство освіти і науки України
Державний вищий навчальний заклад
«Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

АРХІТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА 3Д-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Колективна монографія

За загальною редакцією
д-ра техн. наук, професора Миколи Савицького

Дніпро
2019

УДК 624.05:004.92

А 87

Рекомендовано до друку Вченою радою ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (Протокол №4 від 26.11.2019 р.)

Авторський колектив:

Микола Савицький, д.т.н., проф., головний редактор (Україна); **Штефан Айріх**, інженер (Німеччина); **Ібрагім Зайдан Халаф**, інженер-будівельник (Об'єднані Арабські Емірати); **Станіслав Дукат**, архітектор (Австрія); **Станіслав Унчік**, PhD, проф. (Словаччина); **Галина Євсєєва**, д.н.держ.упр., проф. (Україна); **Тетяна Нікіфорова**, д.т.н., проф. (Україна); **Сергій Шатов**, д.т.н., проф. (Україна); **Олександр Адегов**, к.т.н., доц. (Україна); **Марина Бабенко**, к.т.н., доц. (Україна); **Євген Бринзін**, к.т.н. (Україна); **Олександр Голубченко**, к.т.н., доц. (Україна); **Оксана Зінкевич**, к.т.н., доц. (Україна); **Сергій Іванцов**, к.т.н., доц. (Україна); **Олена Коваль**, к.т.н., с.н.с. (Україна); **Олександр Конопляник**, к.т.н., доц. (Україна); **Марина Ляховецька-Токарєва**, к.т.н., доц. (Україна); **Микола Махінько**, к.т.н., доц. (Україна); **Руслан Папірник**, к.т.н., доц. (Україна); **Іван Перегінець**, к.т.н. (Україна); **Олександр Савицький**, к.т.н. (Україна); **Анатолій Титюк**, к.т.н., доц. (Україна); **Євген Юрченко**, к.т.н., доц. (Україна); **Тетяна Шевченко**, к.т.н., доц. (Україна); **Світлана Шехоркіна**, к.т.н., доц. (Україна); **Костянтин Шляхов**, к.т.н., доц. (Україна); **Ольга Бондаренко**, архітектор (Україна); **Олександр Бардах**, інженер-металург (Україна), **Марина Бордун**, інженер-будівельник, м.н.с. (Україна); **Олександр Денисенко**, архітектор (Україна); **Максим Леушин**, інженер – будівельник; **Олександр Лясота**, інженер-механік, м.н.с. (Україна); **Андрій Савицький**, магістр будівництва, с.н.с. (Україна); **Єлизавета Соловйова**, магістр будівництва (Україна); **Віталій Спиридоненков**, інженер-будівельник (Україна); **Вячеслав Чернець**, інженер-будівельник (Україна).

Рецензенти:

І. І. Назаренко, д-р техн. наук, професор, президент Академії будівництва України;

О.М. Пшінько, д-р техн. наук, проф., ректор Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна;

О. Г. Величко, д-р техн. наук, проф., ректор Національної металургійної академії України

А 87 **Архітектурно-конструктивно-технологічна система 3д-друку будівельних об'єктів** : колективна монографія / М. Савицький, Ш. Айріх, І. З. Халаф [та ін.]. ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. М. Савицького, − Дніпро, ФОП Удовиченко О.М., 2019. – 233 с.

ISBN 978-966-323-205-8

В колективній монографії представлені результати наукових досліджень, що направлені на розробку наукових основ створення вітчизняної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку. Виявлено та систематизовано технологічні особливості обладнання для 3D-друку елементів будівельних конструкцій. Виконано аналіз сучасних об'єктів архітектури, що зводяться за технологією будівельного 3D-друку. Запропоновано архітектурну типологію будівель і споруд та розроблено проекти індивідуальних малоповерхових енергоефективних житлових будівель для технології 3D-друку. Визначені технологічні вимоги та будівельно-технічні особливості, проведені експериментальні дослідження фізико-механічних характеристик складів бетонів, які використовуються для 3D-друку будівельних конструкцій. Виконано моделювання напружено-деформованого стану та теплотехнічних характеристик типової тонкостінної стінової конструкції та двоповерхової житлової будівлі, що зводиться методом 3D-друку.

УДК 624.05:004.92

© Савицький М. В., Ш. Айріх, І. З. Халаф та ін., 2019

© ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», 2019

ЗМІСТ

ВСТУП 6

1. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ 3Д ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ’ЄКТІВ 9

1.1. Історія розвитку технології 3Д друку 9

1.2. Технології 3D- друку в будівництві 14

1.3. 3D принтери 24

1.4. Технологічні особливості обладнання 3D- друку будівель, споруд та елементів будівельних конструкцій 34

1.5. Удосконалення обладнання для 3D- друкування об’єктів 39

1.5.1. Модернізація машин для 3D- друку будівельних об’єктів 39

1.5.2. Пристрій для 3D-друку будівельних об'єктів 41

1.5.3. Головки 3D-друку будівельних об'єктів 43

1.5.4. Головки для 3D- принтерів з декількома екструдерами 50

1.5.5. Головка 3D-друку виробів із заповнювачами різних фракцій 58

1.5.6. Технологія та обладнання для 3D - друку будівельних об’єктів з використанням перероблених кам’яних матеріалів 61

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 1 68

2. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ 3Д ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБЄКТІВ 74

2.1. Матеріали для 3D друку в будівництві 74

2.1.1. Пісок 74

2.1.2. Метал 75

2.1.3. Бетон 76

2.2. Світовий досвід створення бетонів для 3-Д друку будівельних об’єктів 86

2.3. Розробка складів бетонів для технології 3Д друку 89
2.4. Фізико-механічні характеристики бетону за технологією 3D-друку 95
2.4.1. Характеристика вихідних матеріалів та технологія виготовлення бетонних зразків 96
2.4.2. Результати визначення міцності і щільності бетонів 107
2.4.3. Характеристики водостійкості бетонів 127
2.4.4. Результати визначення деформативних характеристик бетонів 133
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 2 143
3. АРХІТЕКТУРА БУДІВЕЛЬ, ЗВЕДЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 146
3Д ДРУКУ 146
3.1. Історія перших архітектурні рішення будівель, зведених за технологією 3Д друку 146
3.2. Приклади 3D друку в будівництві. Світовий досвід 147
3.3. Типологічний ряд індивідуальних і малоповерхових житлових будівель для технології 3D-друку будівельних об’єктів 159
3.3.1. Класифікація типів житлової забудови та житлових будинків згідно з державними будівельними нормами 159
3.3.2. Архітектурно-будівельна типологія будинків 162
3.3.3. Типологія житлових будівель 164
3.3.4. Номенклатура типів житлових будівель 165
3.3.5. Малоповерхові житлові будинки 166
3.3.6. Типологія житлових будівель за технологією 3D друку 168
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 3 170
4. АРХІТЕКТУРНО - КОНСТРУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ БУДІВЕЛЬ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3D-ДРУКУ 174

4.1. Конструктивно – технологічні особливості створення будівельних об’єктів за технологією 3Д друку 174
4.2. Дослідження напружено-деформованого стану тонкостінних несучих конструкцій за технологією 3D-друку 182
4.3. Теплотехнічні характеристики огороджувальної конструкцій за технологією 3D-друку 192
4.3.1. Основні теплотехнічні показники огороджувальних конструкцій, виконаних 3D принтером 192
4.3.2. Моделювання теплозахисних властивостей стінової конструкції, виготовленої методом 3D-друку 199
4.4. Моделювання напружено-деформованого стану несучих конструкцій малоповерхової будівлі за технологією 3D-друку 204
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 4 213
5. ВПРОВАДЖЕННЯ В ПРАКТИКУ БУДІВЦТВА УКРАЇНИ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ 3Д - ДРУКУ 215
5.1. Технологічна база і конструктивні елементи будівель і споруд, що виготовляються за технологією 3Д друку 215
5.2. Проекти для зведення малоповерхових житлових будинків за технологією 3D-друку 219
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 5 229

ВСТУП

Конструкція 3D-друку (c3Dp) або 3D-будівельна поліграфія (3DCP) стосується різних технологій, які використовують 3D-друк як основний метод виготовлення будівель або будівельних компонентів. Також використовуються альтернативні терміни, такі як адитивне будівництво (additive construction), автономна робототехнічна конструктивна система (Autonomous Robotic Construction System - ARCS), великомасштабне аддитивне виробництво (Large scale Additive Manufacturing - LSAM) або конструкція, що виробляється без форми (Freeform construction - FC).

Існує безліч методів 3D-друку, що застосовуються в будівельних масштабах, основними з яких є екструзія (бетон, цемент, віск, піна, полімери), порошкове склеювання (полімерна зв'язка, реакційноздатне з'єднання, спікання) та аддитивне зварювання. 3D друк у масштабах будівництва матиме широке застосування у приватному, комерційному, промисловому та державному секторах. Потенційними перевагами цих технологій є швидше будівництво, зниження витрат на оплату праці, підвищена складність та / або точність, більша інтеграція функцій та менша кількість відходів.

На сьогоднішній день було продемонстровано низку різних підходів, які включають виготовлення будівель та будівельних компонентів на місці та на будівельному майданчику, використовуючи промислові роботи, козлові системи та автономні транспортні засоби. Демонстрації будівельних технологій 3D-друку сьогодні включають: виготовлення житлових будівель, будівельні конструктивні елементи (облицювальні та конструкційні панелі, колони), мости та об’єкти цивільної інфраструктури, штучні рифи, різні дрібнички та скульптури.

За останні роки популярність ціє технології помітно зросла у багатьох нових компаніях, отримала підтримку відомими іменами будівельної галузі та наукових шкіл. Це призвело до кількох важливих етапів у розвитку

технології: перша 3D-надрукована будівля, перший 3D-друкований міст, перша 3D-надрукована частина в громадському будинку, перша 3D друкована будівля в Європі.

Для застосування технології 3D – друку в будівництві необхідна розробка або удосконалення: методів цифрового моделювання фізичних об'єктів; механічного обладнання для виконання 3D-друку; складів сумішей і визначення технологічних параметрів будівельних розчинів; методів контролю фізико-механічних властивостей матеріалів; архітектурних рішень, конструкцій будівель і споруд, що виготовляються методом 3D-друку; нормативної бази для впровадження технології 3D-друку в практику будівництва.

Виходячи з проведеного попереднього аналізу існуючих за проблематикою проекту досліджень та розробок, сьогодні в Україні відсутнє наукове обґрунтування архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва об'єктів методом 3D-друку, відсутня регулююча нормативно-технічна база і будівельні об'єкти, створенні за технологією 3D-принту. Враховуючи переваги вищеназваного методу, а також відсутність результатів комплексних досліджень технології 3D-друку будівельних об'єктів, робота, що спрямована на створення і розвиток архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку будівельних об'єктів, є надзвичайно актуальною для України.

Проведедені дослідження виконнані в рамках проекту «Розробка наукових основ інноваційної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку» (№ держреєстрації 0119U100608), що виконується за фінансової підтримки Міністерства освіти і науки України.

Мета проекту: Розробити наукові основи і створити вітчизняну інноваційну архітектурно-конструктивно-технологічну систему будівництва методом 3D-друку будівельних об'єктів.

Особливості структури та складових проведення досліджень.

При виконанні проекту для підтвердження базової ідеї можливості розробки вітчизняної інноваційної архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3Д-друку будівельних об'єктів необхідно:

- на основі аналізу сучасних об'єктів архітектури, конструктивних рішень будівель і споруд, виробів і матеріалів, складів будівельних розчинів, технологічного обладнання, методів і програмних продуктів для цифрового моделювання будівельних об'єктів стосовно методу будівельного 3D-друку запропонувати концепцію архітектурно-конструктивно-технологічної системи будівництва методом 3D-друку;

- розробити архітектурну типологію і конструкції тонкостінних елементів типових деталей будівель і споруд для технології 3D-друку;

- розробити склади матеріалів, дослідити властивості і визначити необхідні технологічні і будівельно-технічні властивості стосовно технології 3D-друку;

- запропонувати або удосконалити технологічне обладнання, машини і механізми, схеми технологічних процесів для будівництва методом 3D-друку;

- обґрунтувати вибір програмних продуктів для цифрового моделювання, елементної бази для управління технологічними процесами 3D-принту;

- створити методи контролю якості матеріалів, технологічних процесів, конструкцій, об'єктів будівництва на всіх стадіях життєвого циклу, розробити нормативно-технічну базу для трансферу технології 3D-друку в практику будівництва;

- провести експериментальні дослідження натурних конструкцій, виготовлених методом 3D-друку;

- дослідити техніко-економічні і екологічні характеристики об'єктів будівництва з використанням технології 3D – друку.

1. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ 3Д ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

1.1. Історія розвитку технології 3Д друку

Попередником технології 3Д-друку можна вважати технологію висіву (1950–1995) [67]. Роботизовані муровані кладки були концептуалізовані та досліджені в 1950-х роках, і пов'язаний з цим розвиток технологій автоматизованого будівництва розпочався в 1960-х роках з пінобетонних і ізоціанатних пін [6]. Розробка автоматизованого виготовлення цілих будівель із застосуванням методів формування ковзання та роботизованого складання компонентів, схожих на 3D-друк, була запроваджена в Японії у 1980-х та 1990-х роках [7]. Багато з цих ранніх підходів до автоматизації на майданчику створено через будівельні затори, нездатність відповісти на нові архітектурні задачі та проблеми подачі та підготовки матеріалів на будівельні майданчики у забудованих районах.

Ранні розробки (1995–2000 років) та дослідження будівництва за технологією 3D-друку ведуться з 1995 р. Винайдені два методи, один з яких (Джозеф Пегна - Joseph Pegna) [8] був зосереджений на техніці формування піску / цементу, яка використовувала пар для з'єднання матеріалу в шарах або твердих частинах. Правда, ця методика ніколи не була продемонстрована.

Друга техніка, «Контурне ремесло» Бехрока Хошневіса (Behrohk Khoshnevis), спочатку почалася як новий метод екструзії та формоутворення кераміки, як альтернатива новим технологіям 3D-полімеру з полімеру та металу, і була запатентована в 1995 році [9].

Перша генерація розвитку технології 3 D –друку охоплює період 2000–2010 років.

У 2003 році Руперт Суар (Rupert Soar) забезпечив фінансування та створив будівельну групу в Університеті Лафборо (Loughborough University),

Великобританія, щоб вивчити потенціал для збільшення масштабів існуючих технологій 3D-друку для будівельних застосувань. Рання робота визначила завдання досягнення беззбитковості для технології в масштабах реального будівництва. У 2005 році група забезпечила фінансування конструювання масштабної будівельної машини для 3D-друку, використовуючи відомі технологічні компоненти (перекачування бетону, торкрет-бетон, козлові системи), щоб дослідити, наскільки складними можуть бути такі компоненти та відповідати вимогам реального будівництва.

У 2005 році Енріко Діні, Італія, запатентував технологію D-Shape, застосувавши широкомасштабну техніку струменя / склеювання порошку на площі приблизно 6м х 6м х 3м [10]. Ця методика, хоча спочатку була розроблена за допомогою системи зв'язування епоксидної смоли, пізніше була адаптована до використання неорганічних в’яжучих речовин [8]. Ця технологія комерційно використовується для цілого ряду проектів у будівництві та інших галузях [8].

У 2008 році в Університеті Лафборо, Великобританія, розпочався 3D-бетонний друк на чолі з Річардом Басвеллом (Richard Buswell) та його колегами, щоб розширити попередні дослідження групи та розглянути комерційні програми, що переходять від козлової технології [8] до промислового робота, який їм вдалося ліцензувати в шведській девелоперській компанії Сканська у 2014 році.

Друге покоління технології 3 D - друку розвивається з 2010 і по сьогодні. В 2015 році технологія отримала подальшу популяризацію у пресі, де висвітлювалися 2 будинки - це вілла в стилі особняка та пятиповерхова вежа з використанням 3D-друкованих компонентів [11]. Будівлі виготовлялися як із збірних, так і з 3D-друкованих компонентів. У травні 2016 року в Дубаї відкрили нову "офісну будівлю" [12] площею 250 квадратних метрів - це те, що проект «Музей майбутнього Дубая» називає першою в світі офісною будівлею, виконану методом 3D-друку. У 2017 році

було оголошено амбітний проект зі створення 3D-друкованого хмарочоса в Об’єднаних Арабських Еміратах [13].

Запатентована в Великобританії технологія FreeFAB Wax ™ [14], винайдена Джеймсом Б Гардінером (James B Gardiner) та Стівеном Янссеном (Steven Janssen) у будівельній компанії Laing O'Rourke розробляється з 2013 року [15]. Техніка використовує будівельний 3D-друк для друку великих обсягів інженерного воску (до 400 л / год) для виготовлення «швидкої та грубої» 3D-друкованої форми для збірного бетону, фібробетону зі скловолокном (GRC) та інших матеріалів, які можна розпорошувати / відливати матеріали. Потім поверхня лиття під тиском розмелюється, видаляючи приблизно 5 мм воску для створення високоякісної форми (приблизна шорсткість поверхні 20 мкм) [16]. Після затвердіння компонента прес-форми або подрібнюється, або розплавляється і віск фільтрується та використовується повторно, що значно скорочує відходи порівняно зі звичайними технологіями. Переваги технології полягають у високій швидкості виготовлення прес - форм, підвищенні ефективності виробництва, зменшенні використання робочої сили та зменшенні відходів шляхом повторного використання матеріалів для прес - форм у порівнянні зі звичайними технологіями формоутворення [17].

Інженерний корпус армії США, Центр інженерно-дослідницьких розробок під керівництвом будівельної інженерно-дослідної лабораторії (ERDC - CERL) в Шампані, штат Іллінойс, США, розпочав дослідження з розгортання технологій 3D-принтерів для будівництва з вересня 2015 року. Пілотний проект «Автоматизоване будівництво для експедиційних структур» (ACES) був зосереджений на конкретному 3D-друкуванні та охопив широкий спектр наукових напрямів. Теми включали системи друку, матеріали для бетонного друку, конструктивне проектування та випробування та методи будівництва. Проектом ACES було проведено 3 демонстрації: пункт контролю в'їзду [18], перша бетонна казарма [19] та друк цивільної та військової інфраструктури (шлагбауми, стіни, водостоки, бункери та бойова

позиція) в експериментах з підтримки, утримання та захисту армії США [20]. У 2017 році ERDC - CERL почав співпрацювати з морською піхотою США, в результаті чого вперше продемонстрували виконані військовими особами за технологією 3D-друку структурно вдосконалену армовану 3D-друковану бетонну казарму [21, 22], перший 3D-друкований міст в Америці [23] та першу демонстрацію друку 3-дюймовою насадкою [24]. Завдяки цій роботі ERDC та морські піхотинці змогли перевірити конструктивні показники армованих 3D-друкованих бетонних стінових збірок та мостових балок, стійкість та цикли обслуговування друку, розширених операцій друку, оприлюднених 24 - годинних вимог щодо будівництва [25] та розробити життєздатне підсилення та методи будівництва з використанням загальноприйнятих практик. Робота ERDC перевершила готовність та життєздатність розгорнутої технології 3D-друку з точки зору навчання персоналу та бездоганної експлуатації, транспорту та мобільності принтерів, розширеного використання системи, друку в умовах різної погоди, нерівномірного поверхневого друку, доступних місцевих матеріалів та будівельних практик.

Компанія MX3D Metal, заснована Лорісом Яарманом (Loris Jaarman) та командою, розробила дві роботизовані системи шестиосного 3D-друку. Перша використовує термопластик методом екструзії, зокрема ця система дозволяє виготовляти будь які форми. Друга - це система, яка спирається на адитивне зварювання (по суті точкове зварювання на попередніх точкових зварних швах). Технологія адитивного зварювання в минулому розроблялася різними групами, проте система MX3D є найбільш досконалою на сьогоднішній день. В даний час MX3D працює над виготовленням та встановленням металевого мосту в Амстердамі [26].

BetAbram - це простий 3D-принтер для екструзії бетону розроблений в Словенії. Ця система доступна комерційно, пропонуючи споживачам 3 моделі (P3, P2 та P1) з 2013 року. Найбільший P1 може друкувати об’єкти розміром до 16м х 9м х 2,5м [27]. 3D-принтер для бетону [28] - це технологія

нанесення бетону, встановлена в козловій конфігурації і використовує легку козлову конструкцію типу ферми. Ця технологія була використана для виготовлення замку [29] та готельного номера на Філіппінах [30].

Перше в світі серійне виробництво будівельних принтерів було розпочато компанією SPECAVIA, що базується в Ярославлі (Росія). У травні 2015 року компанія представила першу модель будівельного 3 D -принтера та оголосила про початок продажів. Станом на початок 2018 року група компаній «АМТ-СПЕСАВІЯ» випускає 7 моделей принтерів портального будівництва: від малого формату (для друку малих архітектурних форм) до широкомасштабних (для друку будівель до 3 поверхів) принтерів. Сьогодні будівельні 3D-принтери російського виробництва під торговою маркою "АМТ" працюють у кількох країнах, у тому числі, у серпні 2017 року в Європу було доставлено перший будівельний принтер - для 3DPrinthuset (Данія). Цей принтер був використаний Копенгагеном для будівництва першої в ЄС друкованої будівлі (офіс-готель площею 50 м^2).

XtreeE розробила багатокомпонентну систему друку, встановлену на 6 – осній роботизованій руці. Проект розпочався в липні 2015 року і може похвалитися співпрацею та інвестиціями від сильних імен у будівельній галузі, таких як Сен-Гобен, Вінчі, [36] та Лафарж [31]. 3DPrinthuset, успішний датський стартап 3DPrinting, також розгорнувся в будівництві зі своєю дочірньою компанією COBOD International, яка в жовтні 2017 року зробила власний принтер на базі порталу. Завдяки співпраці сильних імен у скандинавському регіоні, таких як NCC та Force Technology, компанія, що займається прямою торгівлею, швидко набрала силу, побудувавши перший в Європі 3D-друкований будинок. Проект "Будівля на вимогу" (BOD) - це невеликий офісний готель у Копенгагені, район Нордхавн, стіни та частина фундаменту повністю надруковані, а решта конструкцій виконані у традиційному будівництві. Станом на листопад 2017 року будівля перебуває на завершальній фазі, тоді як усі 3DPrinted деталі повністю закінчені [32].

SQ4D був визнаний найкращим 3D-будівельником домогосподарств 2019 року, першим у своєму роді необмеженим дизайнером об’ємів 9.1 x 4.4 x ∞ зі Сполучених Штатів [33]. S-Squared 3D Printers Inc - компанія з виготовлення та роздрібної торгівлі 3D - принтером, що базується в Лонг-Айленді, Нью-Йорк. Компанія була заснована в 2014 році і виготовляє 3D-принтери для любителів, бібліотек та програм STEM. У 2017 році компанія запустила новий підрозділ, S-Squared 4D Commercial, щоб будувати будинки та комерційні будівлі з їх 3D-друкарською установкою під назвою Автономна робототехнічна система будівництва (ARCS) [34]. Ця компанія, заснована Робертом Сміт та Маріо Щепанскі і має 13 співробітників [35, 36].

Автономна робототехнічна система будівництва (ARCS) - це екологічно чистий бетонний принтер розміром 20 футів на 40 футів, який зможе побудувати будинок 1490 квадратних футів за 36 годин [37, 38]. Система може будувати будинки, комерційні будівлі, дороги та мости [39]. ARCS може виконати проекти від 500 квадратних футів до більше мільйона квадратних футів [40, 41].

1.2. Технології 3D- друку в будівництві

3D-друкування (3D-принтинг) - це процес відтворення реального об'єкту за зразком 3D-моделі призначення [42 … 45] (рис. 1.1). На відміну від звичайного принтера, який виводить інформацію на аркуш паперу, 3D-принтер дозволяє виводити тривимірну інформацію, тобто створювати певні фізичні об'єкти. У основі технології 3D-друкування лежить принцип пошарового створення (вирощування) твердої моделі. 3D-друкування може здійснюватися різними способами і з використанням різних матеріалів, але в основі будь-якого з них лежить принцип пошарового створення (вирощування) твердого об'єкту. На даний момент 3D-принтер знаходить своє застосування у багатьох сферах виробництва [46…52]: елементи машинобудування, різноманітні макети, елементи інтер'єру, різні деталі (рис.

1.2). У будівництві 3D-друк вимагає, як уже зазначалося, створення технологій, ефективного устаткування, нормативної бази.

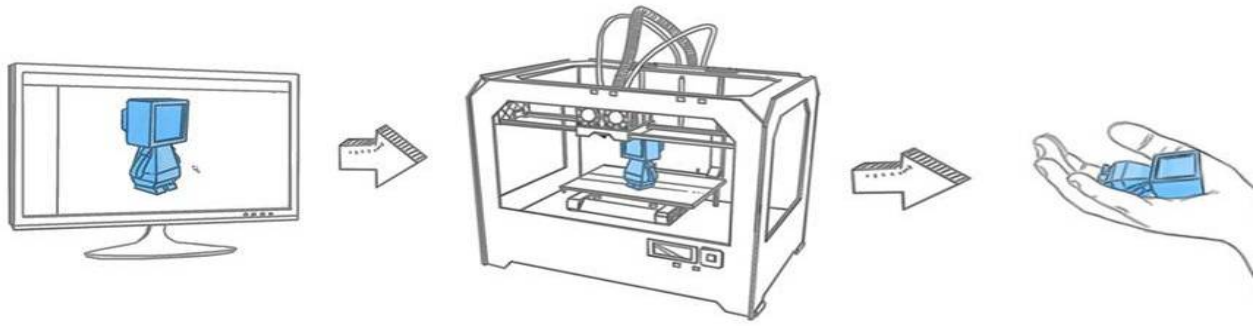


Рис. 1.1. Етапи 3D- друку фізичного об’єкту



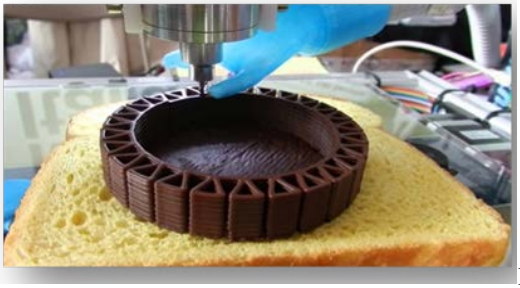
а)



б)



в)



г)



д)



е)

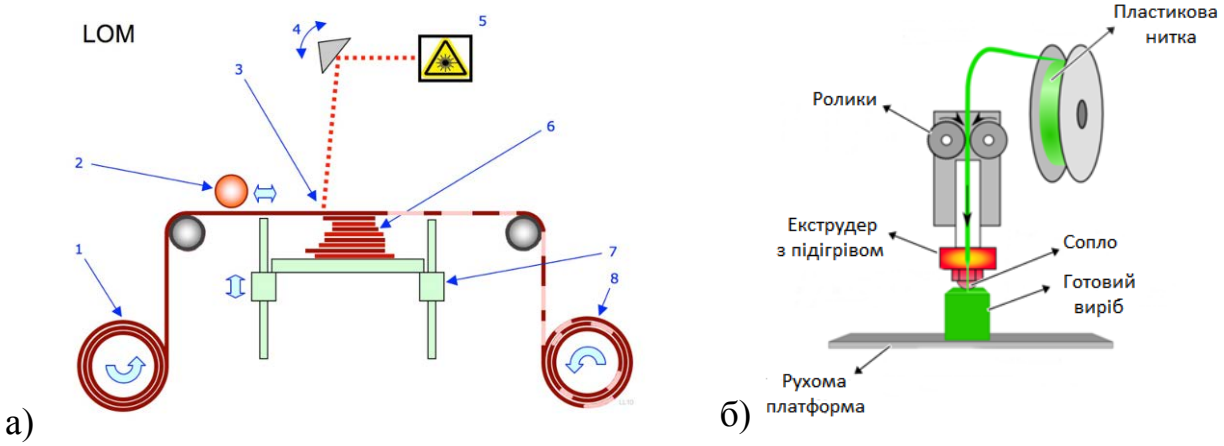
Рис. 1.2. Використання 3D- друку в промисловості:

а) – машинобудування; б) – медицина; в) –військова справа; г) -харчова; д) – архітектура; е) –дизайн

До основних технологій 3D-друку відносяться:

-*пошарове виробництво об'єкта,* яке полягає в розкроюванні променем лазера листових різноманітних матеріалів (папір, ламінат, металева фольга, кераміка), а потім нагріваються валики та склеюють отримані шари один з одним (рис. 1.3, а). До недоліків можна віднести: грубу поверхню виробів, можливість розшарування і помилок при повному обсязі прорізаних аркушів (зіпсовані шари удаляють, роблять їх заново);

- *моделювання методом плавлення* - це технологія тривимірного друку, при якій створення об'єкта відбувається розплавленням нитки пластика, яка через екструдер подається на робочу поверхню і там застигає. Надрукувавши перший шар, робоча платформа спускається і процес починається заново (рис. 1.3, б).



а) б)

Рис. 1.3. 3D-принтери з технологією друку:

а) – пошарове виробництво об'єкта: 1 – фольга; 2 – ролик з підігрівом; 3 – лазерний промінь; 4 – скануюча призма; 5 – лазерний пристрій; 6 – шари; 7 – пересувна платформа; 8 – залишки; б) – моделювання методом плавлення

Це єдина технологія «вирощування» 3D-об'єктів, що використовує промислові термопластики, які можуть витримувати високу температуру і механічні навантаження. Пошарова побудова дозволяє отримувати деталі складної геометрії. У методу такі мінуси: пластик плавиться і поширюється

на всі боки, тому моделі мають виражену рельєфну поверхню, при обробці якої втрачається точність об'єкта;

- *стереолітографія* - це технологія тривимірного друку, при якій фотополимер в рідкому стані під дією світлового випромінювання лазера змінює свої фізичні властивості і твердне (рис. 1.4). Тривимірний об'єкт вирощується шар за шаром, товщина якого становить в середньому 0,1 мм, що забезпечує високу якість друку. Недоліками технології є значна вартість обладнання і мала швидкість друку (кілька міліметрів на годину);

- *селективне лазерне спікання* подібно попередньої технології, але сировиною є порошкоподібний термопластичний матеріал, який пошарово спікається лазером (рис. 1.5). Порошок в робочій камері розігрівається до температури, близької до плавлення, розрівнюється, і променем лазера на ньому промальовується необхідний контур. У місці контакту променя і порошку частки плавляться і спікається один з одним і з попереднім шаром. Потім платформа опускається на товщину одного шару, в камеру насипається новий шар порошку, розрівнюється, і процес повторюється. Технологія характеризується високою швидкістю друку (до 35 мм/год), але вимагає значного часу підготовки до роботи, для нагрівання порошку і стабілізації температури, а отримані моделі мають пористу і шорстку структуру;

- *стереоскопічний друк*–метод, який базується на струменевої технології. Принтери подібної конструкції забезпечуються двома інгредієнтами порошкоподібної маси і рідкою речовиною (рис. 1.6).

Робоча камера кожного принтера складається з двох частин: першої частиною є камера подачі порошку (в неї завантажується модельний матеріал), а друга - це камера побудови, в якій вирощується необхідна 3D-модель. Спочатку по всій площині камери побудови рівномірно розподіляється потрібний матеріал. Потім на тонкий перший шар наноситься спеціальне сполучна речовина, яка склеює всі частки матеріалу між собою. Після того, як на платформі був нанесений клей, вони зміщуються. При цьому платформа подає камери вгору, а платформа області побудови

опускається вниз. Зсув повинен відбуватися на однакову висоту. Відразу ж після зсуву головка знову починає свій рух, нарощуючи модель.

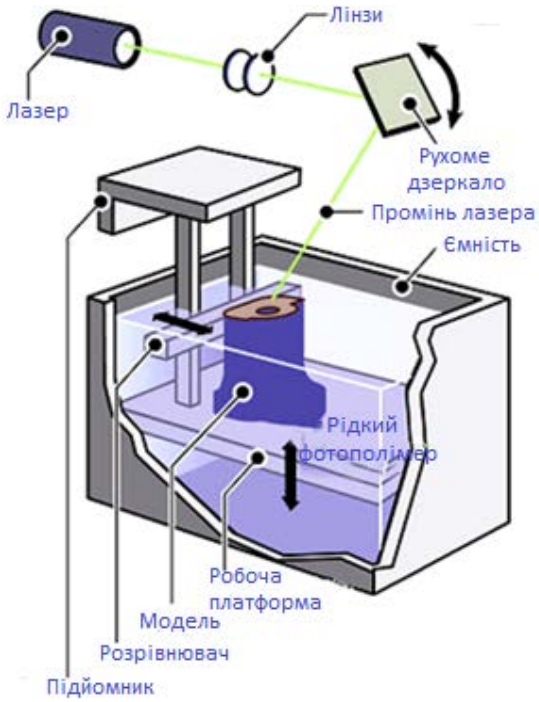


Рис. 1.4. 3D-принтер з технологією друку лазерної стереолітографії

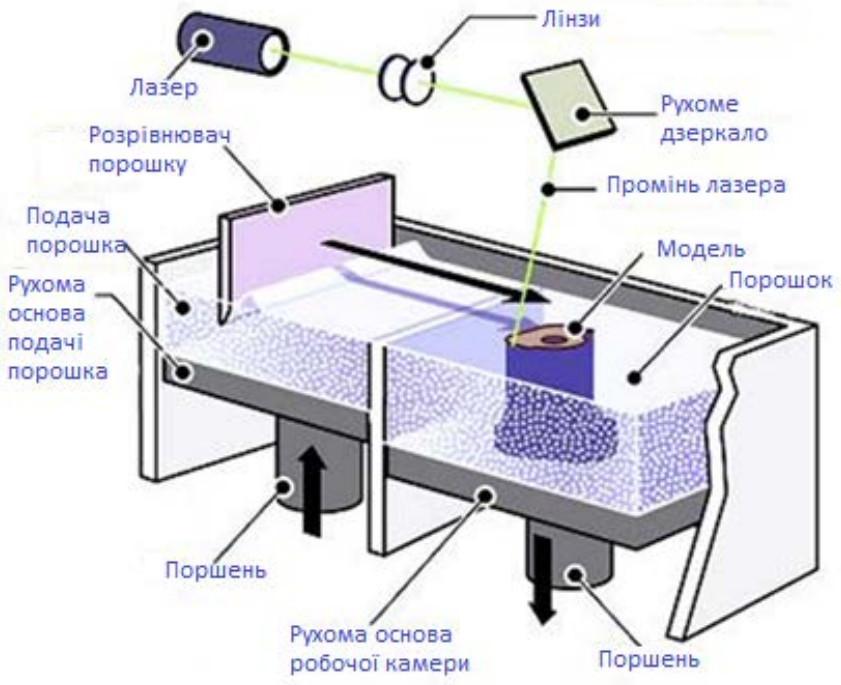


Рис. 1.5. 3D-принтер з технологією друку селективного лазерного спікання

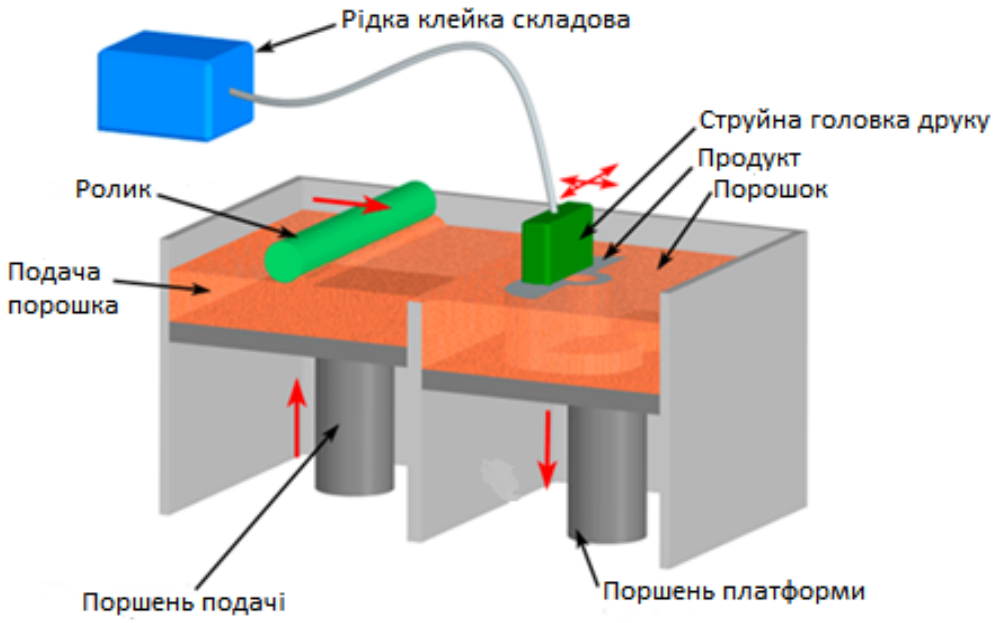


Рис. 1.6. 3D-принтер з технологією стереоскопічного друку

- *спікання фотополімера* - цей метод заснований на тому, що спеціальним тонером на скляній пластині повинен бути створений шаблон певної моделі (рис. 1.7). Над тонким шаром фотополімеру, який знаходиться на робочому столі, розміщується створена фотомаска, яка в подальшому повинна експонуватися ультрафіолетовою лампою. Відповідний використовуваному шаблоном шар фотополімеру твердне, а всі рідкі залишки при цьому видаляються.

На наступному етапі всі порожнини повинні бути заповнені розплавленим воском, який досить швидко застигає. Потім процес знову повторюється, але при цьому вже створюється шаблон для наступного шару. Перевагою технології є те, що процес в будь-який момент можна призупинити, а потім відновити з того ж місця (це актуально, коли потрібно видалити дефектні шари або забруднення). Принтер створює моделі з рушійними складовими частинами. Недоліки принтера: значний шум і велика маса; постійна присутність оператора.

У 2019 компанія J'son & Partners Consulting завершила підготовку аналізу поточної ситуації і перспектив застосування 3D друку в будівництві у

світі [52]. 3D друк в будівництві або будівельний 3D друк, також відомий як «адитивне виробництво для будівництва» або 3DCP, являє собою групу технологій, які для виготовлення будівель і будівельних компонентів використовують метод 3D-друку, а саме: послідовне виготовлення об'єктів шар за шаром за цифровою (комп'ютерною, CAD) 3D моделлю з використанням різних матеріалів, в тому числі бетону. Це відкриває широкі перспективи для зміни звичної архітектури та геометричних форм.

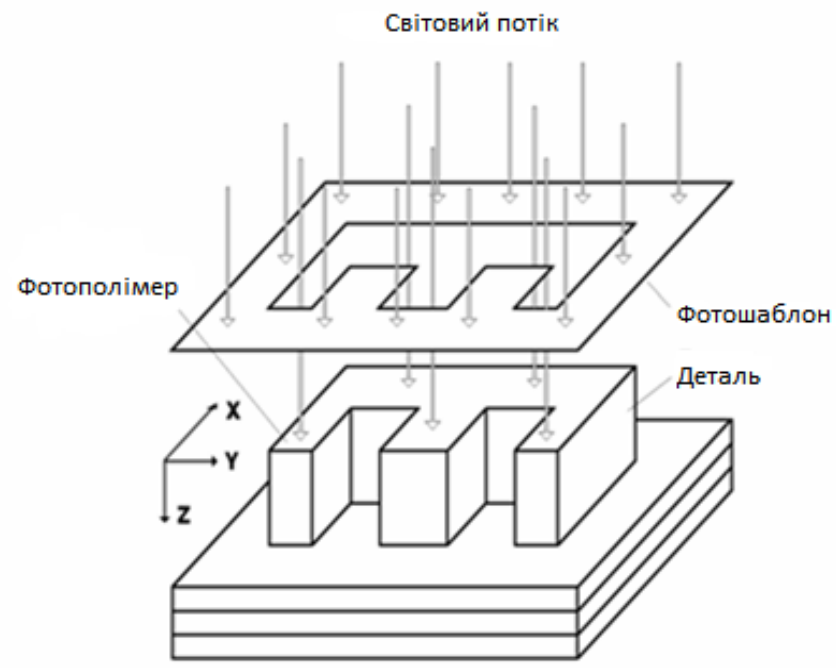


Рис. 1.7. 3D-принтер з технологією друку спіканням фотополімера

Прогнозується, що найбільш швидкозростаючим сегментом ринку 3D друку стане житлове будівництво. Головними факторами зростання ринку є попит на доступну вартість друкованих житлових будинків і можливість створювати складні архітектурні конструкції за невисокою ціною.

Сьогодні для 3D друку використовуються наступні матеріали: бетон, пластик, метал, кераміка та ін. За видами продукції 3D друку ринок можна розділити на: стіни, дахи, підлога, сходи та ін. Стіни з 3D-друком з бетону є однією з найбільш важливих конструкцій, які виготовляються заздалегідь на місці або на заводі.

У 2017 році на ринку 3D друку бетоном в вартісному вираженні домінувала Європа (включаючи російський ринок). Очікується, що в період з 2018 по 2023 рік самим швидкозростаючим ринком 3D друку бетоном стане Близький Схід, де будівельний друк стимулюється високими витратами на робочу силу і попитом на доступні будинку серед груп із середнім і низьким рівнем доходу, а також підтримується ініціативами уряду [52].

У звіті компанії J'son & Partners Consulting розглядаються переваги і недоліки використання 3D друку в будівництві. Відзначається також, що типове будівництво в 3D друку ще не почалося. Бібліотек готових технічних рішень поки не існує, або майже не існує. Загальна усереднена статистика поки не склалася - всі роздруковані будівлі є унікальними. Тому і економіка будівництва поки не передбачувана. Серед факторів адитивного виробництва є і зберігаючі (ефективні), є і витратні. Тому, будь-яке будівництво із застосуванням 3D друку сьогодні - це дослідно-експериментальний майданчик набору знань і практичних навичок в застосуванні всього різноманіття адитивного виробництва в будівництві. Поточні сфери використання 3DCP в світі:

- архітектурні макети і моделі;
- предмети інтер'єру та меблі, малі архітектурні форми;
- будівельні конструкційні елементи (друк і укладання цегли, друк блоків, друк скла, «цифрової» деревини, композитів, балки, каркаси;
- виготовлення підлог;
- складні фасади, корпуси для зовнішніх конструкцій;
- друк несучих і не несучих стін, а також лінійних об'єктів;
- друк як великих будівель, так і цілком нескладних споруд;
- класичний 3D друк в будівництві - друк металом, пластиком, полімерами, піском;
- друк мостів;
- 3D - друк труб при прокладанні тунелів під землею.

Будівельний 3D- принтер використовує технологію екструдування, при якій кожен новий шар будівельного матеріалу видавлюється з принтера поверх попереднього (рис. 1.8).

У будівництві використовують наступні технологічні схеми 3D-друкування:

- друкують будівлю повністю (рис. 1.9, а, б);

- друкують окремі конструктивні елементи (рис. 1.9, в), а також макети будівель з реальних будівельних матеріалів та елементи ландшафтного дизайну (рис. 1.9, д, е). Застосування принтерів для друку окремих елементів конструкцій в умовах виробництва дозволяє виключити сезонність будівництва, тобто друкувати частини будівель, витримувати їх в складських приміщеннях до набору міцності бетону і після цього збирати їх в будівлю на будівельному майданчику (рис. 1.9, г).

а) б) в)

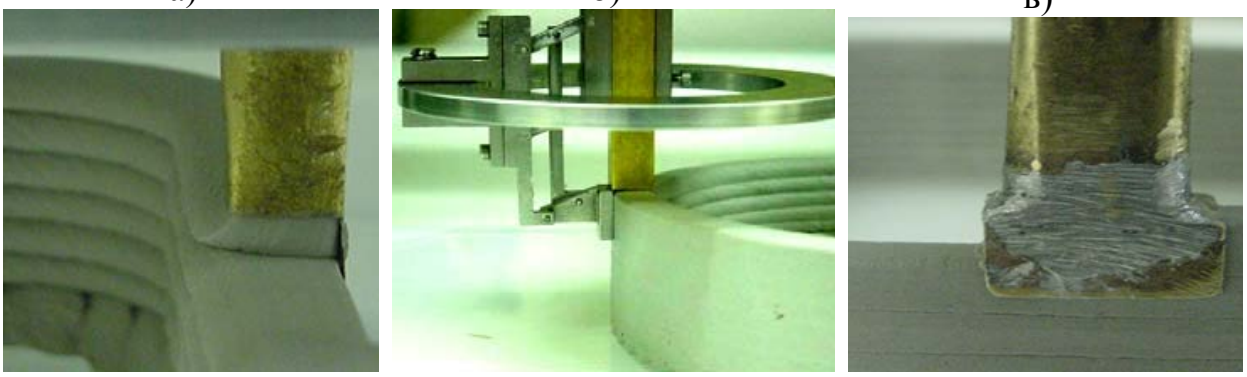


Рис. 1.8. Процес друкування об’єкта:
а, в – переміщення екструдера; б – головка принтера

Можливо використання комбінованої схеми 3D- друкування, коли будують будівлю, а частину конструкцій виготовляють окремо та транспортують їх на будівельний майданчик.

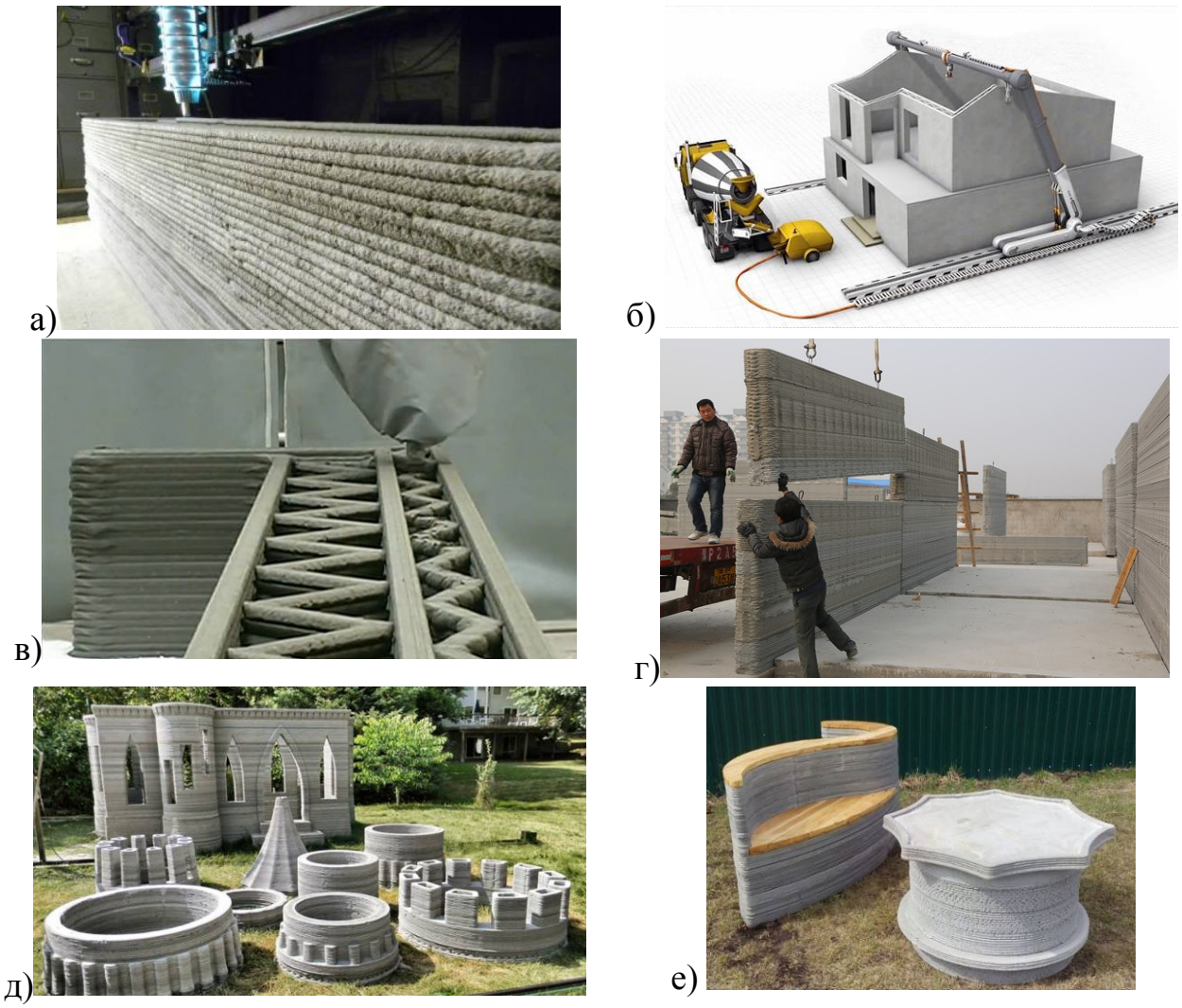


Рис. 1.9. 3D- друкування будівельних об'єктів:

а), б) – зведення будівлі; в) – друкування конструкцій; г) – монтаж друкованих будівельних конструкцій; д) – макети будівель; е) – елементи ландшафтного дизайну

1.3. 3D принтери

В табл. 1.1. приведені дані про найкращі в 2020 році за версією [69] будівельні 3 D принтери.

Таблиця 1.1.

Будівельні 3 D принтери

Компанія або принтер	Тип	Розмір будівельний	Країна
BetAbram P1 (рис. 1.10)	козлова система	16 x 8.2 x 2.5	Словенія
COBOD BOD2 (рис. 1.11, а)	козлова система	14.62 x 50.52 x 8.14	Данія
Constructions-3D 3D Constructor (рис. 1.11, б)	робототехнічна рука	13 x 13 x 3.8	Франція
CyBe Construction CyBe RC 3Dp (рис. 1.12, а)	робототехнічна рука	2.75 x 2.75 x 2.75	Нідерланди
ICON Vulcan II (рис. 1.12, б)	козлова система	2.6 x 8.5 x ∞	США
MudBots 3D Concrete Printer (рис. 1.13, а)	козлова система	1.83 x 1.83 x 1.22	США
Total Kustom StroyBot 6.2 (рис. 1.13, б)	козлова система	10 x 15 x 6	США
WASP Crane WASP (рис. 1.14, а)	дельта система	Ø 6.3 x 3	Італія
Apis Cor (проект) (рис. 1.14, б)	робототехнічна рука	8.5 x 1.6 x 1.5	РФ
Batiprint3D 3D printer (проект)	робототехнічна рука	до 7 м висоти	Франція
S-Squared ARCS VVS NEPTUNE (проект)	козлова система	9.1 x 4.4 x ∞	США
Contour Crafting (за замовленням	Козлова система	-	США
XtreeE	робототехнічна рука	-	Франція

Компанія-розробник BetAbram (Словенія) [68] представляє лінійку друкуючих механізмів, що складається з 3 моделей принтерів, які відрізняються габаритними розмірами: BetAbram P3, BetAbram P2, BetAbram P1.

Висота апарату BetAbram P3 досягає 2 м. Конструкція моделі дозволяє друкуючій голівці без особливих труднощів переміщатися в горизонтальній і вертикальній площинах завдяки рейкової системі пересування. При цьому довжина майбутнього будинку обмежена граничною довжиною в 4 м, а його ширина складає 3 м. Для більшого за розмірами будівництва застосовується принтер BetAbram P2, здатний створити конструкцію довжиною 12 і шириною 6 метрів. Найсерйозніший представник модельного ряду - BetAbram P1, який готовий сконструювати приміщення габаритами 16 х 9 м. В таблиці 1.2. наведені порівняльні характеристики моделей BetAram.

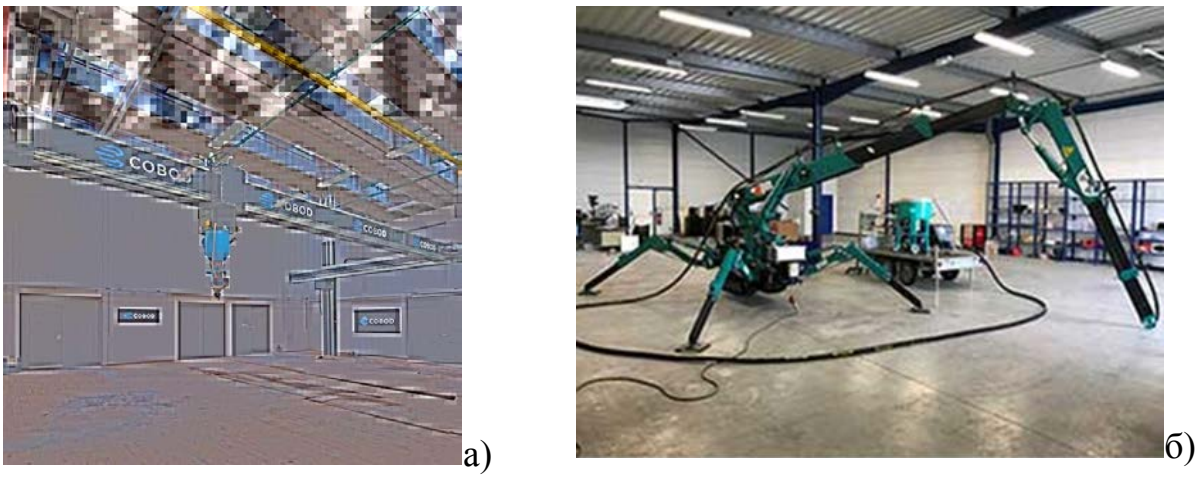
Таблиця 1.2.

Характеристики принтерів BetAbram

Серія	Розмір, м	Маса кг	Споживання, В	Потужність кВт	Швидкість, см/с	Діаметр стац. сопла, см	Діаметр оберт. сопла см	Витрати екструдеру, $м^3$/год	Додавання бетон. насосу, бар	Додавання повітря, бар
P3	4*3*2,5	180	380	3	15	3	3	1	20	5
P2	12*6*2,5	450	380	4	10	3	4	1	20	5
P1	16*9*2,5	490	380	11	10	3	4	1	20	5

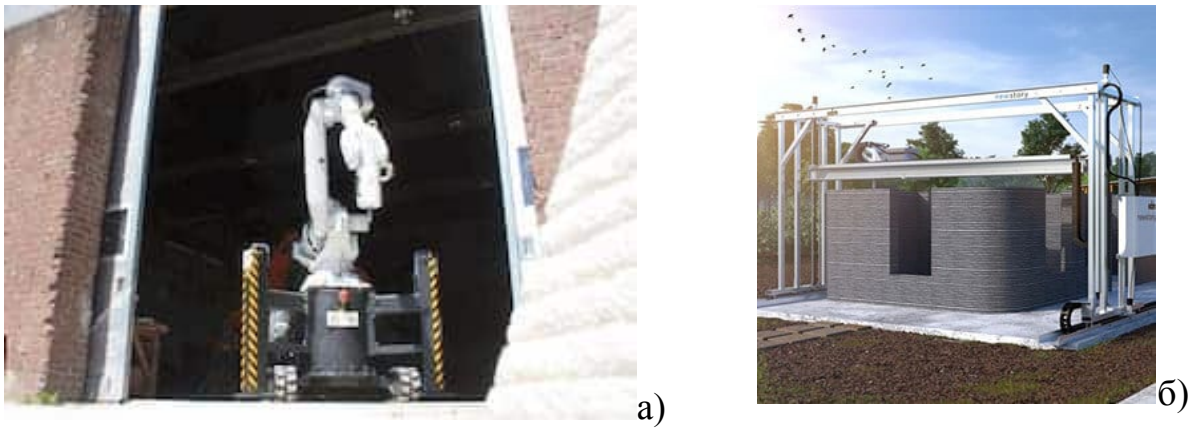


Рис. 1.10. Будівельний 3D принтер BetAbram P1



а) б)

Рис.1.11. Будівельні 3D принтери: а) COBOD BOD2; б) Constructions-3D 3D Constructor



а) б)

Рис. 1.12. Будівельні 3D принтери: а) CyBe Construction CyBe RC 3Dp; б) ICON Vulcan II



а) б)

Рис.1.13. Будівельні 3D принтери: а) MudBots 3D Concrete Printer;
б) Total Kustom StroyBot 6.2



а) б)

Рис.1.14. Будівельні 3D принтери: а) WASP Crane WASP;
б) Apis Cor


а)

б)

Рис.1.14. Будівельні 3D принтери: а) Batiprint3D 3D printer;
б) S-Squared ARCS VVS NEPTUNE

Велику лінійку принтерів для 3D друку представляє російська компанія «Спецавіа». Модель принтера S-1160 великого формату дозволяє друкувати бетоном будівлі розміром близько 280 м³. Для друку будинків він встановлюється прямо на будівельному майданчику (рис. 1.14, а). Для друку панелей і окремих елементів будівель принтер може бути встановлений в цеху (рис. 1.14, б). Принтер S-1160 друкує стандартними складами на основі цементу марки М500. Можна застосовувати суміші з мінеральними добавками і фіброволокном.


а)

б)

Рис. 1.14. Будівельні 3D принтери тривимірного друку S-1160, що встановлені: а) на будівельному майданчику; б) в цеху.

Принтер тривимірного друку(3D) S-4063 - перший з розроблених малоформатних принтерів, що дозволяють друкувати бетоном різні елементи для будинків, альтанок, всілякі ландшафтні споруди (рис. 1.15, а). Принтер S-4063 оснащений потужними приводами, що дозволяють швидко і точно переміщувати друкуючу головку з накопичувачем від 18 до 32 літрів. Крокові двигуни з циліндричними редукторами і інші комплектуючі - для професійного обладнання та розраховані для виробничого використання. Принтер не випускається серійно. Він служить прототипом до створення наступної моделі в лінійці принтерів серії S - принтеру S-6043 і S-6044. Дана модель працює з дрібнодісперснимі сумішами, товщина друкованого шару менше ніж в інших моделях.

Принтер будівельний тривимірного друку (3D) S-6043 дозволяє надрукувати бетоном елементи для будинку, альтанку, невеликий гараж, всілякі ландшафтні споруди, ставок, дитяче містечко або басейн (рис. 1.15, б). Він придатний і для друку печей, камінів, мангалів та інших вогнетривких виробів каоліновими сумішами. При цьому сам процес друку нічим не відрізняється від друку, наприклад, предметів садового інтер'єру цементними складами.


а)


б)

Рис. 1.15. Будівельні 3D принтери тривимірного друку: а) S-4063; б) S-6043.

Принтер S-6044 - нова модель малоформатних принтерів серії S, що дозволяє друкувати бетоном малі форми розміром близько 12 куб.м, тобто різні елементи для житлових будинків, альтанок, всілякі ландшафтні споруди, невеликий ставок, дитяче містечко або басейн (рис. 1.15). Він придатний і для друку печей, камінів, мангалів та інших вогнетривких виробів каоліновими сумішами. Розроблено на базі принтера S-4063.

Принтер S-6044 LONG - модель малоформатних принтерів серії S, створена на базі принтера S-6044 зі збільшеним робочим полем, що дозволяє друкувати бетоном різні елементи для житлових будинків і будь-які малі форми розміром до 36 куб.м. Всі без винятку принтери проходять контрольне збирання на підприємстві. Устаткування поставляється вам в налагодженому стані, перевіреним на працездатність.

Нова модель принтера S-6045 з великою кількістю можливостей і розширеної комплектації. Принтер S-6045 - поліпшена модель малоформатних принтерів серії S, розроблена на базі S-6043 дозволяє друкувати різними за складом бетонами, в тому числі стандартними складами на основі цементу М500, тобто тим, що є у вільному продажу на будь-якому будівельному ринку і використовувати суміші з мінеральними добавками і фіброволокном (рис. 1.15, б). Принтер придатний для друку малих форм розміром близько 12 куб.м.

Комплектуючі для принтера (рейкові направляючі і крокові двигуни) європейського виробництва. У базовій комплектації принтер оснащений трьома друкуючими головками, розрахованими на друку різними складами. У комплект входить розчинна мішалка і мийка високого тиску. В інструкції з експлуатації є технологічні регламенти на суміші. А так само додається бібліотека готових файлів з різними елементами ландшафтного дизайну і елементами будівель.

В таблиці 1.3 наведені характеристики принтерів компанії «Спецавіа» (Росія).



а) б)

Рис. 1.15. Будівельні 3D принтери тривимірного друку: а) S-6044.; б) S-6045.

Будівельний 3D - принтер KamerMaker (RoomBuilder) (Amsterdam, Netherlands) є першим пересувним павільйоном в світі, який може друкувати в 3D цілі кімнати з пластика (рис. 1.16). Його технологія 3D-друку заснована на збільшеній друкарській машині Ultimaker. Ця машина може друкувати 3D-об'єкти, використовуючи біо-пластмаси і пластики. Так само, як її молодший брат, Ultimaker, KamerMaker може друкувати невеликі інтер'єри, розміром до 2,0 м (ширина) x 2,0 м (довжина) x 3,5 м (висота). Крім того, в самому центрі Амстердама, і розташовано будівельний майданчик KamerMaker.

KamerMaker є першим пересувним павільйоном в світі, який може друкувати в 3D цілі кімнати з пластика. Його технологія 3D-друку заснована на збільшеній друкарській машині Ultimaker. Ця машина може друкувати 3D-об'єкти, використовуючи біо-пластмаси і пластики. Так само, як її молодший брат, Ultimaker, KamerMaker може друкувати невеликі інтер'єри, розміром до 2,0 м (ширина) x 2,0 м (довжина) x 3,5 м (висота). Крім того, в самому центрі Амстердама, і розташовано будівельний майданчик KamerMaker.

Таблиця 1.3.

Характеристики принтерів компанії «Спецавіа» (Росія)

	S-1160	S-4063	S-6043	S-6044	S-6044 LONG	S-6045
Довжина, мм	12 000	4100	4100	4100	4100	4100
Ширина, мм	12 300	6000	4700	4700	9000	4700
Висота, мм	4 300	2500	2800	2800	3300	2800
Вага, кг	1800	620	700	670	920	670
Площа забудови, м^2	110	18	12,6	12,6	36	12,6
Робоча швидкість, м/хв	9	8	9	9	9	9
Робоча зона, м	10 х 11 х 2,7	3,5 х 5,2 х 1	3,5 х 3,6 х 1	3,5 х 3,6 х 1	3,5 х 8 х 1,5	3,5 х 3,6 х 1
Швидкість позиціонування, м/хв.	12	12	12	12	12	12
Точність позиціонування, мм	2	1	2	2	2	2
Споживча потужність, кВт	3,5	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5
Розмір друкуємого шару, мм (висота, ширина)	10 х 30	8 х 20	10 х 30	10 х 30	10 х 30	8 х 20, 10 х 30
Витрати бетону, м3 на 1 кв.м стіни при 4-х шаровому друці	0,12	0,08	0,12	0,12	0,12	0,08 - 0,12



Рис. 1.16. Будівельний 3D - принтер KamerMaker (RoomBuilder).

KamerMaker відкритий для громадськості 4 дні на тиждень. Кожен може спостерігати за процесом тестування друкованих технік і внести свій вклад в процес будівництва з KamerMaker. Перша фінальна надрукована 3D - кімната була створена восени 2012 року.

Італійська компанія Centro Sviluppo Progetti в рамках проект WASP (World's Advanced Saving Project) створила будівельний 3D-принтер The BigDelta. Діаметр каркасу 3D-принтера The BigDelta становить 6 метрів, а у висоту він сягає 12 метрів (рис. 1.17). Для створення об'єктів принтером може використовуватися звичайна глина з добавками або звичайний бетон на основі цементу. Творці The BigDelta відзначають, що принтер здатний друкувати невеликі будинки цілком з підручних матеріалів, що робить його вкрай корисним у будівництві дешевого житла для бідних верств населення з урахуванням швидко зростаючого населення Землі. Також The BigDelta може застосовуватися в районах стихійного лиха, надрукувавши тимчасове житло для постраждалих.



Рис. 1.17. Будівельний 3D - принтер The BigDelta.

Китайська кампанія в Циндао презентувала на всесвітній конференції з технологій промислової друку найбільший в світі будівельний 3D - принтер.

Це масивна конструкція має обсяг збірки 12 м х 12 м х 12 м, він важить більше 120 тонн і був зібраний за допомогою кранів та інших машин (рис. 1.18).



Рис. 1.18. Будівельний 3D - принтер в Циндао.

1.4. Технологічні особливості обладнання 3D- друку будівель, споруд та елементів будівельних конструкцій

Принтери для 3D-друку мають різні габаритні розміри і масу, наприклад, принтер формату 12 х 12 метрів, призначений для друку елементів будівель, предметів ландшафтного дизайну висотою до 3 метрів - великогабаритна 120-тонна конструкція (рис. 1.18). Для друку окремих конструкцій в закритих приміщеннях застосовують малоформатні принтери з ємністю накопичувача головки 18 ... 32 літрів. На даному етапі конструкції принтерів (рис. 1.19, а, б, в) дозволяють створювати малоповерхові будівлі різних конфігурацій із застосуванням різних

будівельних сумішей, а також для друкування будівельних конструкцій та виробів [53, 54].

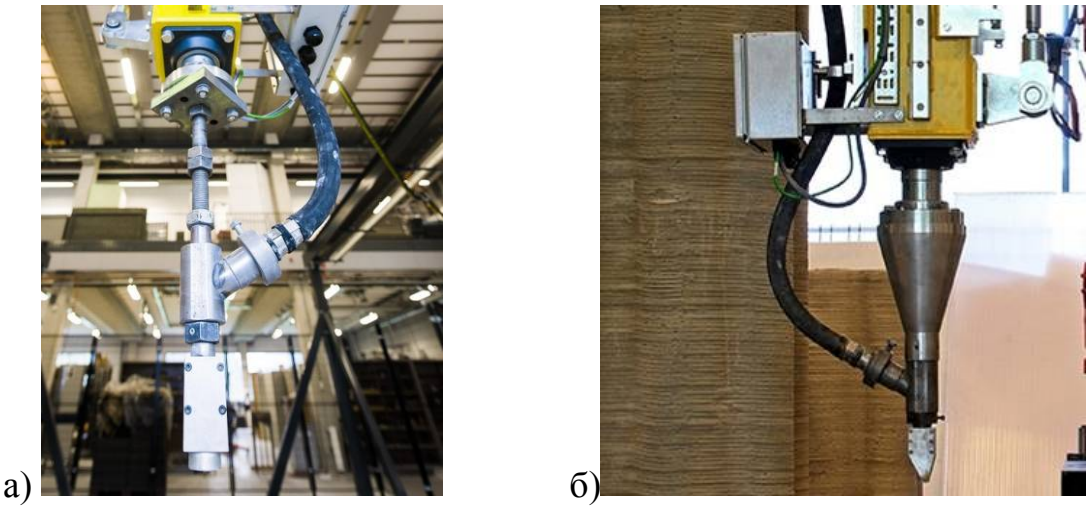


а) б) в)

Рис. 1.19. Будівельні принтери: а) – формату 4,1 х 2,5 метрів; б) – формату 8 х 12 метрів; в) – формату 6,2 х 3,5 метрів

Останнім часом почали випускати 3D- принтери з нагнітанням суміші у екструдер бетононасосами, що значно підвищило продуктивність друкування виробів (рис. 1.20).

На рисунку 1.21 показана організація сучасного виробництва будівельних елементів з подачею суміші від бетононасоса.



а) б)

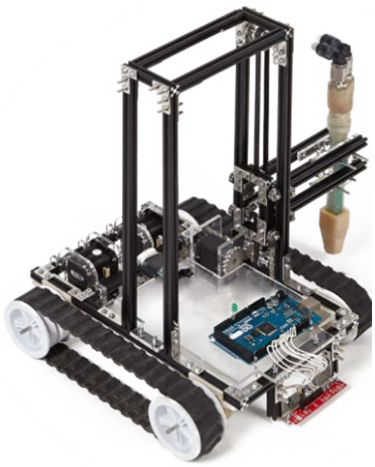
Рис. 1.20. Будівельні принтери з нагнітанням суміші у екструдер бетононасосами



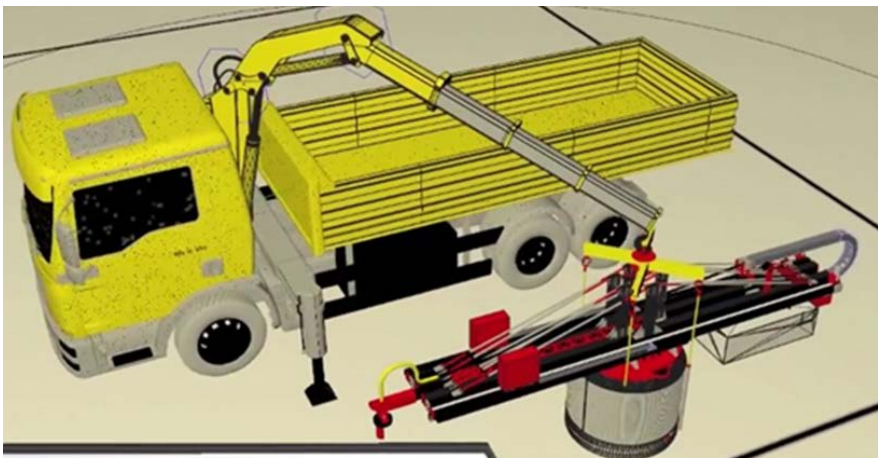
Рис. 1.21. Організація сучасного виробництва будівельних елементів

Перспективним напрямком розвитку 3D- принтерів є використання їх мобільних конструкцій – з ходовою частиною (рис. 1.22, а) та таких, що перевозяться транспортними засобами (рис. 1.22, б). Це дозволяє доставляти обладнання безпосередньо до місця зведення об’єкту та знизити транспортні витрати на доставку будівельних матеріалів.

Перед початком будівництва з використанням 3D-друку раціонально змоделювати форму споруди і відпрацювати технологічний процес друкування об'єкта (3D-моделювання). Це виконується обладнанням малого формату з використанням реальних будівельних сумішей, що дозволяє перевірити прийняті проектні архітектурно-конструктивні рішення. Реальні будівельні суміші на основі гіпсу використовують для друку моделі будівлі, а цементні суміші створюють вироби, призначені для експлуатації поза приміщеннями. На моделях відпрацьовують процес горизонтального і вертикального армування, установки каркасів всередину порожнин стін, прокладку комунікацій. Важливим аспектом є те, що надруковані зразки зручні для проведення лабораторних досліджень за тими чи іншими параметрами.



а)

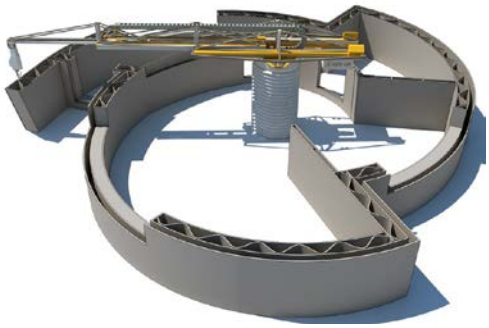


б)

Рис. 1.22. Будівельний принтер: а) з ходовою частиною;б) з перевезенням транспортним засобом

б)





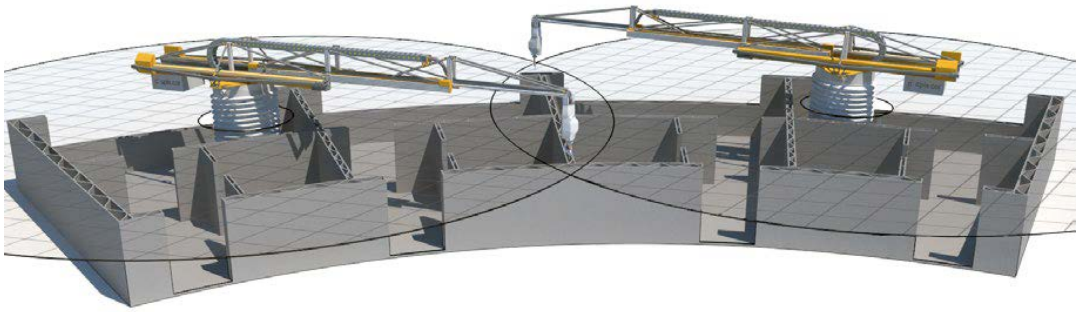
в)

Рис. 1.23. Мобільні будівельні принтери.

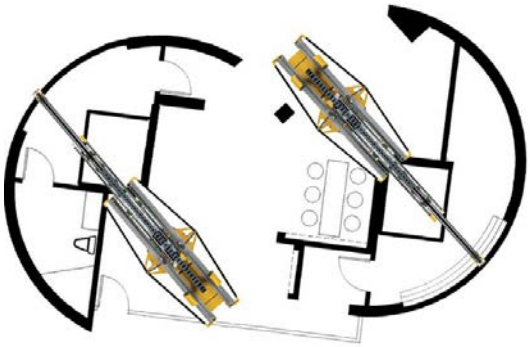
При використанні двох і більше синхронізованих між собою 3D - принтерів можливий друк будівель і споруд площею від декількох сотень до десятків тисяч квадратних метрів (рис. 1.24, а, б).

Для зведення висотних будівель та споруд планується використання самопідйомних принтерів (рис. 1.25, а), які піднімаються одночасно з будівництвом споруди. Крім друкування об’єктів, принтерами та додатковим обладнанням виконується монтаж будівельних конструкцій – перемичок та елементів перекриття (рис. 1.25, б). Таке обладнання оснащають

різноманітними робочими органами у вигляді маніпуляторів та захватів, які встановлюють на прольотні конструкції, що переміщуються у вздовж об’єкту.

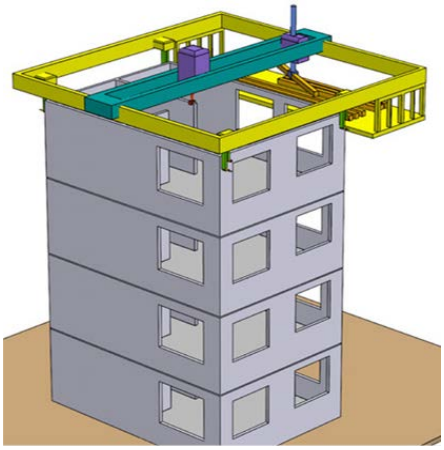


а)

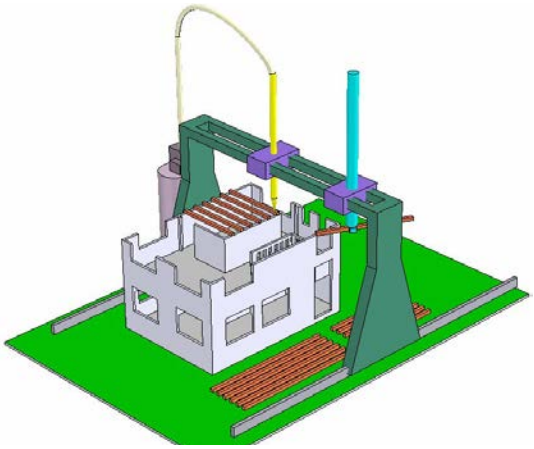


б)

Рис. 1.24. Використання декількох синхронізованих 3D- принтерів



а)



б)

Рис. 1.25. Будівельні принтери: а – самопідйомний; б – у вигляді маніпулятора

1.5. Удосконалення обладнання для 3D- друкування об’єктів

1.5.1. Модернізація машин для 3D- друку будівельних об’єктів

В основу технічного рішення поставлена задача вдосконалення обладнання [57], в якому за рахунок особливостей виконання візка та встановлення додаткових елементів досягається підвищення ефективності 3D - друку об’єктів при укладанні бетону. Обладнання містить рухому металеву конструкцію з опорами 1 і 2, мостом 3 та візком 4 (рис. 1.26).

На візку 4 з можливістю вертикального переміщення встановлена балка 5, платформа 6 та поворотний маніпулятор 7 з робочим телескопічним обладнанням 8 та головкою друку 9. У кабіні 10 маніпулятора 7 розташована система автоматичного комп’ютерного керування переміщенням головки друку та подачі до неї бетону. На балці 5 закріплені зубчаті рейки 11, які взаємодіють із шестернями 12 та приводом 13.

Кожна з опор 1 та 2 мають ходовий привід у вигляді гусеничних візків 14 та 15, встановлених на опорах через балансири. На нижньому поясі моста 3 встановлений вантажний візок 17 з гаковою підвіскою 18.

На поворотному маніпуляторі 7 встановлений приймальний бункер 19. На металевій конструкції закріплений трубопровід 20, за допомогою якого бетон подається від бетононасосу 21, що встановлюється поруч з опорами 1 та 2, у приймальний бункер 19 маніпулятора 7. У бетононасос 21 бетон доставляється з бетонних заводів бетоновозами 22.

Обладнання працює таким чином. Обладнання встановлюється у місці будівництва об’єкту. Переміщенням візка 4, балки 5 та платформи 6 маніпулятор 7 встановлюється на початкове положення подачі бетону. Робочим телескопічним обладнанням 8 та головкою друку 9 у відповідності до комп’ютерної програми виконується подача бетону та формування будівельного об’єкту. Вертикальне переміщення поворотного маніпулятора 7 здійснюється приводом 13 та шестернями 12 і зубчатою рейкою 11.

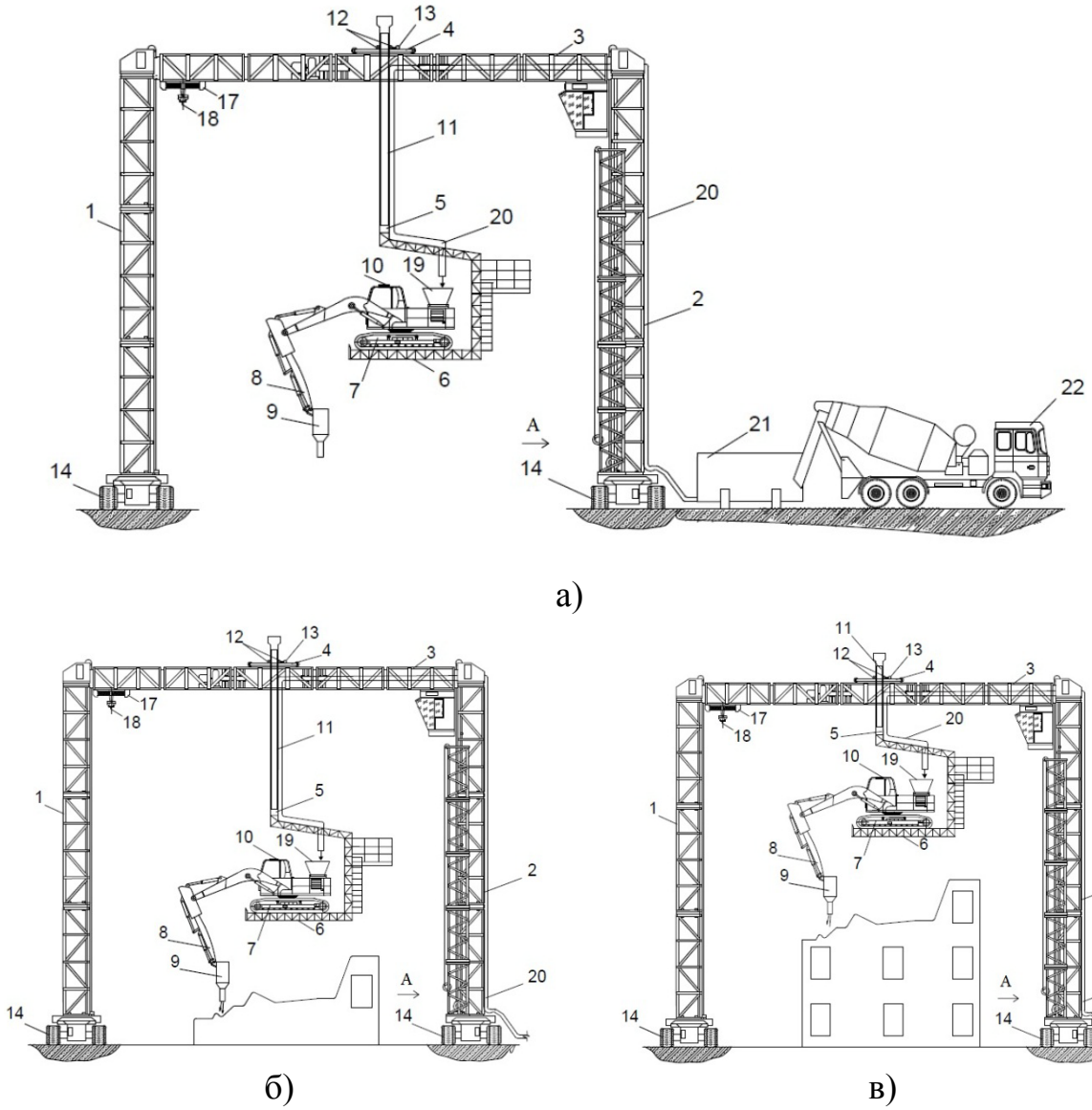


Рис. 1.26. Принтер, забезпечений будівельним маніпулятором:

а – загальний вигляд; б, в – етапи зведення об’єкту; 1, 2 – опори; 3 – мост; 4 – візок; 5 – балка; 6 – платформа; 7 – маніпулятор; 8 – телескопічне обладнання; 9 – головка друку; 10 – кабіна; 11 – зубчата рейка; 12 – шестерні; 13 – привод шестерень; 14 – гусеничні візки; 17 – вантажний візок; 18 – гакова підвіска; 19 – приймальний бункер; 20 – трубопровід; 21 – бетононасос; 22 – бетоновоз

Наявність робочого телескопічного обладнання 8 забезпечує переміщення головки друку 9 з найменшим маневруванням платформи 6.

Переміщення обладнання вздовж об’єкта виконується гусеничними візками 14 та 15. При цьому балансири візків 14 та 15 забезпечують

горизонтальне переміщення обладнання по поверхні будівельного майданчика.

Для підйому технологічних вантажів та проведення інших робіт використовується гакова підвіска 18 вантажного візка 17.

Виконання обладнання для 3D-друку будівельних об’єктів у вигляді візка з можливістю вертикального переміщення встановлених на ньому платформи та поворотного маніпулятора з робочим телескопічним обладнанням, дозволяє розширити технологічні можливості обладнання. Це забезпечує підвищення ефективності робіт при укладанні бетону.

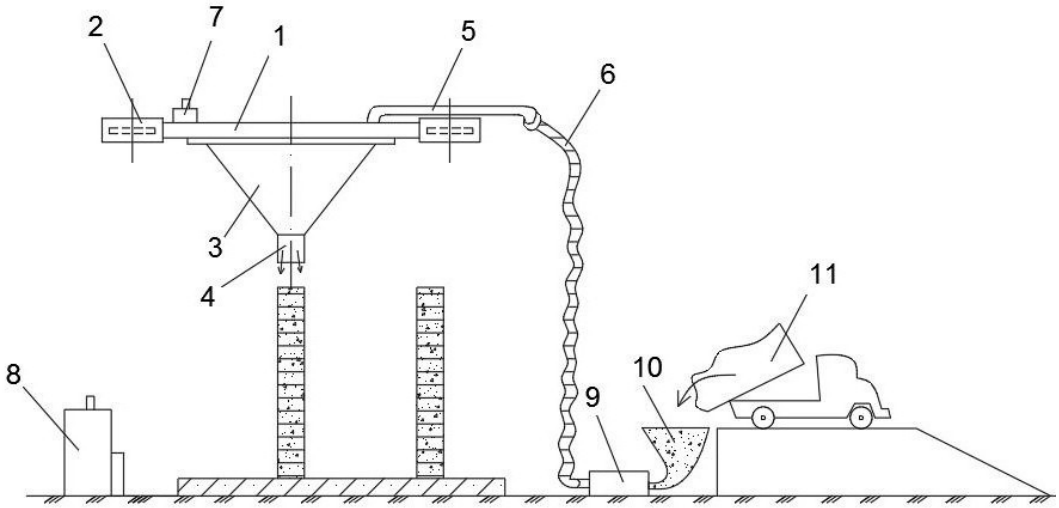
1.5.2. Пристрій для 3D-друку будівельних об'єктів

Пристрій [61] містить рухому платформу у вигляді безпілотного квадрольота 1 з гвинтами 2 та системою автоматичного комп’ютерного керування (рис. 1.27). Під квадрольотом 1 встановлений приймальний бункер 3 з головкою друку 4, який зв’язаний з жорстким 5 та гнучким 6 трубопроводами подачі будівельної суміші. На квадрольоті 1 встановлений дистанційний приймач 7 електроживлення.

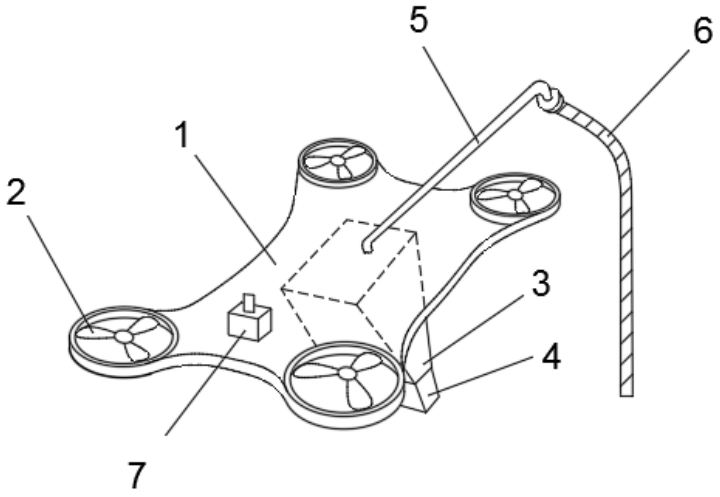
Пристрій обслуговують: джерело 8 дистанційного електроживлення; насос 9 подачі будівельної суміші з бункером 10; транспортний засіб 11 доставки будівельної суміші до будівельного майданчика. Насос 9 зв’язаний з гнучким трубопроводом 6.

Пристрій працює таким чином. Квадрольот 1 піднімається у повітря над будівельним майданчиком. Насос 9 з бункера 10, до якого транспортний засіб 11 завантажує будівельну суміш, подає її по трубопроводам 5 і 6 у приймальний бункер 3. Відповідно до програмного забезпечення, квадрольот 1 переміщується, а головка друку 4 подає суміш і формує окремі будівельні конструкції 9, 10 або споруду повністю. Наявність декількох гвинтів 2 забезпечує стабільність польоту квадрольота 1 та точність друку будівельних об’єктів. Тривалість роботи пристрою забезпечується використанням

безпровідного живлення між джерелом 8 електропостачання та приймачем 7. Виконання пристрою для 3D-друку об’єктів у вигляді безпілотного квадрольота, дозволяє розширити технологічні можливості обладнання.



а)



б)

Рис. 1.27. Пристрій для 3D-друку будівельних об'єктів:

а) – схема розташування обладнання; б) – загальний вигляд пристрою: 1 – квадрольот; 2 – гвинти; 3 – бункер; 4 – головка друку; 5, 6 – трубопроводи; 7 – дистанційний приймач електроживлення; 8 – джерело електроживлення; 9 – насос; 10 – бункер; 11 – транспорт

1.5.3. Головки 3D-друку будівельних об'єктів

Вдосконалення головок 3D - друку будівельних об’єктів направлено на підвищення продуктивності при укладанні бетону за рахунок можливості регулювання ширини його шару.

Головка (рис. 1.28) містить корпус 1 й екструдер 2 та переміщується по направляючій 3. Екструдер 2 відносно корпусу 1 встановлений шарнірно на вісі 4. Екструдер 2 також зв’язаний з корпусом 1 за допомогою приводу 5 (гідро-або пневмоциліндр) для повороту екструдера 2 у вертикальній площині.

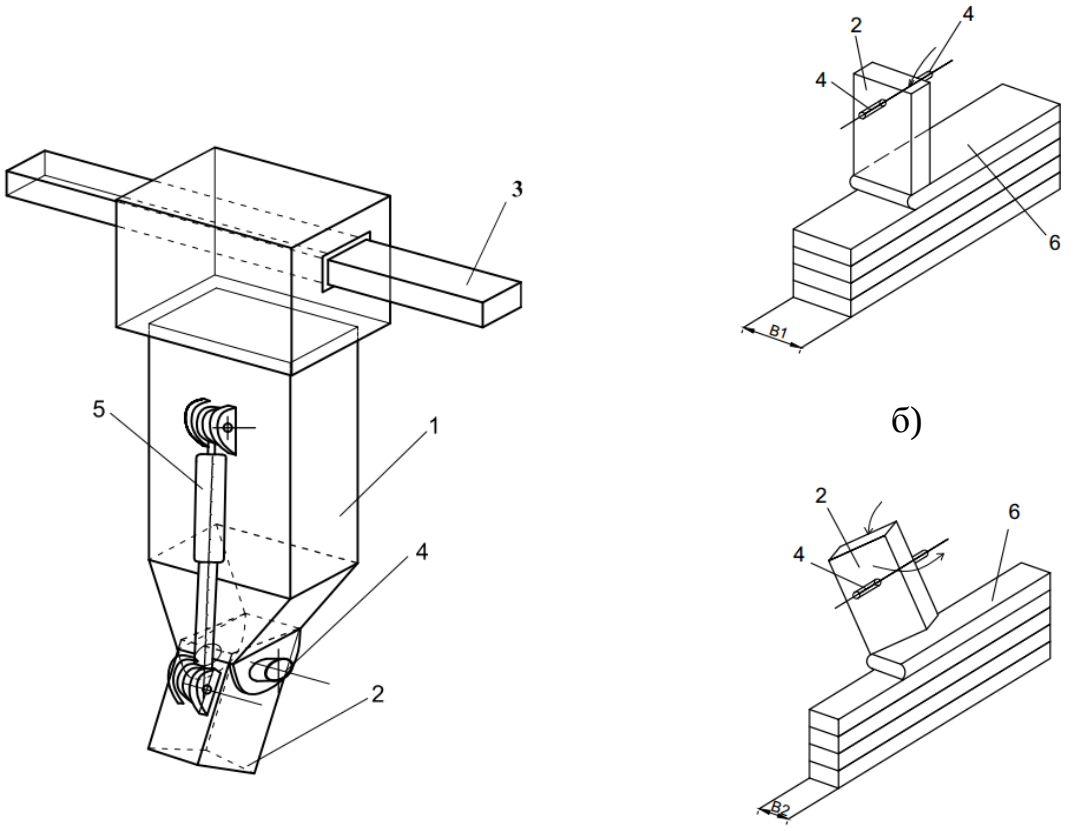
Головка працює таким чином [59]. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 3, через екструдер 2 надходить суміш та укладається у вигляді шарів бетону 6 шириною B_1, які формують фрагмент будівельного об’єкту. У разі необхідності зміни ширини шару будівельної суміші, за допомогою приводу 5 виконується поворот екструдера 2, що забезпечує укладання суміші з іншою шириною шару, наприклад B_2.

Виконання головки з поворотним екструдером 2 забезпечує швидке регулювання ширини шару суміші в залежності від технологічних вимог, що підвищує продуктивність 3D-друку будівельних об’єктів.

У головці (рис. 1.29), яка містить корпус для будівельної суміші та екструдер, внутрішня поверхня екструдера оснащена діафрагмою, вихідний отвір якої виконаний з можливістю регулювання. Це дозволяє регулювати ширину шару будівельної суміші, яка укладається, в залежності від технологічних вимог будівництва.

Головка містить корпус 1 й екструдер 2 та переміщується по направляючій 3. Внутрішня поверхня 4 екструдера 2 оснащена діафрагмою 5, яка складається з сегментів 6, з’єднаних між собою гнучкими елементами 7. Крайки сегментів 6 утворюють вихідний отвір 8. На одному з сегментів 6 закріплений важіль 9 рукоятки 10, яка розташована на зовнішній поверхні екструдера 2.

Головка працює таким чином. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 3, через вихідний отвір 8 діаметром D_1 діафрагми 5 надходить суміш та укладається у вигляді шарів бетону 11 шириною B_1 (рис. 1.29, а), які формують фрагмент будівельного об'єкту. У разі необхідності зміни ширини шару 12 будівельної суміші, поворотом рукоятки 10 виконується переміщення сегментів 6 і змінюється розмір вихідного отвору 8 до діаметру D_2, що забезпечує укладання суміші з іншою шириною шару B_2 (рис. 1.29, б).



а) б) в)

Рис. 1.28. Головка друку із змінною шириною шару бетону:
а – загальний вигляд; б, в – укладання шарів бетону. 1 – корпус; 2 – екструдер;3 – направляюча; 4 – вісь; 5 – привод

Виконання внутрішньої поверхні екструдера з діафрагмою, вихідний отвір якої виконаний з можливістю регулювання (рис. 1.29, рис. 1. 30, забезпечує швидке регулювання ширини шару суміші в залежності від

технологічних вимог, що підвищує продуктивність 3D-друку будівельних об’єктів.

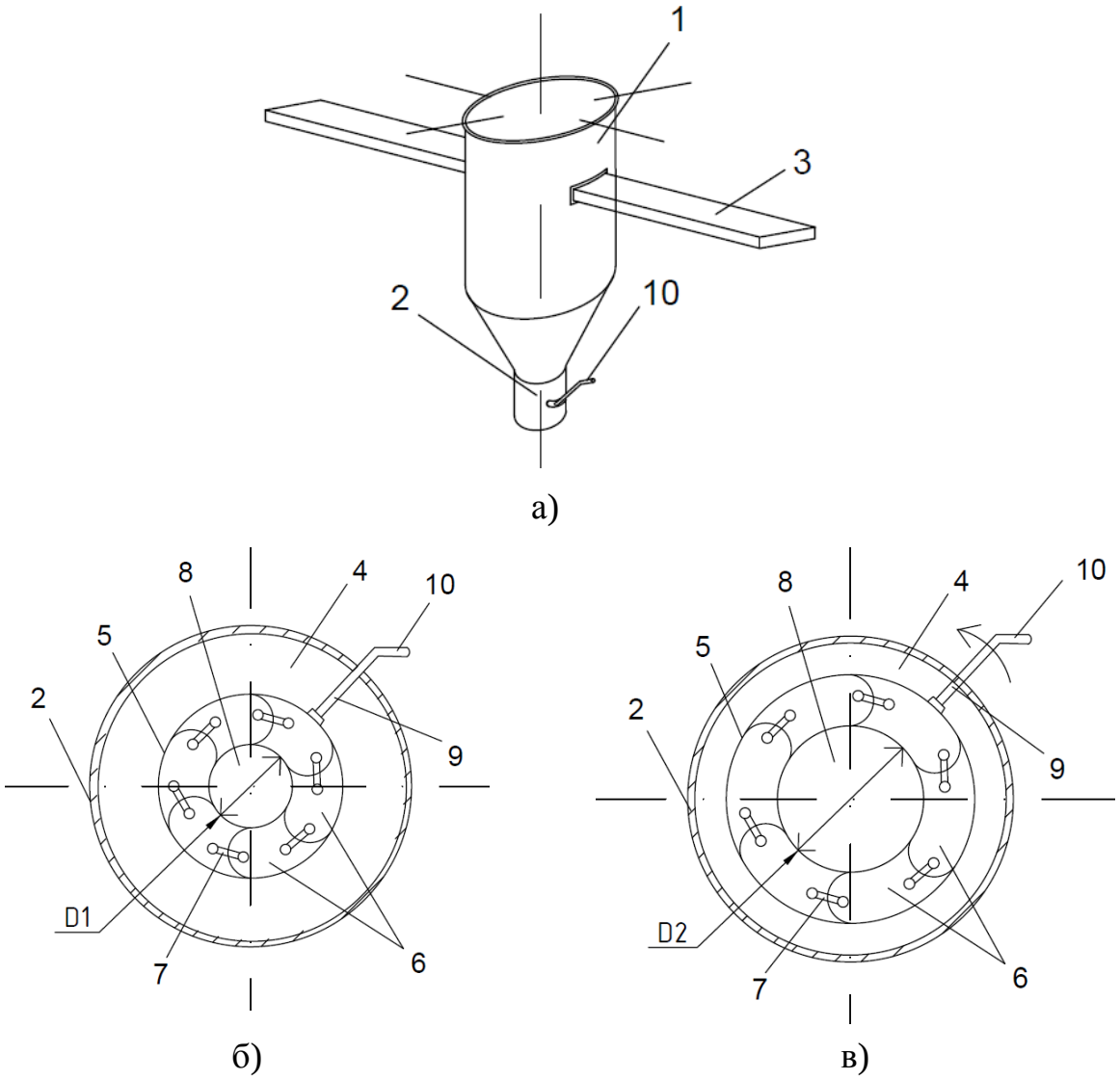


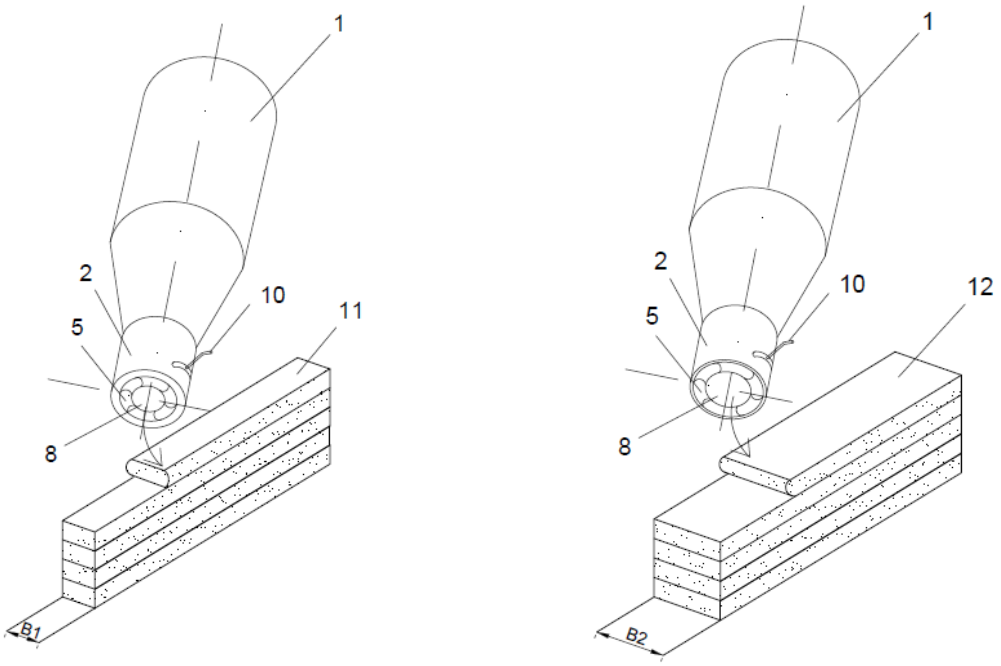
Рис. 1.29. Головка 3D-друку будівельних об’єктів:

а) – загальний вигляд; б), в) – головка з різним положенням діафрагми:

1 – корпус; 2 – екструдер; 3 – направляюча; 4 – внутрішня поверхня;

5 – діафрагма; 6 – сегменти; 7 – гнучкі елементи; 8 – вихідний отвір;

9 – важіль; 10 – рукоятка



а) б)

Рис. 1.30. Процес укладання шарів суміші:
а) – шириною В1; б) - шириною В2

У головці (рис. 1.31), яка містить корпус для будівельної суміші та екструдер, останній виконаний з центральної нерухомої та двох бокових частин, встановлених з можливістю повороту відносно центральної, причому одна бокова частина має більший радіус повороту, ніж інша. Це дозволяє регулювати ширину шару будівельної суміші, яка укладається, в залежності від вимог будівництва.

Головка містить корпус 1 й екструдер 2 та переміщується по направляючій 3. Екструдер 2 виконаний з центральної 4 нерухомої та двох бокових 5 і 6 частин, встановлених на шарнірах 7 і 8 з можливістю повороту відносно центральної частини 4. Кожна бокова 5 і 6 частини з’єднана із штоком циліндрів керування 9 і 10, корпуса яких закріплені на головці 1.

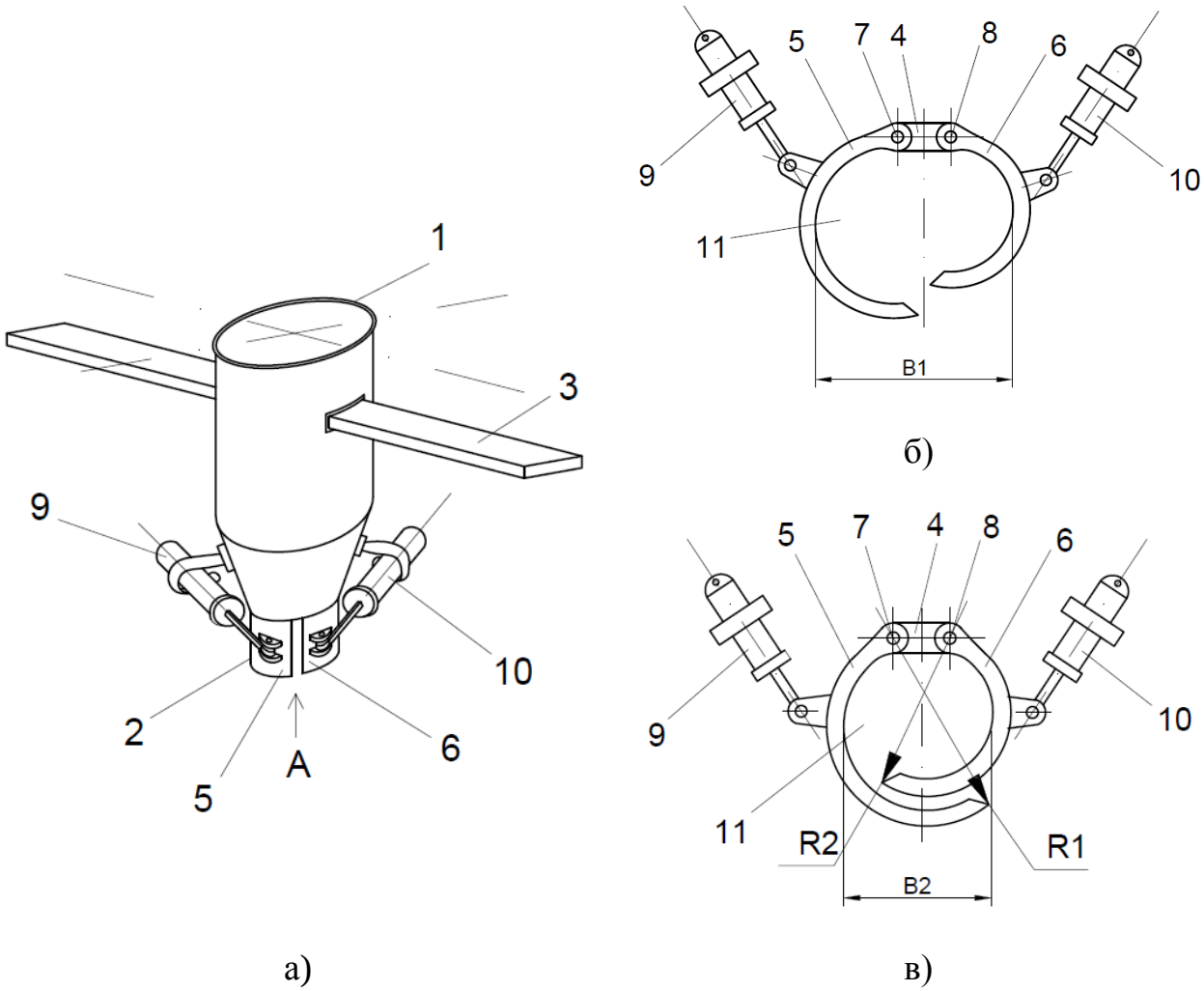


Рис. 1.31. Головка друку із змінною шириною шару бетону:

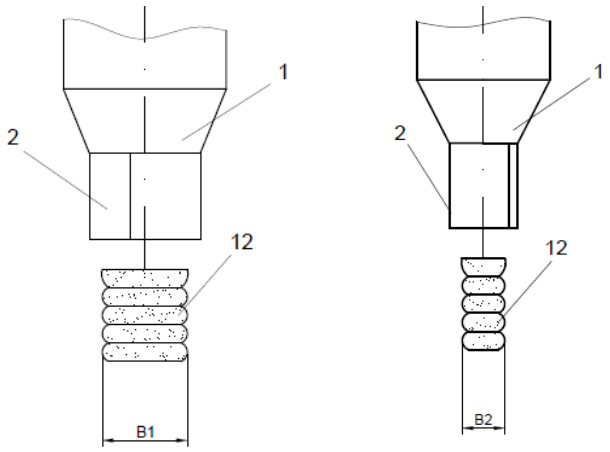
а) – загальний вигляд; б), в) – укладання шарів бетону:

1 – корпус; 2 – екструдер; 3 – направляюча; 4 – центральна частина екструдера; 5, 6 – бокові частини екструдера; 7, 8 – шарніри; 9, 10 – циліндри керування; 11 – отвір

Бокові 5 і 6 частини екструдера 2 виконані таким чином, що одна з них (5) має більший радіус повороту R_1, ніж інша бокова частина 6 – R_2. Внутрішні поверхні центральної 4 та двох бокових 5 і 6 частин утворюють отвір 11 подачі будівельної суміші 12.

Головка працює таким чином. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 3, через отвір 11 екструдера 2 надходить суміш та укладається у вигляді шарів бетону 12 шириною B_1 (рис. 1.23, а), які формують фрагмент будівельної конструкції. У разі необхідності зміни ширини шару будівельної

суміші, за допомогою циліндрів 9 і 10 виконується поворот бокових 5 і 6 частин екструдера 2. Причому, за рахунок різних радіусів повороту R_1 та R_2 , бокові 5 і 6 частини не заважають повороту одна іншої. Це забезпечує укладання суміші 12 з іншою шириною шару, наприклад B_2 (рис. 1.32, б).



а) б)

Рис. 1.32. Укладання шарів бетону:

а) – шириною В1; б) – шириною В2. 1 – корпус; 2 – екструдер; 12 – суміш

Використання головки з екструдером, виконаним з центральної нерухомої та двох бокових частин, встановлених з можливістю повороту відносно центральної, та одна бокова частина має більший радіус повороту, ніж інша, забезпечує регулювання ширини шару суміші в залежності від технологічних вимог, що підвищує продуктивність 3D-друку будівельних конструкцій.

У головці (рис. 1.33), яка містить корпус для будівельної суміші та екструдер з вихідним отвором, екструдер додатково оснащений механізмом регулювання перерізу отвору, виконаний у вигляді рухомої вкладки з гвинтовим приводом. Це дозволяє регулювати ширину шару будівельної суміші, яка укладається, в залежності від технологічних вимог будівництва.

Головка містить корпус 1 й екструдер 2 з отвором 3 та переміщується по направляючій 4. На зовнішній поверхні екструдера 2 встановлений механізмом регулювання перерізу отвору 4, виконаний у вигляді рухомої вкладки 5 з гвинтовим приводом, який складається з гвинтів 6 з рукоятками 7 та гайок 8.

Головка працює таким чином. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 4, через отвір 3екструдера 2 надходить суміш 9 та укладається у вигляді шарів бетону 10 шириною B_1 (рис. 1.24, г), які формують фрагмент будівельного об'єкту. У разі необхідності зміни ширини шару 11 будівельної суміші 9, за допомогою рукояток 7 та гвинтів 6 виконується переміщення вкладки 5, що забезпечує укладання суміші з іншою шириною шару, наприклад B_2 (рис. 1.33, д).

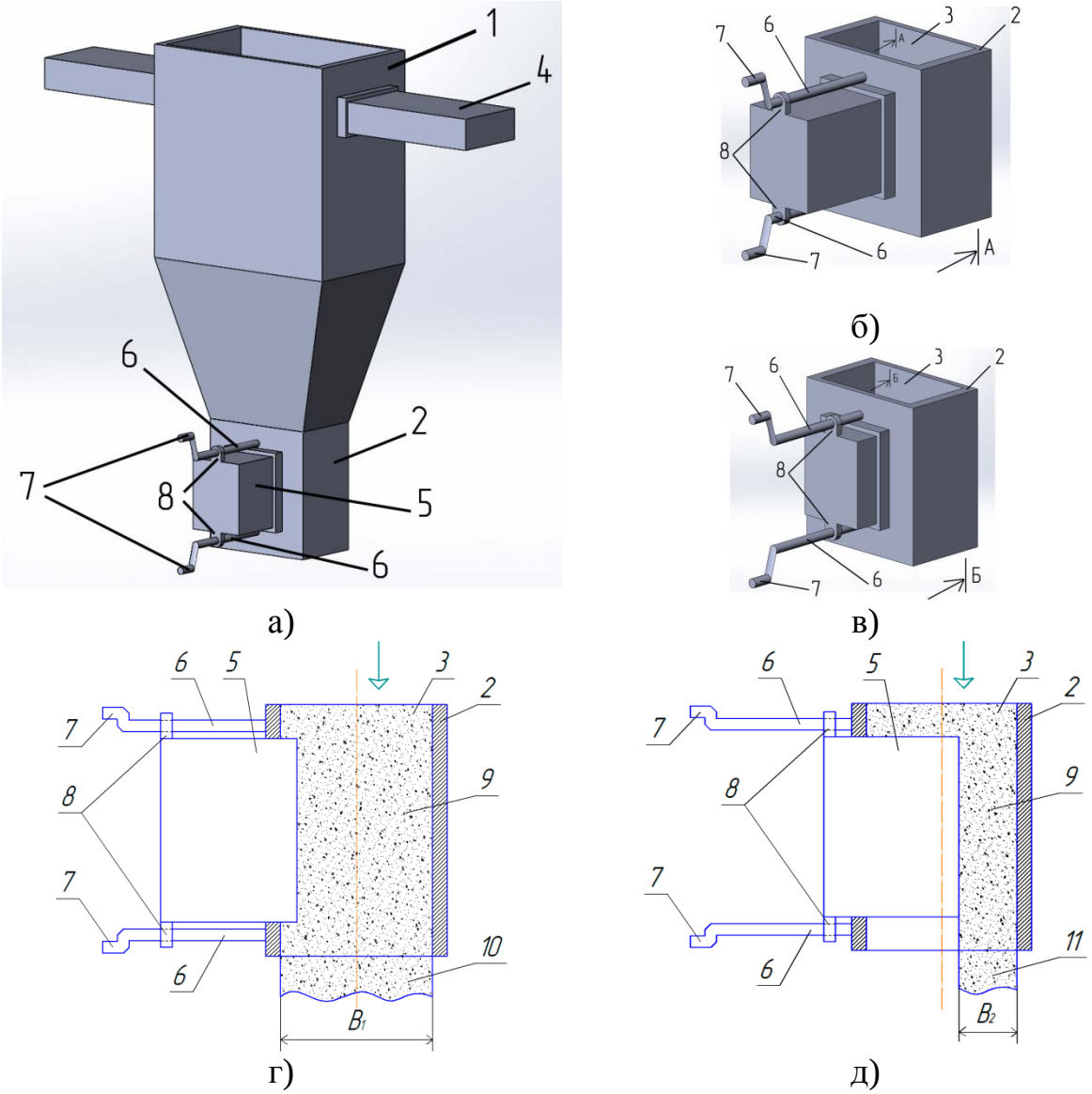


Рис. 1.33. Головка друку із змінною шириною шару бетону:

а) – загальний вигляд; б) … д) – екструдер з різними положеннями вкладки.1 – корпус; 2 – екструдер; 3 – направляюча; 4 – направляюча; 5 – вкладка; 6 – гвинт; 7 – рукоятка; 8 – гайка; 9 – суміш; 10, 11 – шар бетону

Виконання головки з механізмом регулювання перерізу отвору подачі суміші у вигляді рухомої вкладки з гвинтовим приводом, забезпечує швидке регулювання ширини шару суміші в залежності від технологічних вимог, що підвищує продуктивність 3D-друку будівельних об’єктів.

1.5.4. Головки для 3D- принтерів з декількома екструдерами

Головка (рис. 1.34) містить основний корпус 1 з порожниною 2 [56]. На основному корпусі 1 встановлено один за одним декілька додаткових корпусів 3 і 4 з порожнинами 5 та 6. Основний 1 та додаткові корпуса 3 і 4 послідовно розташовані на різних рівнях.

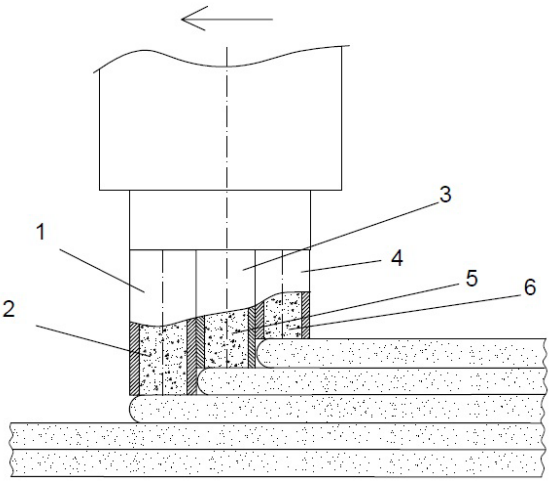


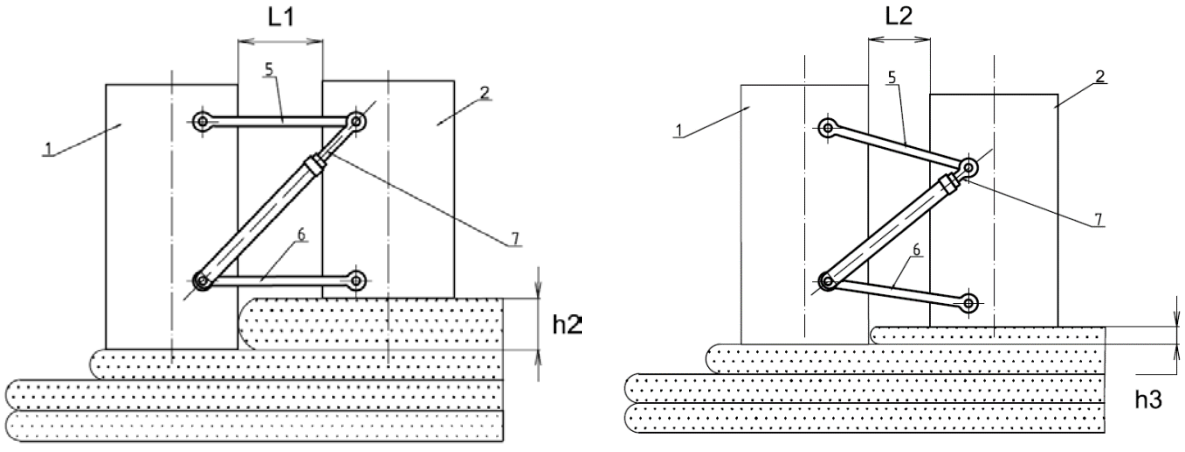
Рис. 1.34. Головка друку з декількома екструдерами:
1, 3, 4 – екструдери; 2, 5, 6 – порожнини подачі суміші

Головка працює таким чином. При переміщенні головки, через основний 1 та додаткові корпуса 3 і 4 з порожнин 2, 5 і 6 надходить суміш та укладається у вигляді декількох шарів бетону, які формують фрагмент будівельного об’єкту. Наступні переміщення головки виконуються до завершення 3D-друку будівельного об’єкту.

Виконання головки для 3D-друку будівельних об’єктів у вигляді основного та додаткових корпусів, встановленими послідовно один за одним на різному рівні, дозволяє за кожним проходом головки одночасно укладати декілька шарів бетону. Це забезпечує підвищення продуктивності робіт при укладанні бетону.

Екструдер (рис. 1.35) містить основну 1 та додаткову 2 головки з порожнинами відповідно 3 і 4 [58]. Додаткова головка 2 відносно основної головки 1 встановлена за допомогою пристрою зміни відстані між ними, який складається з важелів 5 і 6 та приводу 7 (гідро-або пневмоциліндр). Основна 1 та додаткова 2 головки послідовно розташовані на одна за одною. Головки 1 та 3 екструдера встановлюються на 3D-принтері 8, який рухається по направляючій 9.

Екструдер працює таким чином. При переміщенні принтера 8, через основну 1 та додаткову 2 головки з порожнин 3 і 4 надходить суміш та укладається у вигляді декількох шарів бетону, які формують фрагмент будівельного об’єкту. При цьому товщина шару бетону, який укладається додатковою головкою 2, регулюється від найбільшого h_1 до необхідного h_2, h_3 в залежності від технологічних вимог. Це досягається переміщенням по вертикалі додаткової головки 2 важелями 5 і 6 та приводом 7.



а) б)

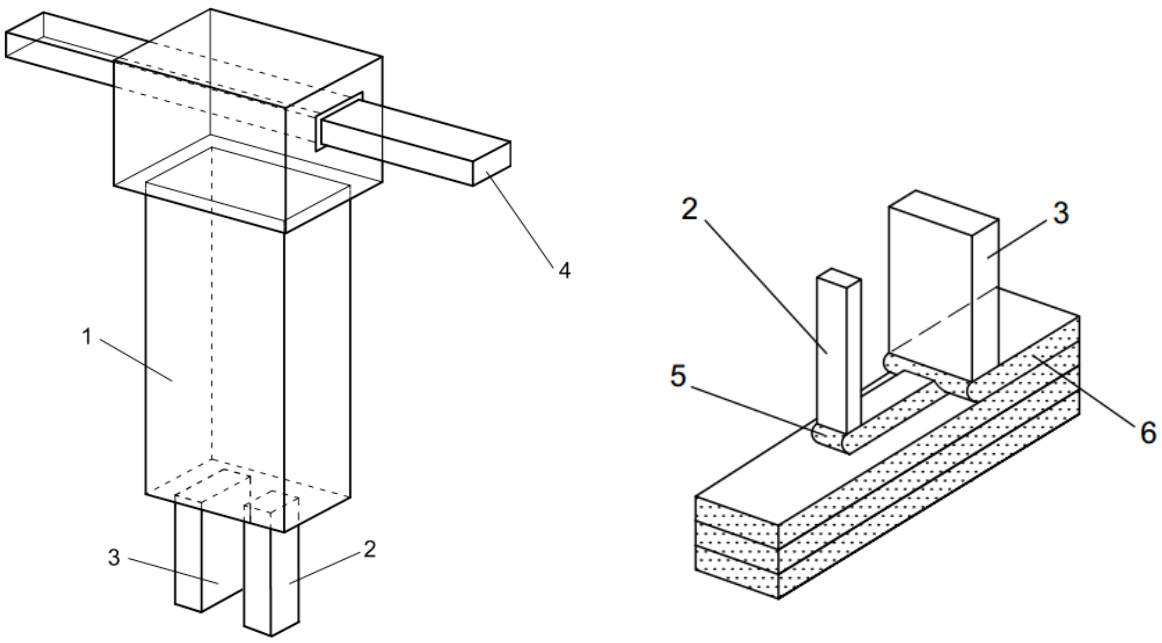
Рис. 1.35. Головка друку із змінною відстанню між екструдерами:

1, 2 – екструдери; 5, 6 – важелі; 7 – привод

В залежності від властивостей суміші (часом її твердіння), тим же чином виконується регулювання відстані по горизонталі між головками 1 і 2 – L_1 , L_2.Робота екструдера продовжується до завершення 3D-друку об’єкта.

Виконання екструдера 3D-друку будівельних об’єктів у вигляді основної та додаткової головок, встановленими послідовно одна за одною та із пристроєм зміни відстані між головками у вертикальному та горизонтальному напрямках, дозволяє за кожним проходом екструдера укладати у раціональному технологічному режимі декілька шарів бетону. Це забезпечує підвищення продуктивності робіт при укладанні бетону.

Головка (рис. 1.36) містить корпус 1, передній 2 та задній 3 екструдери та переміщується по направляючій 4. Передній екструдер 2 встановлений нижче і має меншу ширину ніж задній екструдер 3 [62].



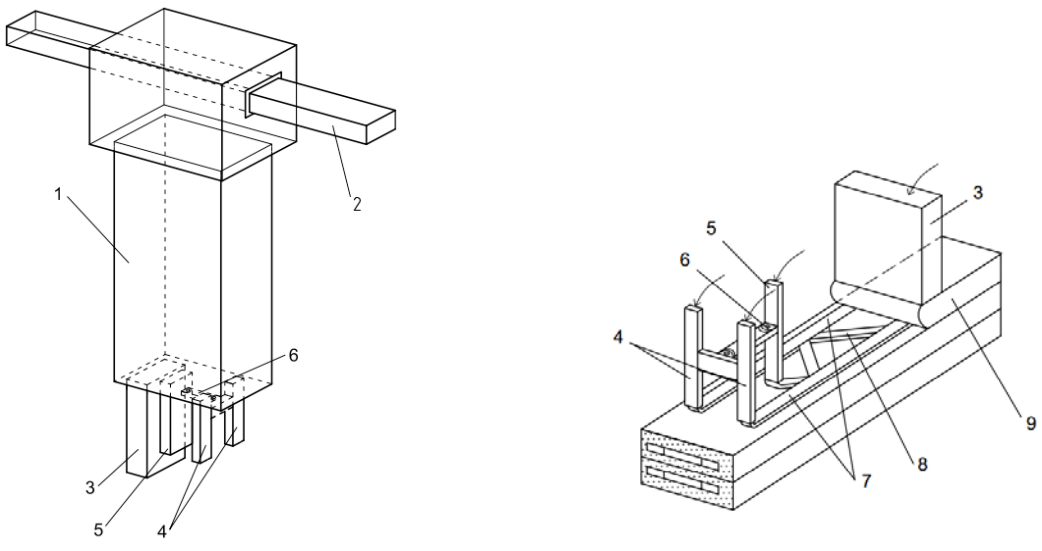
а) б)

Рис. 1.36. Головка друку з декількома екструдерами:
а) – загальний вигляд; б) – укладання шарів бетону. 1 – корпус; 2, 3 – екструдери; 4 – направляюча; 5, 6 – шар бетону

Головка працює таким чином. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 4, через екструдери 2 та 3 надходить суміш та укладається у вигляді шарів бетону відповідно 5 та 6, які формують фрагмент будівельного об’єкту. Причому попередній шар бетону 5, який укладається переднім екструдером 2, забезпечує утримання шару бетону 6, що подає задній екструдер 3. Це забезпечує підвищення продуктивності та якості робіт.

В основу технічного рішення (рис. 1.28) поставлена задача вдосконалення головки 3D - друку будівельних конструкцій, в якій за рахунок особливостей встановлення нових конструктивних елементів досягається підвищення міцності будівельних конструкцій виконаних 3D-друкуванням.

Головка містить корпус 1, що переміщується по направляючій 2, з декількома екструдерами 3 – 5 [63]. Перед основним екструдером 3 встановлені три екструдера: два екструдера 4 розташовані з боків, а третій екструдер 5 – всередині з можливістю бокових переміщень тягою 6 (рис. 1.37).



а) б)

Рис. 1.37. Головка друку із декількома екструдерами:

а – загальний вигляд; б – укладання шарів бетону. 1 – корпус; 2 – направляюча; 3, 4, 5 – екструдери; 6 – тяга; 7, 8, 9 - шар бетону

Головка працює таким чином. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 2, через екструдери 4 надходить суміш та укладається у вигляді шарів бетону 7. Також суміш укладається екструдером 5, який тягою 6 виконує почергові бокові переміщення, що забезпечує утворення шару 8 бетону. Ці попередньо укладені шари суміші 7 та 8 утворюють просторову каркасну конструкцію, яка за рахунок властивостей суміші набирає миттєву міцність. Через основний екструдер 3, ширина якого дорівнює ширині виробленої конструкції, подається суміш 9, яка заповнює вільні порожнини між шарами 7 та 8.

Виконання головки з декількома екструдерами, серед яких три екструдера встановлені попереду інших, при цьому два з них розташовані з боків, а третій – всередині, дозволяє підвищувати міцність вироблених будівельних конструкцій.

Суттєвим недоліком відомих головок є те, що вони мають задану форму вихідного отвору екструдера (прямокутну – для прямих ділянок виробів або круглу – для криволінійних ділянок виробів). Це обмежує використання та ефективність роботи цього обладнання для 3D-друку будівельних виробів складної форми.

У головці (рис. 1.38), яка містить корпус для суміші з шнеком та екструдер, останній виконаний з двома вихідними отворами прямокутної та круглої форм розташованими послідовно, причому корпус оснащений керованим розподільником суміші. Це дозволяє виконувати укладання бетону з різною траєкторією руху головки.

Головка містить корпус 1 з порожниною 2 і шнеком 3 й екструдер 4 та переміщується по направляючій 5. Екструдер 4 виконаний з двома вихідними отворами прямокутної 6 та круглої 7 форм розташованими послідовно один за другим. Під шнеком 3 на вісі 8 встановлений розподільник 9, виконаний у вигляді коромисла та затворів 10 і 11. Вісь 8 важелями 12 і 13 з’єднана з циліндром 14, який встановлений на корпусі 1, керування розподільником 9 (рис. 1.38).

Головка працює таким чином. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 5, у порожнину 2 корпуса 1 подається будівельна суміш 15. При переміщені головки по прямій траєкторії, циліндром 14 встановлюється таке положення розподільника 9, при якому затвор 10 перекриває отвір 7 круглої форми (рис. 3.13, г). За рахунок обертання шнека 3 виконується нагнітання суміші 15 через прямокутний вихідний отвір 6, що формує шар 16 при виготовлені будівельного виробу.

При наближені головки до криволінійної ділянки руху, циліндр 14 виконує поворот вісі 8 і затвор 11 перекриває вихідний отвір 6. Відкривається вихідний отвір 7 у вигляді кола, який формує шар 17 суміші 15 (рис. 1.38, д, ж).

Виконання головки з екструдером, який виконаний з двома вихідними отворами прямокутної й круглої форм розташованими послідовно та оснащення розподільником суміші, забезпечує укладання бетону з різною траєкторією руху головки, що підвищує ефективність 3D-друку будівельних виробів.

У головці (рис. 1.39), яка містить корпус для суміші з шнеком та екструдер прямокутної форми, внутрішня поверхня екструдера оснащена додатковим екструдером, вихідний отвір якого виконаний у вигляді кола, причому додатковий екструдер встановлений з можливістю вертикального переміщення. Це дозволяє виконувати укладання бетону з різною траєкторією руху головки.

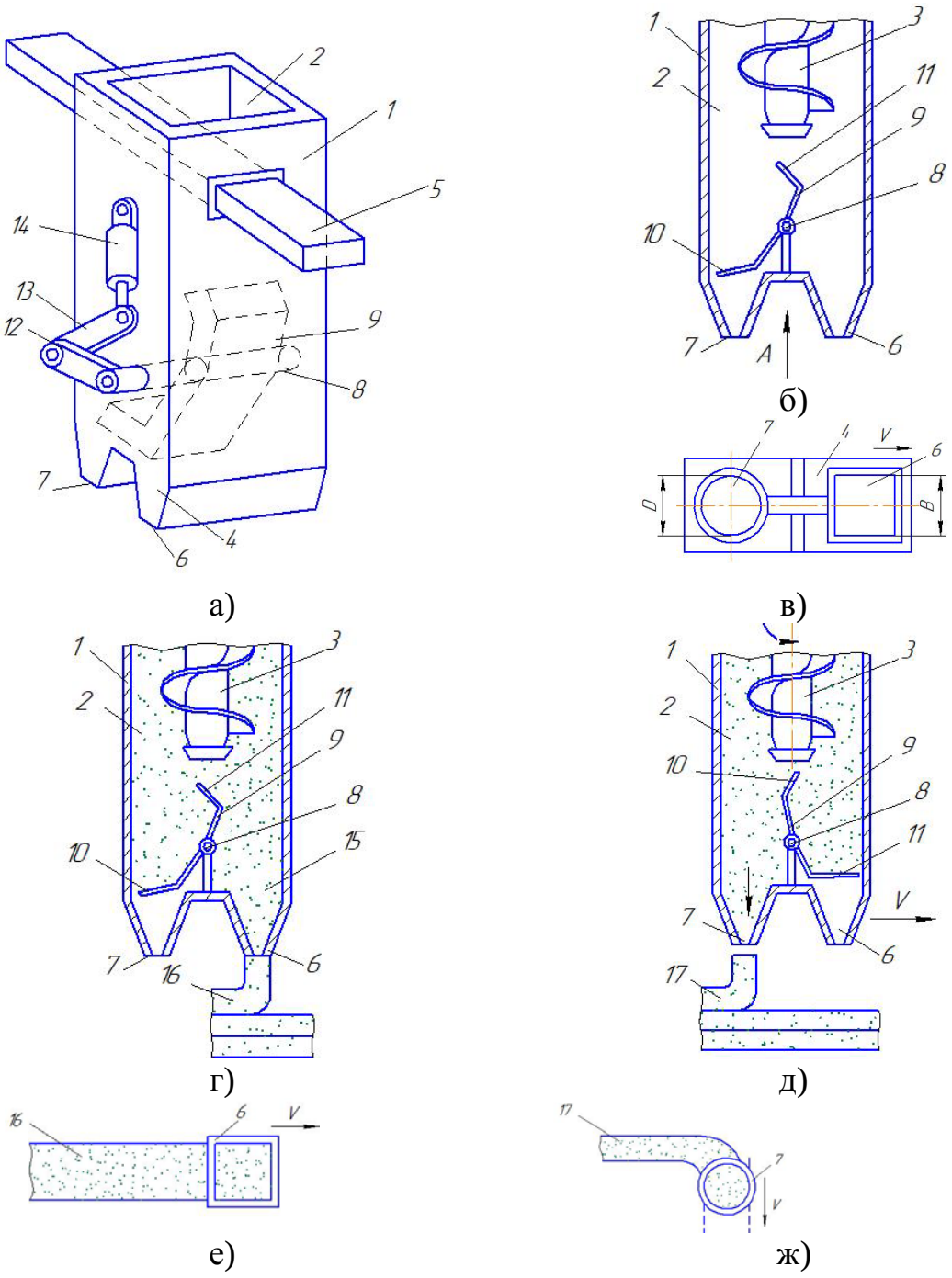


Рис. 1.38. Головка друку із декількома екструдерами:

а) – загальний вигляд; б) – повздовжній переріз; в) – вигляд А; г), е) – процес нагнітання суміші через прямокутний отвір екструдера; д), ж) – процес нагнітання суміші через круглий отвір екструдера. 1 – корпус; 2 – порожнина; 3 – шнек; 4 – екструдер; 5 - направляюча;6, 7 – отвір; 8 – вісь; 9 – розподільник; 10, 11 – затвор; 12, 13 – важіль; 14 - циліндр; 15, 16, 17 - шар бетону

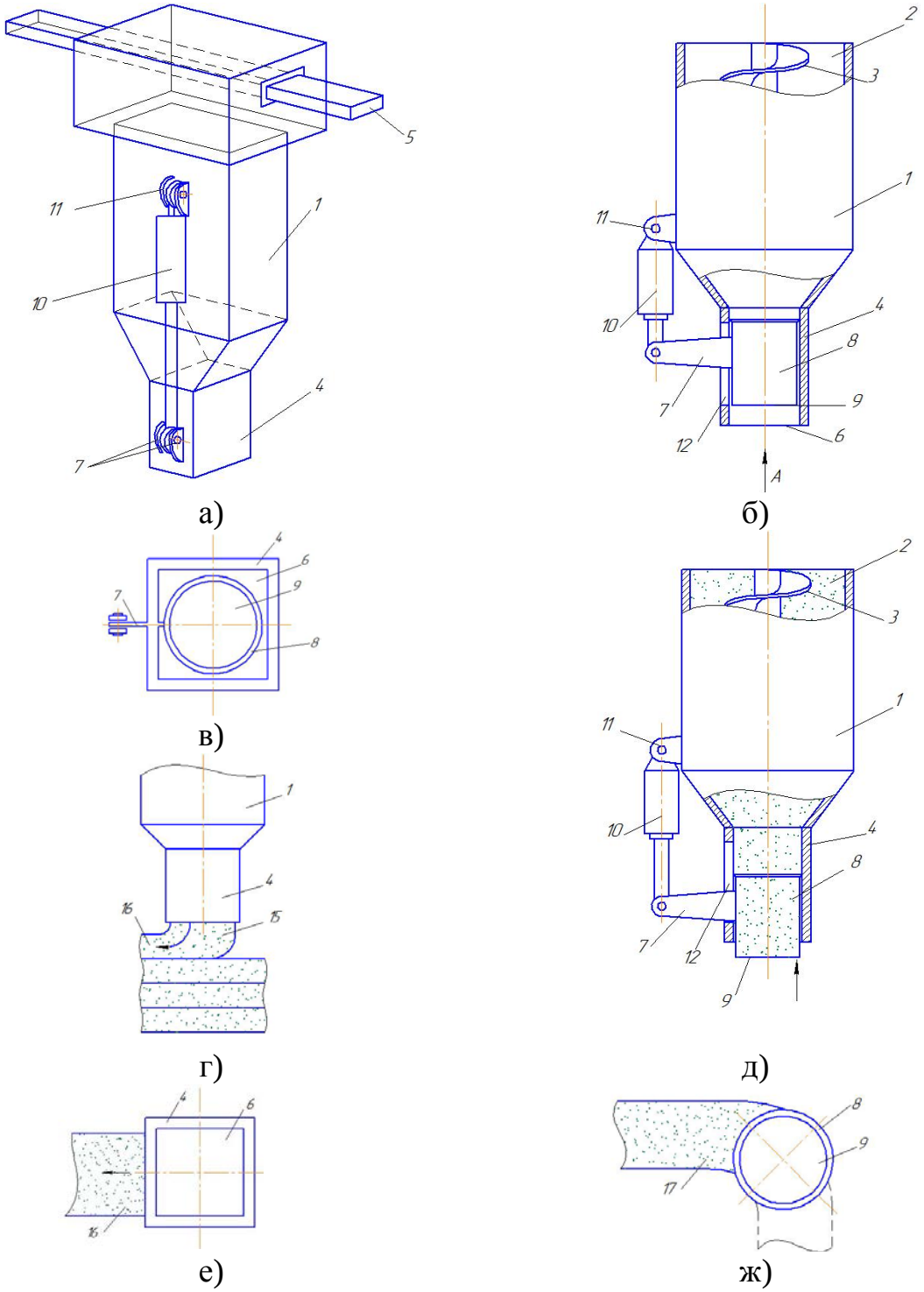


Рис. 1.39. Головка друку із декількома екструдерами:

а – загальний вигляд; б – повздовжній переріз; в – вигляд А; г, е – процес нагнітання суміші через прямокутний отвір екструдера; д, ж – процес нагнітання суміші через круглий отвір екструдера. 1 – корпус; 2 – порожнина; 3 – шнек; 4 – екструдер; 5 - направляюча;6, 9 – отвір; 7 – важіль; 8 – додатковий екструдер; 10 – гідроциліндр; 11 – кронштейн; 12 – прорізь; 15 – суміш; 16, 17 - шар бетону

Головка містить корпус 1 з порожниною 2 і шнеком 3 й екструдер 4 та переміщується по направляючій 5. Екструдер 4 має прямокутний вихідний отвір 6. В екструдері 4 за допомогою важеля 7 встановлений додатковий екструдер 8, вихідний отвір 9 якого виконаний у вигляді кола. З важелем 7 з'єднаний шток гідроциліндра керування 10, корпус якого встановлений в кронштейні 11 на корпусі 1. Важіль 7 проходить через прорізь 12 екструдера 4.

Головка працює таким чином. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 5, у корпус 1 подається будівельна суміш 15. При переміщені головки по прямій траєкторії, за рахунок обертання шнека 3, забезпечується нагнітання суміші 15 у додатковий екструдер 8 та екструдер 4. Прямокутний вихідний отвір 6 екструдера 4 формує шар 16 суміші 15 при виготовлені будівельної конструкції (рис. 1.39, г, е).

При наближені головки до криволінійної ділянки руху, гідроциліндр 10 виконує переміщення важеля 7 та додаткового екструдера 8, вихідний отвір 9 якого у вигляді кола формує шар 17 суміші 15 (рис. 1.39, д, ж).

Виконання головки з додатковим екструдером з вихідним отвором у вигляді кола та встановленого з можливістю вертикального переміщення, забезпечує укладання бетону з різною траєкторією руху головки, що підвищує ефективність 3D-друку будівельних конструкцій.

1.5.5. Головка 3D-друку виробів із заповнювачами різних фракцій

Виконання головки за даним технічним рішенням дозволяє укладати бетон із заповнювачами різних фракцій в залежності від технологічних вимог будівництва. У головці (рис. 1.40), яка містить корпус з приводним валом і шнеком та екструдер, шнек відносно валу встановлений з можливістю вертикального переміщення та оснащений механізмом його переміщення.

Головка містить корпус 1 й екструдер 2 та переміщується по направляючій 3. В корпусі 1 встановлений вал 4, на якому з можливістю

вертикального переміщення змонтований шнек 5 з гвинтовою лопаттю 6. Механізм переміщення шнека 5 виконаний у вигляді кулачкової поверхні 7 його верхньої частини 8 та ролика 9, встановленого через важіль 10 у корпусі 1. На валу 4 закріплений обмежувач 11 та пружній елемент 12. Обмежувач 11 встановлений у повздовжньому пазу 13 на шнеку 5. На шнеку 5 закріплений скребок 14. Шнек 5 має привод обертання (умовно не показано).

Головка працює таким чином. При переміщенні корпусу 1 по направляючій 3, у корпус 1 подається будівельна суміш 15, яка за рахунок обертання шнека 5 та скребка 14 забезпечує нагнітання суміші 15 у екструдер 2. При цьому за рахунок контакту ролика 9 та кулачкової поверхні 7 відбувається вертикальне переміщення (коливання) шнека 5 ((рис. 3.15, д, е)). Це забезпечує інтенсивне нагнітання сировини 15, яка може мати заповнювач великої фракцій, в екструдер 2, а потім укладання її в шар 16 будівельного об’єкта.

Виконання шнека з можливістю вертикального переміщення відносно валу та корпусу, забезпечує укладання бетону із заповнювачами різних фракцій в залежності від технологічних вимог будівництва, що підвищує ефективність 3D-друку будівельних об’єктів.

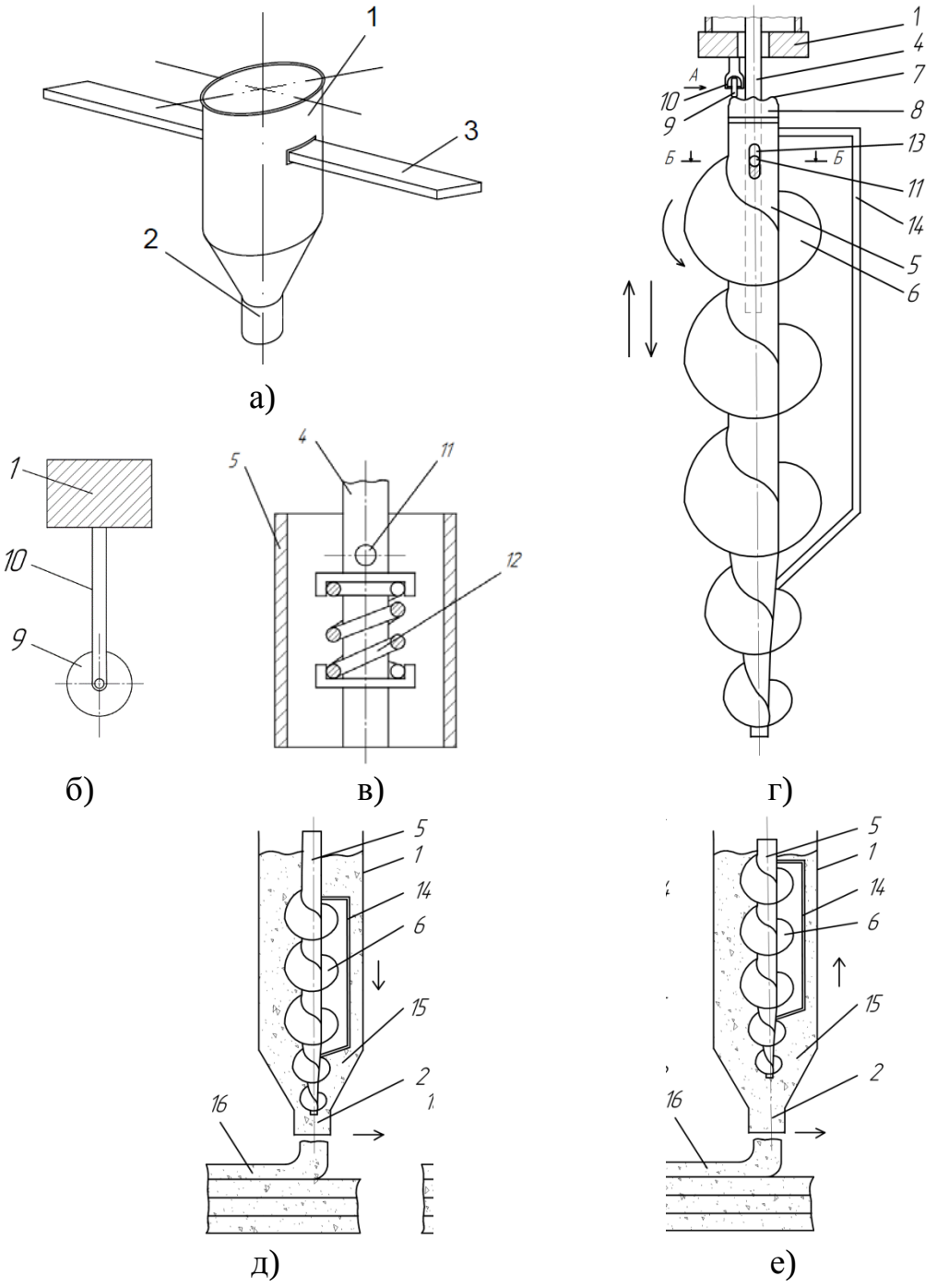


Рис. 1.40. Головка друку із декількома екструдерами:

а) – загальний вигляд; б) – вигляд А; в) – переріз Б-Б; г) – шнек з механізмом його вертикального переміщення; д), е) – процес укладання будівельної суміші при різних положеннях шнека. 1 – корпус; 2 – екструдер; 3 –направляюча ; 4 – вал; 5 – шнек; 6 – гвинтова лопать; 7 - кулачкова поверхня; 8 – верхня частина; 9 – ролик; 10 – важіль; 11 – обмежувач;12 – пружній елемент; 13 – паз; 14 – скребок; – суміш; 16 - шар бетону

1.5.6. Технологія та обладнання для 3D - друку будівельних об’єктів з використанням перероблених кам’яних матеріалів

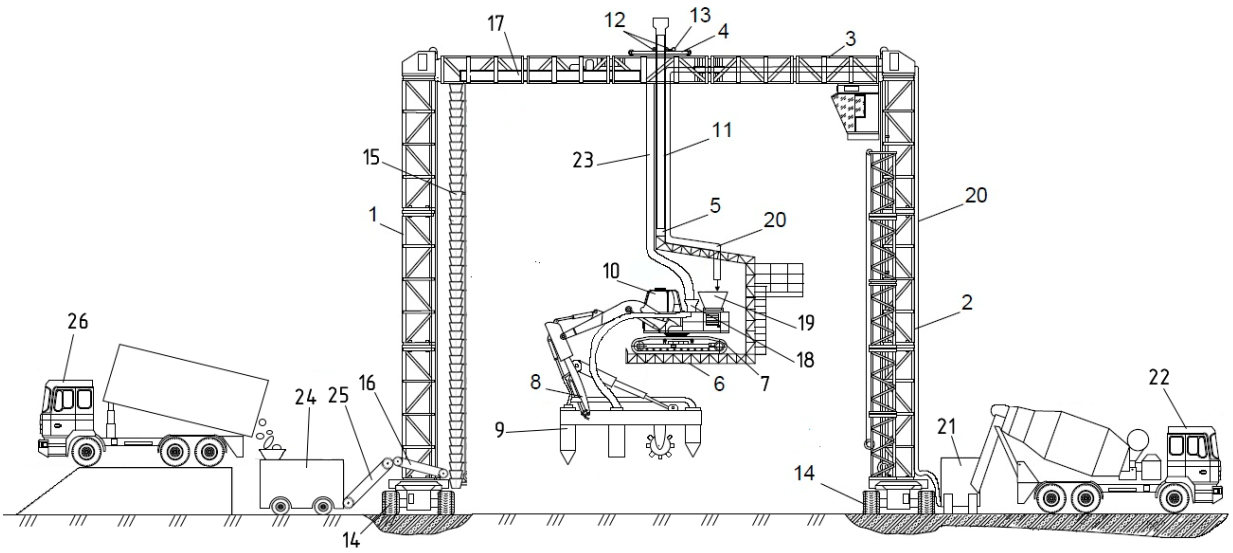
На сьогодні для 3D - друку об’єктів у якості будівельного матеріалу використовують розчин або бетон. У той же час, для підвищення міцності будівельних об’єктів та зменшення витрат, доцільно використання вторинних кам’яних матеріалів (уламки бетонних конструкцій та цегли, шлака, бута) у поєднані з розчином або бетоном.

Така технологічна задача вирішується тим, що між шарами рухомої суміші 31 укладається шар кам’яного матеріалу 32 (рис. 1.41), який примусово заглиблюється у попередній шар.

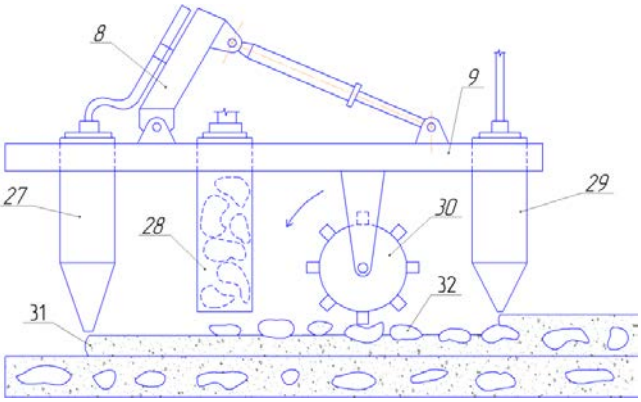
Розроблена технологія реалізується обладнанням [63], яке містить рухому металеву конструкцію з опорами 1 і 2, мостом 3 та візком 4. На візку 4 з можливістю вертикального переміщення встановлена балка 5, платформа 6 та поворотний маніпулятор 7 з робочим телескопічним обладнанням 8 та головкою друку 9. У кабіні 10 маніпулятора 7 розташована система автоматичного комп’ютерного керування переміщенням головки друку 9 і подачі до неї будівельної суміші та кам’яних матеріалів. На балці 5 закріплені зубчаті рейки 11, які взаємодіють із шестернями 12 та приводом 13. Кожна з опор 1 та 2 має ходовий привід у вигляді гусеничних візків 14.

Обладнання додатково оснащене конвеєрами подачі кам’яних матеріалів: ковшовим конвеєром 15 на опорі 1; скребковими конвеєрами 16 і 17 відповідно у нижній частині опори 1 та на мосту 3.

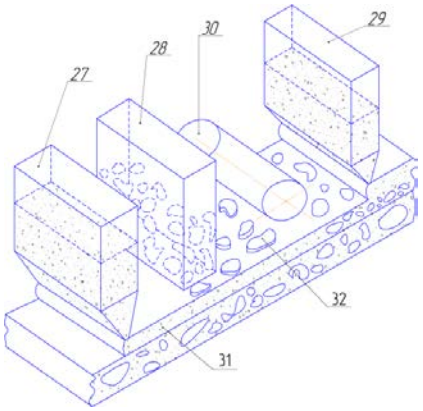
На поворотному маніпуляторі 7 встановлені приймальні бункери: 18 - кам’яних матеріалів та 19 - будівельної суміші. На металевій конструкції закріплений трубопровід 20, за допомогою якого будівельна суміш подається від бетононасосу 21, що встановлюється поруч з опорою 2, у приймальний бункер 19 маніпулятора 7. У бетононасос 21 бетон доставляється з бетонних заводів бетоновозами 22.



а)



б)



в)

Рис. 1.41. Технологія та обладнання 3D - друку з використанням кам’яних матеріалів:

а) – загальний вигляд; б), в) – послідовність укладки; 1, 2 – опори; 3 – мост; 4 – візок; 5 – балка; 6 – платформа; 7 – маніпулятор; 8 – телескопічне обладнання; 9 – головка друку; 10 – кабіна; 11 – зубчата рейка; 12 – шестерні; 13 – привод шестерень; 14 – гусеничні візки; 15 – ковшовий конвеєр; 16, 17, 25 – скребковий конвеєр; 18, 19 – приймальний бункер; 20, 23 – трубопровід; 21 – бетононасос; 22 – бетоновоз; 24 – дробарка; 26 – самоскид; 27, 28, 29 – екструдер; 30 – ущільнювач; 31 – суміш;32 – кам’яний матеріал

Конвеєр 17 за допомогою трубопроводу 23 зв’язаний з приймальним бункером 18. Поруч з опорою 1 встановлюється дробарка 24 з конвеєром 25, у яку завантажується кам’яні матеріали, що доставляються самоскидом 26.

Головка друку 9 виконана з трьома екструдерами: переднім 27, середнім 28 та заднім 29. Передній 27 та задній 29 екструдери з’єднані з трубопроводами подачі будівельної суміші, а середній екструдер 28 - з трубопроводом подачі кам’яних матеріалів. Головка друку 9 додатково оснащена ущільнювачем 30, встановленим за середнім екструдером 28.

Технологія 3D – друку полягає у наступному. Обладнання встановлюється у місці будівництва об’єкту. Переміщенням візка 4, балки 5 та платформи 6 маніпулятор 7 встановлюється на початкове положення подачі будівельної суміші. Робочим телескопічним обладнанням 8 та головкою друку 9 у відповідності до комп’ютерної програми виконується подача будівельної суміші і кам’яних матеріалів та формування будівельного об’єкту. Причому спочатку переднім екструдером 27 укладається шар суміші 31, потім середнім екструдером 28 шар кам’яного матеріалу 32. Ущільнювач 30 заглиблює кам’яний матеріал 32 у суміш 31. Потім заднім екструдером 29 укладається шар суміші 31. Така послідовність подачі матеріалів забезпечує підвищення міцності будівельного об’єкту.

Наявність дробарки 24 дозволяє подрібнювати кам’яні матеріали до необхідного розміру. Вертикальне переміщення поворотного маніпулятора 7 здійснюється приводом 13 та шестернями 12 і зубчатою рейкою 11. Наявність робочого телескопічного обладнання 8 забезпечує переміщення головки друку 9 з найменшим маневруванням платформи 6. Переміщення обладнання вздовж об’єкта виконується гусеничними візками 14.

Таким чином, оснащення обладнання конвеєром подачі кам’яних матеріалів та встановлення в головці друку ущільнювача, дозволяє підвищити міцність будівельного об’єкту та зменшити витрати.

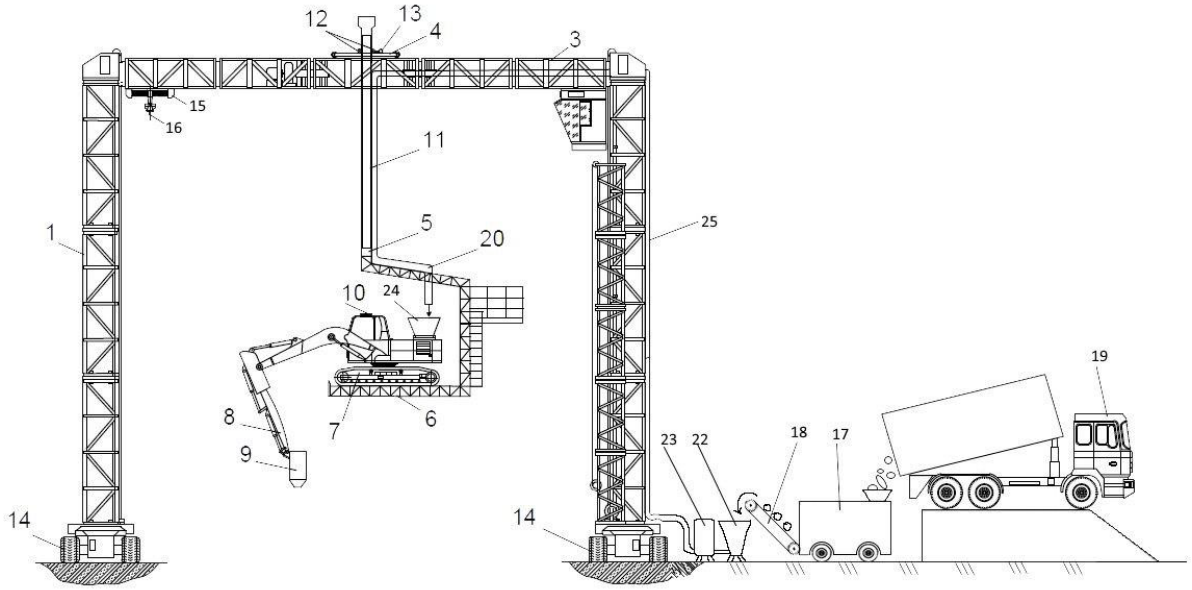
Підвищити якість 3D - друку будівельних об’єктів з використанням кам’яних матеріалів можливо за рахунок їх попереднього змішування з

рухомою сумішшю [65]. Ця технологічна задача вирішується тим, що самоскидом 19 (рис. 1.42) до об’єкту доставляються кам’яні матеріали (бут, шлак, перероблені бетонні конструкції), які завантажують у дробарку 17. Подрібнені кам’яні матеріали за допомогою конвеєру 18 подаються у змішувач 22.

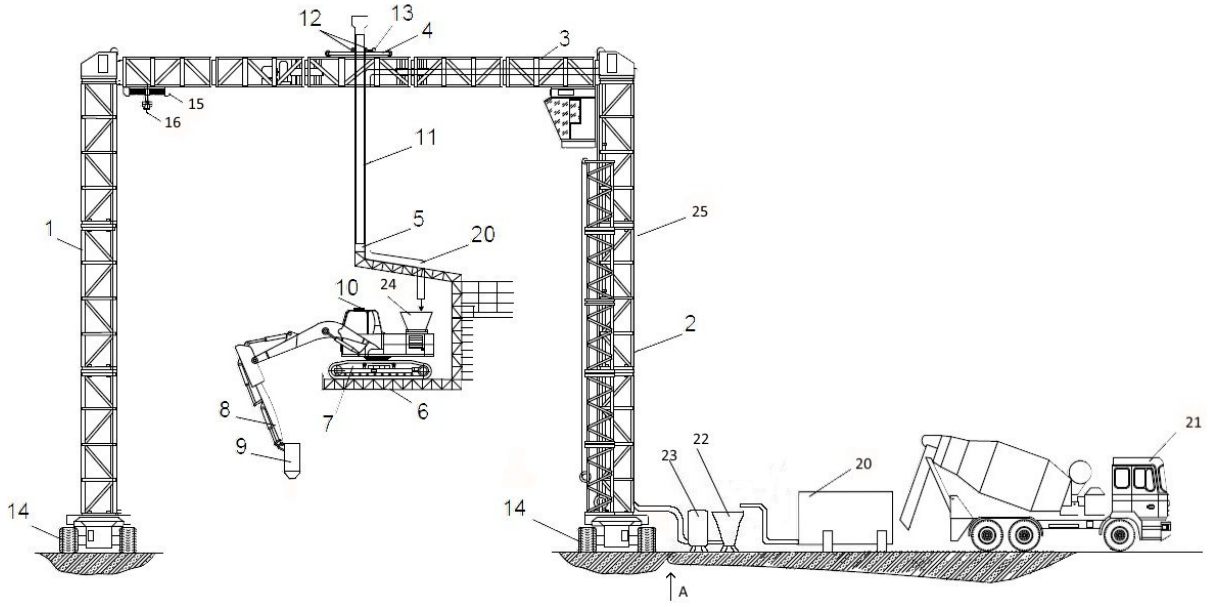
Розчиновозом 21 у місткість 20, а потім у змішувач 22, доставляється розчин. Після отримання будівельної суміші шляхом змішування кам’яних матеріалів та розчину змішувачем 22, вона насосом 23 подається по трубопроводу 25 у приймальний бункер 24 маніпулятора 7.

Пристрій містить рухому металеву конструкцію з опорами 1 і 2, мостом 3 та візком 4. На візку 4 з можливістю вертикального переміщення встановлена балка 5, платформа 6 та поворотний маніпулятор 7 з робочим телескопічним обладнанням 8 та головкою друку 9. У кабіні 10 маніпулятора 7 розташована система автоматичного комп’ютерного керування переміщенням головки друку 9 і подачі до неї будівельної суміші. На балці 5 закріплені зубчаті рейки 11, які взаємодіють із шестернями 12 та приводом 13.

Кожна з опор 1 та 2 мають ходовий привід у вигляді гусеничних візків 14. На нижньому поясі моста 3 встановлений вантажний візок 15 з гаковою підвіскою 16. Поруч з опорами 1 та 2 встановлюються: дробарка 17 з конвеєром 18, у яку завантажується кам’яні матеріали, що доставляються самоскидом 19; місткість 20 для розвантаження розчину, який доставляється розчиновозом 21; змішувач 22; насос 23 (рис. 1.43).



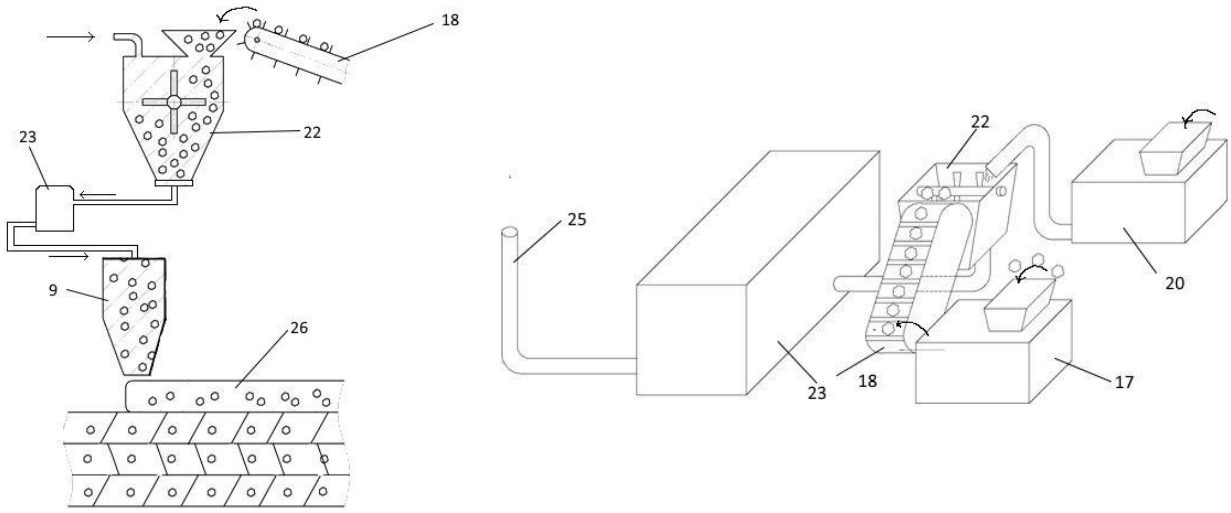
а)



б)

Рис. 1.42. Технологія та обладнання 3D - друку з попереднім змішуванням матеріалів:

а) – доставка кам’яних матеріалів; б) - доставка суміші. 1, 2 – опори; 3 – мост; 4 – візок; 5 – балка; 6 – платформа; 7 – маніпулятор; 8 – телескопічне обладнання; 9 – головка друку; 10 – кабіна; 11 – зубчата рейка; 12 – шестерні; 13 – привод шестерень; 14 – гусеничні візки; 15 – вантажний візок; 16 – гакова підвіска; 17 – дробарка; 18 – конвеєр; 19 – самоскид; 20 - місткість для розчину; 21 – розчиновоз; 22 – змішувач; 23 – бетононасос; 22 – бетоновоз; 24 – приймальний бункер; 25 – трубопровід



а) б)

Рис. 1.43. Обладнання для попереднього змішування матеріалів

На поворотному маніпуляторі 7 встановлений приймальний бункер 24. На металевій конструкції закріплений трубопровід 25, за допомогою якого будівельна суміш подається від насосу 23 у приймальний бункер 24 маніпулятора 7.

Пристрій працює таким чином. Попередньо він встановлюється у місці будівництва об’єкту. Самоскидом 19 до об’єкту доставляються кам’яні матеріали (бут, шлак, перероблені бетонні конструкції), які завантажують у дробарку 17. Подрібнені кам’яні матеріали за допомогою конвеєру 18 подаються у змішувач 22. Розчиновозом 21 у місткість 20, а потім у змішувач 22, доставляється розчин. Після отримання будівельної суміші шляхом змішування кам’яних матеріалів та розчину змішувачем 22, вона насосом 23 подається по трубопроводу 25 у приймальний бункер 24 маніпулятора 7.

Переміщенням візка 4, балки 5 та платформи 6 маніпулятор 7 встановлюється на початкове положення подачі будівельної суміші. Робочим телескопічним обладнанням 8 та головкою друку 9 у відповідності до комп’ютерної програми виконується подача будівельної суміші та формування будівельного об’єкту шарами 26 суміші (рис. 1.44).

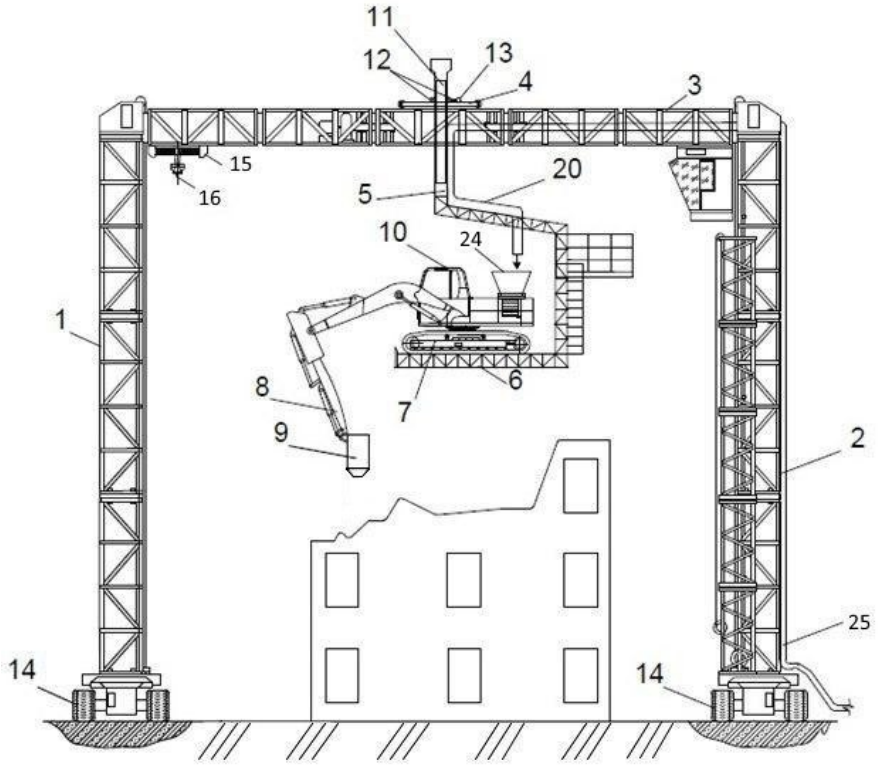


Рис. 1.44. Процес 3D - друку будівельного об’єкту

Вертикальне переміщення поворотного маніпулятора 7 здійснюється приводом 13 та шестернями 12 і зубчатою рейкою 11. Наявність робочого телескопічного обладнання 8 забезпечує переміщення головки друку 9 з найменшим маневруванням платформи 6. Переміщення обладнання вздовж об’єкта виконується гусеничними візками 14.Для підйому технологічних вантажів та проведення інших робіт використовується гакова підвіска 16 вантажного візка 15.

Таким чином, оснащення пристрою конвеєром подачі кам’яних матеріалів та змішувачем, дозволяє підвищити міцність зведеної будівлі або споруди. Це забезпечує підвищення ефективності 3D-друку будівельних об’єктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Labonnote, Nathalie; Rønnquist, Anders; Manum, Bendik; Rüther, Petra (December 2016). "Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities". Automation in Construction. 72: 347–366. doi:10.1016/j.autcon.2016.08.026.

2. Kreiger, Eric L.; Kreiger, Megan A.; Case, Michael P. (August 2019). "Development of the construction processes for reinforced additively constructed concrete". Additive Manufacturing. 28: 39–49. doi:10.1016/j.addma.2019.02.015.

3. Sisson, Patrick (8 January 2019). "Can this startup 3D-print a home in 30 hours?". Curbed.

4. "World's First 3D Printed Bridge Opens in Spain". ArchDaily. 7 Feb. 2017.

5. France-Presse, Agence (18 October 2017). "World's first 3D-printed bridge opens to cyclists in Netherlands". The Guardian.

6. Papanek (1971). Design for the Real World. ISBN 978-0897331531.

7. Architectural Design (2008). Versatility and Vicissitude. ISBN 9780470516874.

8. 11. J.B.Gardiner PhD thesis "Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing, 2011. web cited 2016-07-18.

9. Khoshnevis. Original Contour Crafting Patent US5529471 A.

10. Patent by Dini et. al, "Method and Device for Building Automatically Conglomerate Structures. Patent number US20080148683 A1" web. 2016-07-18.

11. "https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/". web cited 2016-09-14.

12. "https://3dprint.com/126426/3d-printed-museum-office/" web 2016-09-14

13. "Cazza to build world's first 3D printed skyscraper". Jochebed Menon, Construction Week Online, March 12, 2017. Retrieved July 17, 2017.

14. "FreeFAB Website". Retrieved 21 February 2017.

15. "https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-04663-1_9" RobArch 2014 conference proceedings, Springer web cited September 14, 2016

16. ""Freefab: Development of a construction-scale robotic formwork 3D printer", Vimeo 2014".

17. "http://www.iaarc.org/publications/fulltext/ISARC2016-Paper095.pdf, ISARC 2016".

18. USACE ERDC, Entry Control Point (ECP), 2016, https://www.youtube.com/watch?v=BodasNDLYzU

19. ERDC, First 3D printed Concrete Barracks, 2017, https://www.youtube.com/watch?v=-qmqN1G5x4w

20. News Leader, Army shows off next-level tech at Fort Leonard Wood, 2018, https://amp.news-leader.com/amp/503766002

21. Engineer News Record, Army Researchers Refine 3D-Printed Concrete Barracks, https://www.enr.com/articles/45002-army-researchers-refine-3d-printed-concrete-barracks

22. Fox News, Marine Corps 3D print 500-square-foot concrete barrack, 2018, https://video.foxnews.com/v/5828338937001

23. Marine Corps System Command, Tactical Tuesday: 3D Printed Concrete Bridge, 2019, https://www.youtube.com/watch?v=vEN1x5Hc4qA

24. 3D printing Media Network, US Marines 3D print concrete structure using a three-inch nozzle, 2019, https://www.3dprintingmedia.network/us-marines-3d-print/

25. Diggs-McGee et al, Print time vs. elapsed time: A temporal analysis of a continuous printing operation for additive constructed concrete, Additive Manufacturing, 2019.

26. "Construction of World's 1st 3D Printed Bridge Begins in Amsterdam".

27."https://3dprintingindustry.com/news/emerges-first-manufacturer-3d-house-printers-38801/" 3D Industry article

28. "Total Custom Website". Retrieved 21 February 2017.

29. "World's First 3D Printed Castle is Complete". 3DPrint.com. Retrieved 21 February 2017.

30. "EXCLUSIVE: Lewis Grand Hotel Erects World's First 3D Printed Hotel". Retrieved 21 February 2017.

31. "LafargeHolcim innovates with 3D concrete printing". LafargeHolcim.com. 2016-08-05. Retrieved 2017-12-05.

32. "The construction of Europe's first 3D printed building has begun. - 3D Printhuset". 3D Printhuset (in Danish). Retrieved 2017-12-05.

33. https://www.aniwaa.com/house-3d-printer-construction/

34. Ocasio, Victor (January 13, 2019). "LI firm testing huge 3D printer that could make a house in 48 hours". Newsday. Retrieved January 13, 2019.

35. Sisson, Patrick (January 8, 2019). "Can this startup 3D-print a home in 30 hours?". Curbed. Vox Media. Retrieved January 8, 2019.

36. Fuentes, Nicole (February 9, 2018). "3D printing concrete to build homes". The Long Island Advance. Retrieved February 9, 2018.

37. Fuentes, Nicole (December 27, 2018). "S-Squared gets printing". The Long Island Advance. Retrieved December 27, 2018.

38. Goldberg, Jodi (January 17, 2019). "Machine could build home in 2 days". Fox 5 NY. Fox 5. Retrieved January 17, 2019.

39. Vialva, Tia. "S-SQUARED 3D PRINTERS DEBUTS LARGE AUTONOMOUS ROBOTIC CONSTRUCTION SYSTEM". 3D Printing Industry. Retrieved December 7, 2018.

40. Cruz, Veronica (January 13, 2019). "S-Squared presents ARCS – the world's largest 3D printer". Market Business News. MBN. Retrieved January 13, 2019.

41. S., Michelle. "S-Squared 3D printers creates 3D XXL printer for construction". 3D Natives. Retrieved January 8, 2019.

42. Будко А. А. Применение 3d принтеров в строительстве, достоинства и недостатки технологи / А. А. Будко, А.А Потехин , А.А. Акопян // Сб. научн.трудов – Красноярск:Инновационный центр развития образования и науки. – 2017.

43. Лунева Д. А.Применение 3d-печати в строительстве и перспективы ее развития / Д. А. Лунева, Е. О. Кожевникова, С. В. Калошина // Вестник Пермского национального исследовательского университета. Строительство и архитектура. 2017. Т.8, №1. – С. 90-101.

44.Торшин А.О./ Перспективы использования 3D-принтера в строительстве/ А. О. Торшин, Е. Н. Потапова//М.: Успехи в химии и химической технологии. ТОМ XXX.- 2016. № 7. - С.118-120.

45. Шатов С.В., Савицкий Н. В., Карпушин С. А. Обобщение инновационных технологий 3D-печати строительных объектов для разработки стартапов / Строительство. Материаловедение Машиностроение. Вып. 99. Д.:ГВУЗ «ПГАСА», 2017, с. 194-200.

46. «Contrucktion». MegaScale 3DPrinting, Group1 :FinalReport, 11th January 2013 / Alwi A., Karayiannis S., Starkey B., Gardner M., Reodique K., Varley Th. ; Faculty of Engineering and Physical Sciences University of Surrey. – 2013. – 201 p. – Available at: http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/R.Webb/MDDP/2012/Report/3D%20Building%20Printer%20-%20Group%201.pdf.

47. Khoshnevis B. Automated Construction by Contour Crafting-Related Robotics and Information Technologies / Behrokh Khoshnevis // Automation in Construction. – 2004. – Vol. 13, iss. 1. – P. 5–19. – Available at: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580503000736.

48. Lipson H. Fabricated. The New World of 3D Printing / Hod Lipson, Melba Kurman. – [Indiana]: Wiley, 2013. – 320 p.

49. Low-cost 3DPrinting for Science, EducationandSustainableDevelopment / Доступная 3Д печать для науки, образования и устойчивогоразвития. E. Canessa, C. FondaиM. Zennaro.– Италия: Международный центр теоретической физики Абдус Салам – МЦТФ, 2013. -192 с.

50. Joop de Boer. Which Architect Is Winning The 3D Printing Rat Race? / Joop de Boer // Pop-Up City. – 2014. – 1 July. – Available at: http://popupcity.net/which-architect-is-winning-the-3d-printing-rat-race/.

51. Savytskyi N. V., Shatov S. V., Ozhyshchenko O. A. 3D-printing of build objects // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – Д.: 2016. - № 3. – С. 18–26.

52. Warszawski A. Implementation of Robotics in Building: Current Status and Future Prospects / Warszawski A., Navon R. // Journal of Construction Engineering and Management. – 1998. –Vol. 124, iss. 1. – P. 31–41. – Available at: http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1998)124:1(31).

53. Обзорная статья по 3D-строительным технологиям [Электронный ресурс] http://fb.ru/article/257514/stroitelnyiy-d-printer-novaya-tehnologiya-stroitelstva-domov

54. Технологии 3D-печати в строительстве [Электронный ресурс] http://www.shapovalov.org/news/2014-05-28-2769

55. Технологии 3D-печати в строительстве [Электронный ресурс]http://www.shapovalov.org/news/2014-05-28-2769

56. Патент України на корисну модель 108790, E04, 25.07.2016. Бюл. № 14.

57. Патент України на корисну модель 109807, E04, 12.09.2016. Бюл. № 17.

58. Патент України на корисну модель 112205, E04, 12.12.2016. Бюл. № 23.

59. Патент України на корисну модель 115596, E04, 25.04.2017. Бюл. № 28.

60. Патент України на корисну модель 116549, E04, 25.05.2017. Бюл. № 10.

61. Патент України на корисну модель 117773, E04, 10.07.2017. Бюл. № 13.

62. Патент України на корисну модель 123106, E04, 12.02.2018. Бюл. № 3.

63. Патент України на корисну модель 123108, E04, 12.02.2018. Бюл. № 3.

64. Патент України на корисну модель 125267, B29, 10.05.2018. Бюл. № 9.

65. Патент України на корисну модель 126077, B29, 11.06.2018. Бюл. № 11.

66.«Contrucktion». MegaScale 3D Printing, Group 1 : Final Report, 11th January 2013 / Alwi A., Karayiannis S., Starkey B., Gardner M., Reodique K., Varley Th. ; Faculty of Engineering and Physical Sciences University of Surrey. – 2013. – 201 p. – Available at: http://personal.ee.surrey.ac.uk/Personal/R. Webb/MDDP/2012/Report/3D%20Building%20Pr inter%20-%20Group%201.pdf.

67. https://en.wikipedia.org/wiki/Construction_3D_printing

68. https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/betabram-p1/

69. https://www.aniwaa.com/buyers-guide/3d-printers/house-3d-printer-construction/

2. МАТЕРІАЛИ ДЛЯ 3Д ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБЄКТІВ

2.1. Матеріали для 3D друку в будівництві

2.1.1. Пісок

Використання піску для створення будівельних матеріалів вже доведено в структурному сенсі, оскільки піщані конструкції використовувались протягом століть. Пісок також використовувався на ранніх етапах розробки для друку, наприклад, компанією D-Shape [17].

Перш ніж розпочати, власне, процес друку, на CAD повинна бути створена 3-D модель об'єкта, який буде друкуватися, програмне забезпечення, яке дозволяє дизайнеру створювати 3-D моделі на комп'ютері. Як тільки модель закінчена, файл CAD надсилається на головку принтера. Процес друку починається тоді, коли шар піску товщиною від 5 до 10 мм, змішаний з твердим оксидом магнію (MgO) [18], рівномірно розподіляється головкою принтера в області, обмеженій опалубкою. Головка принтера розбиває 3-D модель на 2-D зрізи. Потім, починаючи з нижнього зрізу, голівка переміщується і осаджує неорганічний зв’язуючий розчин, що включає хлорид магнію [19]. Зв'язуючий розчин та пісок хімічно реагують, утворюючи матеріал пісчаник. Потрібно близько 24 годин, щоб матеріал повністю затвердів. Матеріал за складом нагадує цемент Сорель.

Цей процес відносно дешевий, оскільки досить велика скульптура була створена всього за 60 фунтів стерлінгів і інші структури не повинні коштувати значно більше, ніж ця. Проте міцність структури і придатність для будівництва є дискусійною. Творець D-Shape запропоував ущільнювач, шо перетворює будь-який вид піску в мармуровий матеріал, з набагато кращою міцністю, ніж портландцемент. Однак, в наявності дуже мало доказів, що підтверджують ці висновки.

Процес теж досить повільний, тому що потрібно кілька тижнів, щоб виготовити невелику структуру, яка включає в себе обробку структури вручну.

Принтер, розроблений у цьому проекті, повинен бути настільки самодостатнім, щоб відповідати вибраному ринку масового виробництва. Беручи до уваги уже запатентовану конструкцію піско-принтеру, це може бути дорогим варіантом.

У той час як пісчаник може бути надрукований за допомогою відносно легкого способу, є скепсис щодо міцності створюваного матеріалу і що це може бути прийнято для великомасштабної будівлі. До того ж, пісок не є популярним варіантом для звичайних будівель. Тому такий варіант в подальшому не розглядається.

2.1.2. Метал

Метал не є гарним вибором як з структурних причин, так і з труднощами друку при виробництві великих конструкцій. Основний спосіб друку металів - це з використанням порошку, котрий використовується як вихідний матеріал, при цьому процес займає багато часу і містить багато кроків. Крім того, складний метод друку з металів не добре підходить, якщо розглядати процес з точки зору друку великих структур, таких як будинок.

Порошок, який використовується (різні сполуки металів) - дуже дорогий. За даними компанії, що друкує металеві предмети, було зазначено, що невелика ванна з металу, виготовлена методом 3D друку, коштує близько 2500 фунтів стерлінгів. Якщо ж це буде запроваджено для друку будівлі, витрати на одержання порошку будуть великими, як і загальна вартість будівлі в порівнянні з використанням традиційних методів будівництва.

З точки зору конструкції, будівництво металевого будинку не є ідеальним. Однією з причин цього є забруднення від корозії, наприклад те, що виникає під дощем на металевій поверхні. Ще однією важливішою причиною буде значна вартість виробництва повністю металевої конструкції та складності будівництва металоконструкції. Саме з цих причин метал для будівельного 3D друку не буде розглядатися.

2.1.3. Бетон

Бетонна конструкція є основним матеріалом для 3D друку, оскільки вона вже широко використовується у будівництві, і для цього матеріалу є достатня кількість високорозвинених технологій.

Тому використання бетону залежить від способу його друку великомасштабним 3D-принтером. Існують вже ґрунтовні дослідження та розробки в галузі друку бетоном, в тому числі в Університеті Лафборо (Великобританія). Найбільш підходящим способом для 3D-принту, як це зазначалося раніше, є "контурна обробка".

Домішки. Домішки розглядаються як додаткові компоненти в складі суміші, щоб поєднуватись із цементом, водою та агрегатами, оскільки вони є важливими складовими. Причиною для додавання цих домішок є модифікація конкретних властивостей. Домішки здатні змінювати час твердіння, міцність на стиск, будівельну здатність, полегшують роботу насоса для виготовлення конструкції, змінюють температуру твердіння і навіть колір.

Прискорювачі. Є два типи прискорювачів:

1. Прискорювачі умов твердіння. Прискорення відбувається за рахунок створення певних умов твердіння: прогрів паром при атмосферному тиску, паровий прогрів при підвищеному тиску (автоклав), електричний прогрів і т.п.

2. Прискорювачі твердіння. Застосування прискорювачів твердіння бетону - спеціальних добавок для бетону, дозволяє прискорити набір міцності в природних («польових») умовах і без використання прогрівання.

Хімічні прискорювачі - це продукти, які розчинні у воді та найчастіше мають мінеральне походження: кислота або сильна основа та їх солі. Вони діють шляхом вибіркового модифікування розчинності та швидкості гідратації в’яжучого з ангідридними компонентами. Вони поділяються на 2 категорії: хлорвмісні та безхлоридні домішки.

Хлорвмісні домішки, наприклад: хлорид кальцію; хлорид натрію; суміші хлориду.

Слід зазначити, що для залізобетону застосування хлорних домішок, концентрації, що перевищує 1 г на літр, обмежене оскільки хлор є агресивним агентом.

Безхлоридні домішки: алюмінат соди, калій; силікат соди, поташ; нітрат кальцію. Силікат натрію є високоефективною прискорюючою домішкою (Na_2SiO_3). В основному, використовується в конкретних випадках, приводить з перших хвилин (або навіть секунд) до формування силікагелю. Є також добре відомим водовідштовхувальним засобом.

Використання супер-пластифікатора, високого водозменшуючого компонента, посилює прискорення твердіння.

Сповільнювачі. Цей тип домішок протилежний впливу домішок - прискорювачів в тому, що він використовується для затримки часу твердіння бетонних сумішей за рахунок тимчасового запобігання реакцій гідратації, які відбуваються в бетонній суміші.

Сповільнювачі можуть діяти, зменшуючи швидкість гідратації певних ангідридних складових цементів: навколо частинок цементу або шляхом утворення осаду на частинах вапна (ангідриди зерен ($CaSO_4$)). Отже, таким чином, утворюється більш-менш непроникні оболонки різної товщини.

Затримка твердіння буде залежати від: товщини осаду покриття, його непроникливості, його складу (покриття, створеного домішкою), pH середовища.

Сповільнювачі використовуються: в спекотну пору, при транспортуванні бетону на великі відстані, у випадку часткового бетонування (відновлення бетонування).

Суперпластифікатори. Включення цієї домішки в бетонну суміш дозволяє використовувати меншу кількість води без зміни працездатності або потужності конкретного насоса. Це має очевидні переваги для процесу 3D-друку, оскільки це дозволяє використовувати нижче водоцементне відношення w / c (0,26 і 0,35), що, в свою чергу, забезпечує коротший час підготовки та гарантує, що процес займає менше часу і, таким чином, друк можна зробити швидко.

Це три основні групи домішок, доступних для модифікації властивостей бетону.

Як сповільнювач, так і суперпластифікатор зустрічаються в моделях змішування для процесу 3D друку у вигляді суперпластифікатора на основі полікарбоксилату та аміно-тріасу, лимонної кислоти та формальдегідного сповільнювача.

Проте ці два домішка присутні у невеликій кількості порівняно з іншими двома домішками: диоксидом кремнію та золи, які становлять від 10 до 20% суміші відповідно.

Пил силікату Цей тонкий порошок отримується у вигляді побічних продуктів у виробництві кремнієвих сплавів (рис. 2.1) і може знаходитись в більшості HPC (High Performance Concrete). Ця добавка широко використовується в HPC, оскільки вона включає в себе здатність отримати не тільки бетон з підвищеною міцністю на стиск (більше 100 МПа), але також з меншим часом твердіння.



Рис. 2.1. Діоксид кремнію

Експериментальні дані показали, що включення 30% діоксиду кремнію у суміш для зв'язування може зменшити час початку твердіння не менше 30 хвилин.

Існує багато інших причин, чому в бетоні використовується діоксид кремнію, наприклад, забезпечується рання міцність на стискання, висока міцність на розрив, збільшується міцність, в'язкість і стійкість до стирання, високий електричний опір і підвищене зчеплення. Ще однією перевагою використання діоксиду кремнію є зменшення проникливості до бетонів хлорид-іонів та води. Це має особливе значення, оскільки в стінах будівлі застосовуються сталеву арматуру, а хлорид призводить до корозії сталі. Корозія може мати небезпечні наслідки для структури, тому використання діоксиду кремнію виправдано навіть з цієї точки зору.

Дослідження показали, що загальне зниження водопотреби при додаванні високих концентрацій діоксиду кремнію до бетонної суміші можливо за умови, що також використовується ефективний суперпластифікатор.

Додавання діоксиду кремнію (> 5%) без додавання суперпластифікатора призведе до зниження пластичності та значного збільшення водопотреби.

Суперпластифікатор розсіює частинки цементу та діоксид кремнію у суміші та зменшує контактні точки між різними зернами. Це означає, що для отримання певної консистенції необхідна менша кількість води.

Зольний пил - продукт згоряння пиловугільного палива на електростанціях. Існує безліч переваг для використання золи, що використовується в бетонній суміші. По-перше, подібно до діоксиду кремнію, використання золи знижує проникність бетону для води та інших агресивних хімікатів, тому значно зменшується небезпека корозії сталевої арматури.

Наявність золи зменшує об'єм пор у бетоні, що також зменшує проникність і, що більш важливо, підвищує міцність бетону.

Тонкі частки в золі (і кремнеземі) сприяють зменшенню сегрегації в бетоні та забезпечують пластичний бетон, який краще впливає на потужність насоса, а також маневреність, що, у свою чергу, дозволяє друк більш складних конструкцій.

Для сумішей з одинаковим вмістом цементу, із золою і без золи, та, що з золою, як правило, буде набагато більше життєздатною для даної консистенції, коли для заміни цементу застосовують золу (див. рис 2.3).

Коли для заміни цементу застосовують золу (див. рис 2.3), як результат, вміст крупного заповнювача в бетонній суміші, як правило, може бути збільшений,



Рис. 2.2. Зовнішній виглядом зольного пилу



Рис. 2.3. Вплив зольного пилу на консистенцію бетону

Поліпропіленові волокна. Поліпропіленові волокна номінальною довжина 6, 12 або 18 мм - ідеальна домішка в бетонних сумішах для того, щоб зменшити пластичну усадку, підвищити тріщиностійкість і властивості бетонної поверхні (рис. 2.4).

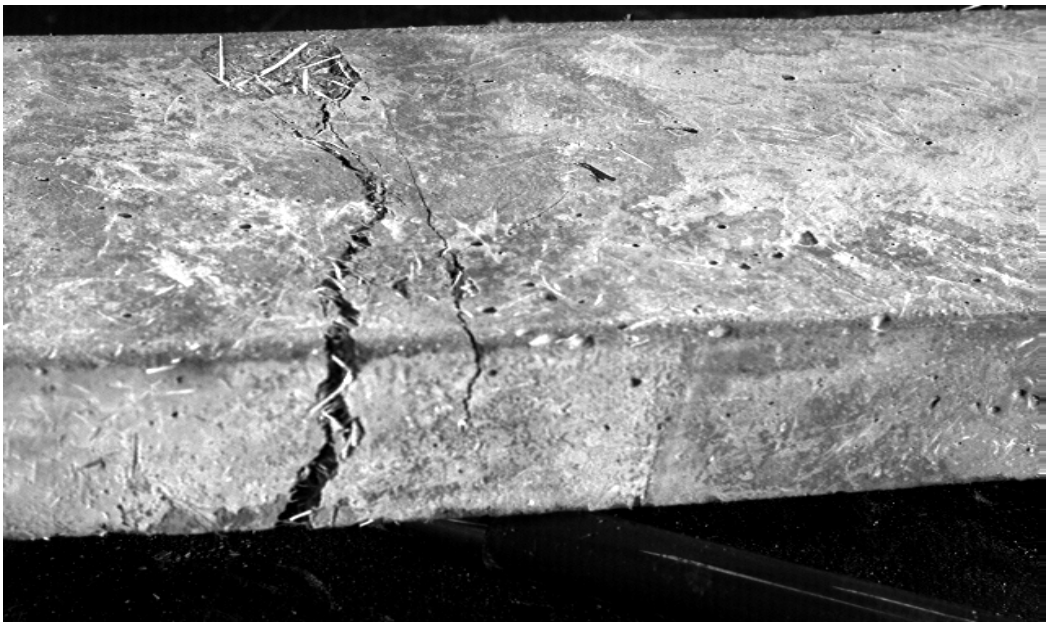


Рис. 2.4. Зразок бетону, що містить поліпропіленові волокна

Волокна не замінюють традиційну сталеву конструкційну арматуру або звичайну кількість застосування цементу. Додавання пропіленових волокон у рекомендованій дозі 0,6 - 0,9 кг / м^3, зазвичай, не вимагає відмінностей у складі бетонної суміші.

Випробування показали, що волокна збільшують зчеплення і зменшують розшарування бетонної суміші. Мінімальна кількість волокон, що вводяться в бетон, становить 0,6 кг / м^3.

У сухій суміші перші повинні додаватись дрібні частинки, а потім - більші волокна і частинки.

При вологому змішуванні товщина матриці не повинна бути ні занадто товстою, ні занадто тонкою, щоб забезпечити негайне диспергування і змішування волокон. Для цього, може бути корисно використовувати суміш з половиною необхідної кількості води (в тому числі пластифікатора), з

подальшим введенням волокон, змішуванням і додаванням води, що залишилася. Волокна в бетонозмішувач додають за допомогою бункера. Бетон повинен бути змішаний протягом, принаймні, п'яти хвилин (швидкість мішалки приблизно 10 об / хв) з метою забезпечення рівномірного розподілу суміші.

Вапняковий наповнювач. Вапняковий наповнювач - це тонкий мінерал, отриманий шляхом помелу вапнякового каменю, для того, щоб відповідати критеріям відповідності норми щодо вапнякових мінеральних домішок. Цей матеріал, якщо він тонкомелений, вписується в цементне тісто (рис. 2.6) і, таким чином заповнює проміжки між іншими розмірами великих частинок бетону (цемент, заповнювач). Ефект, який називається ефектом наповнювача, призводить до більшої компактності гранульованого скелета і, отже, має вплив на властивості як у свіжому стані, так і в затверділому стані.



Рис. 2.5. Типи вапнякового наповнювача

Карбонатний наповнювач, в основному використовується в якості інертного, для того, щоб замінити частину цементу.

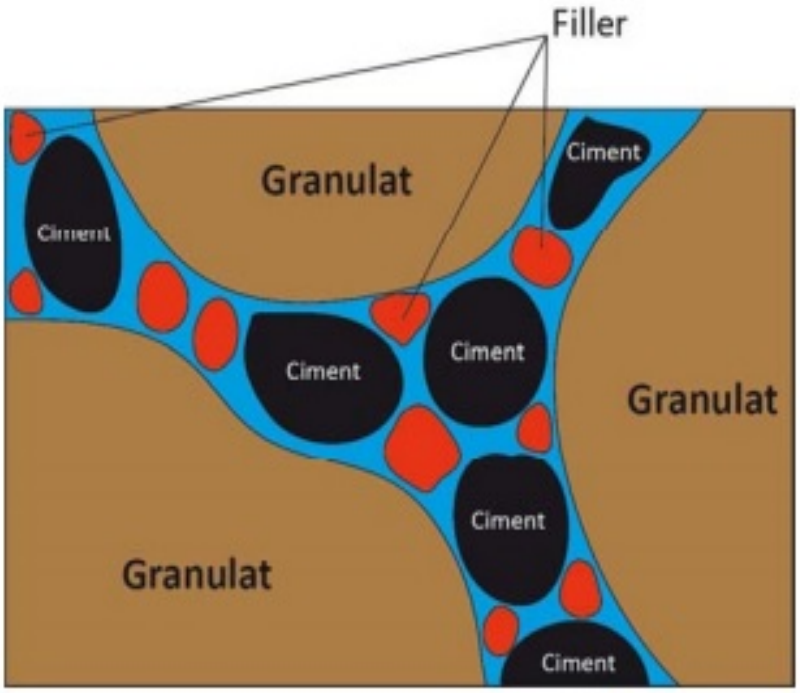


Рис. 2.6. Ілюстрація ефекту (дії) наповнювача

Каолінова біла глина (рис. 2.7). Білий цемент - це портландцемент, виготовлений з спеціально відібраної сировини, яка, як правило, є чистою крейдою та білою глиною (каоліном), що містить дуже малі кількості оксидів заліза та оксидів марганцю. Білий цемент часто вибирається архітекторами для використання у виробництві білого або кольорового бетону.



Рис. 2.7. Каолін.

Сьогодні це визнана домішка, яка забезпечує цілий ряд переваг:

- Підвищену міцність на стиск та міцність на згин.
- Підвищену довговічність.
- Виготовлення бетону з екологічними характеристиками сталого розвитку.
- Зменшення викидів парникових газів у порівнянні з бетоном, виготовленим повністю з портландцементу.
- Зменшену проникність (включаючи проникність до іонів хлориду), що забезпечує додатковий захист від корозії арматурної сталі.
- Значне зменшення вицвітання (білий порошок, який іноді з'являється на поверхні бетону або розчину, обумовлений соляними відкладеннями, що переносяться на поверхню вологою).
- Покращена пластичність та легкоукладуваність.
- Виготовлення білого бетону, що полегшує виготовлення кольорових бетонів.
- Поліпшення характеристик сонячного відбиття, зменшення ефекту теплового острова та сприяння більш енергоефективним будівлям ы спорудам.

Сталеві волокна. Металеві волокна мають різноманітні типи та форми і мають дуже гарну сумісність з бетоном. На рис. 2.8, рис. 2.9 показані різні геометрії металевих волокон.

Фібробетон - це специфічний матеріал, утворений шляхом змішування металевих волокон з іншими бетонними компонентами.

Волокна виготовлені з вуглецевої сталі, нержавіючої сталі або оцинкованої сталі. Довжина волокон коливається від 25 до 60 мм, а діаметр коливається від 0,5 до 1,3 мм. Виготовлення металевих волокон здійснюється за кількома способами у зв'язку з їх численними геометричними формами

Фібробетон - локально армований залізобетон. Як за традиційним посиленням армованого бетону, мета волокон полягає в керуванні розтріскуванням. На відміну від залізобетону, де арматура знаходиться в

опалубці до укладання бетону, металеві волокна змішують з іншими компонентами бетону, щоб сформувати матеріал - фібробетон.

Одною з основних переваг додавання волокна є краще регулювання тріщиностійкості бетону. Волокна мають особливість поглинання енергії розтріскування та перерозподілу механічних напружень у матриці бетону.

Розподіл волокон в бетонній масі може перешкоджати крихкому руйнуванню бетону і поширенню мікротріщин (рис. 2.9).

Залежно від використовуваних волокон та структур, в яких вони включені, ця роль призводить до усунення пошкоджень, пов'язаних з:

- міцністю на розтягування,
- ударостійкістю,
- стійкістю до втоми,
- стійкістю до стирання,
- зменшенням усадкових тріщин.

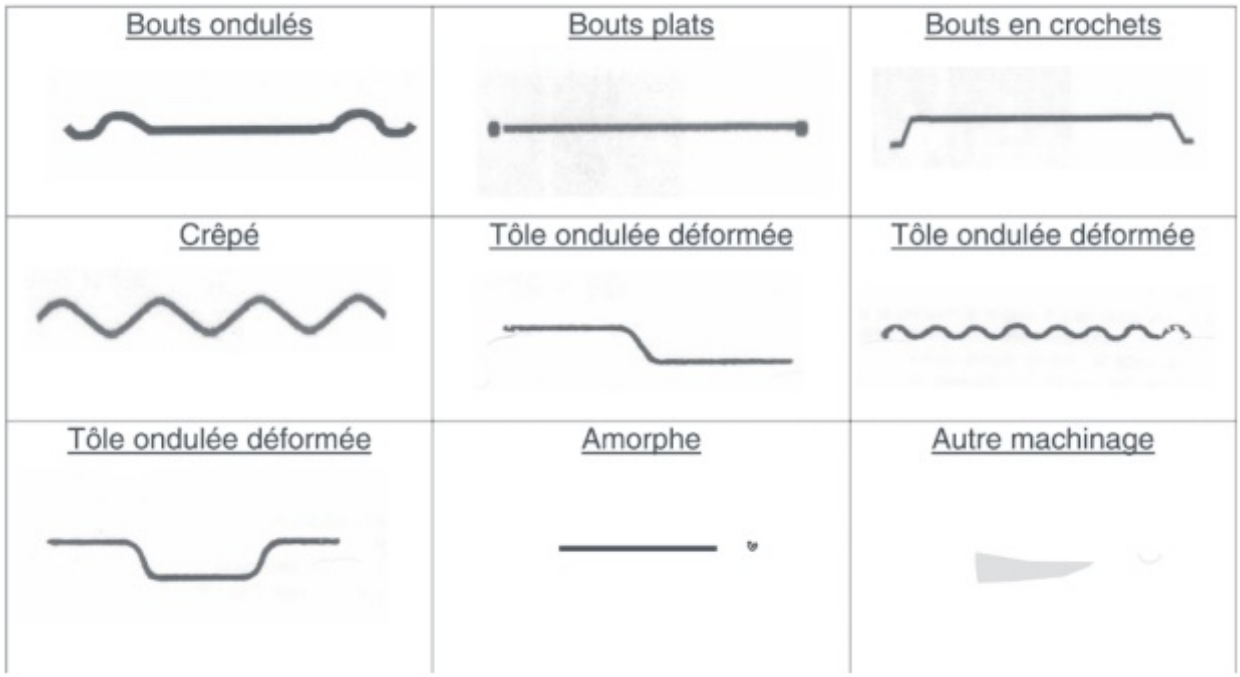


Рис. 2.8. Геометрія металевих волокон

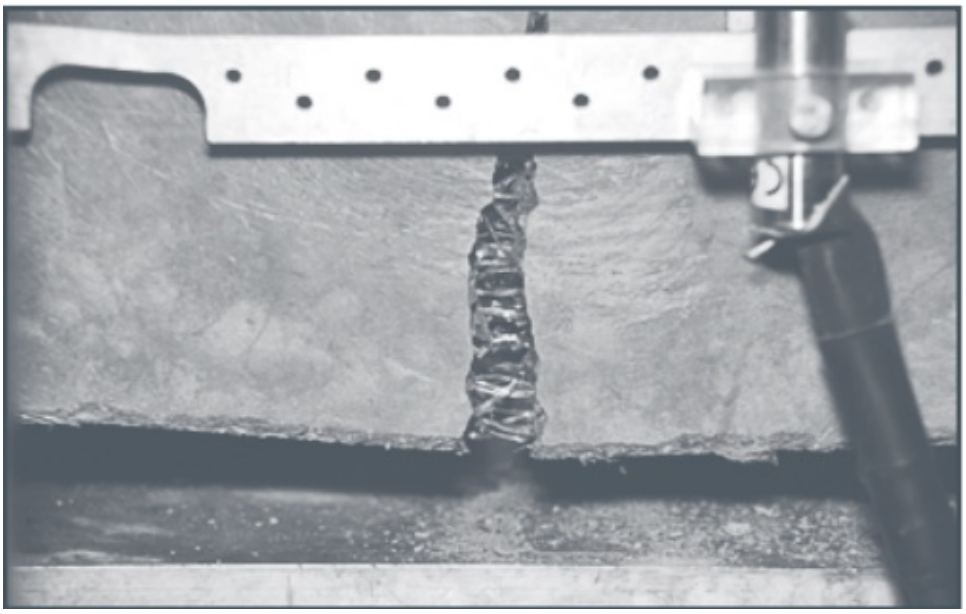


Рис. 2.9. Бетонні деталі, що містять сталеві волокна

2.2. Світовий досвід створення бетонів для 3Д друку будівельних об’єктів

Існують різноманітні матеріали для 3D-друку, що застосовуються в будівельних масштабах: екструзія (бетон / цемент, віск, піна, полімери), порошкове склеювання (полімерне з'єднання, реакційноздатне з'єднання, спікання) та адитивне зварювання [1].

У 2013 році компанія Winsun (Шанхай, Китай) надрукувала першу партію з 10 будинків за допомогою спеціальних «чорнил» з цементу, піску та волокон разом із фірмовою добавкою [2].

У дослідженні [3] друкарські суміші містили нано-глину, кремнезем і волокна.

Автори [4] використовували розчин на основі цементу на основі поліпропіленового волокна (табл. 2.1).

Таблиця 2.1.

Матеріали композицій (кг/м^3) для 3DCP

Композиція	Пісок	Цемент	Зола-унос	Кремнезем	Водаr	Автори
1	1241	579	165	83	232	[4]
2	810	253	192	61	152	[5]

У роботі [5, 6] досліджено вплив суперпластифікатора на текучість, технологічність та міцність розчину на основі цементу. Для контролю за реологією розчинів були додані також прискорювач і сповільнювач.

Широкомасштабний 3D-друк на основі цементу або інших в’яжучих забезпечується формуванням шляхом точного розміщення або затвердіння конкретних обсягів матеріалу в послідовних шарах за допомогою комп'ютерного керованого процесу позиціонування [7]. Цей підхід до 3D-друку складається з трьох загальних етапів: підготовка даних, підготовка бетону та друк компонентів [8].

Реалізовані різноманітні методи для генерації роботизованих будівельних контурів. Загальний підхід полягає в нарізанні 3D форм и об’єкта на плоскі тонкі шари постійної товщини, які можна складати один на одного. У цьому способі кожен шар складається з контурної лінії та схеми наповнення, яка може бути реалізована у вигляді сотових структур або кривих заповнення простору. Іншим методом є метод дотичної неперервності, який створює тривимірні будівельні контури з локальною мінливою товщиною. Цей метод призводить до створення постійних контактних поверхонь між двома шарами і забезпечує відсутність геометричних зазорів між двома шарами, які часто обмежують процес 3D-друку [9].

Етап підготовки матеріалу включає змішування і поміщення бетону в контейнер. Після того, як свіжий бетон поміщений в контейнер, його можна транспортувати через систему «насос – труба - форсунка» для друку

самоущільнених бетонних ниток, які можуть створювати пошарові структурні компоненти [10]. У адитивних процесах важливе значення для нанесення розчинів мають здатність до перекачування насосом і стабільність екструзії. Ці властивості залежать від складу бетонної суміші, системи подачі та пристрою осадження. Загальні технічні характеристики свіжого бетонного розчину для 3D-друку поділяються на такі основні характеристики [5, 8]:

Текучість (pumpability, flowability): легкість і надійність переміщення матеріалу через систему доставки;

Друкованість, екструдабільність (printability, extrudabiliti)**:** легкість та надійність осадження матеріалу через екструдер;

Технологічність виготовлення або будівельна здатність (buildability): стійкість осадженого мокрого матеріалу до деформації під навантаженням;

Клейкість шару (layer adhesiveness): надійність адгезії шарів розчину;

Відкритий час (open time): період, коли вищевказані властивості узгоджуються у межах допустимих допусків.

Для виконання процесу друку потрібна система управління. Ці системи, як правило, можна розділити на дві категорії: козлові системи та роботизовані операційні системи. Козлові системи приводять в дію маніпулятор, встановлений вверху, щоб насадка мала змогу друку в декартових координатах XYZ.

Роботизовані операційні системи надають додаткові ступені свободи насадці, дозволяючи виконувати більш точні робочі процеси друку, такі як друк методом дотичної безперервності [9]. Незалежно від системи, що використовується для друку (козловий кран або робототехнічна рука), координація між швидкістю руху насадки та витратою матеріалу є визначальною для результату створення друкованої нитки [11]. У деяких випадках багаторазові роботизовані системи 3D-друку можуть бути запрограмовані для одночасного запуску, що призводить до скорочення часу виготовлення [12]. Нарешті, автоматизовані процедури після обробки також можуть застосовуватися в сценаріях, які вимагають видалення опорних конструкцій або будь-якої обробки поверхні [8].

2.3. Розробка складів бетонів для технології 3Д друку

Метою даного етапу роботи було визначення реакційної здатності в'яжучих компонентів, що входять до складу сумішей, та визначення їх оптимальної кількості в суміші. Крім того, завдання полягало у порівнянні термінів початку та кінця тужавлення розчинів з різними вяжучими компонентами та прискорювачами.

У ході досліджень було виготовлено та випробувано 24 суміші. Застосовували чотири різні типи в'яжучих: а) глиноземний цемент; високоглиноземний цемент; в) портландцемент; г) рідке скло; д) порошкове вапно.

Отверджувачами рідкого скла були: а) силікофторид натрію; б) ферохромний шлак; в) портландцемент М400; г) глиноземний цемент.

В якості прискорювачів для затвердіння сумішей використоні: а) будівельний гіпс; б) хлорид кальцію $CaCl_2$; в) борну кислоту; г) соду Na_2CO_3.

Для визначення ступеня впливу отверджувачів до складу сумішей на рідкому склі додатково вводили наповнювач - концентрат дистенсіліманіту.

Композиції на цементних в'яжучих створювались шляхом додавання до вяжучої речовини відповідної кількості води. У разі використання прискорювача суміші цей компонент розчиняли у воді.

Склади рідко-скляних сумішей виготовляли у такому порядку: спочатку компоненти ретельно перемішували протягом 2 хвилин, потім додавали рідке скло і всю суміш перемішували протягом 2-3 хвилин до отримання однорідної маси.

Прилад Віка використовувався для визначення консистенції та встановлення періоду тужавлення сумішей (рис. 2.10). Консистенція розчину визначається заданий опором проникненню за допомогою стандартного плунжера. Для встановлення періоду тужавлення сумішей використовується також прилад Віка, але плунжер замінюється сталевою голкою.


а)

б)

Рис. 2.10. Дослідження стандартної консистенції а) і термінів тужавлення б) бетону

Стандартна консистенція розчину була досягнута, коли плунжер занурений у кільце, наповнене сумішшю, не досягав 5-7 мм до плити, на яку було встановлено кільце.

Терміни тужавлення визначалися зануренням голки в бетонну суміш. Початковий час тужавлення - це час, виміряний від нуля, при якому відстань між голкою та базовою пластиною становить 4 ± 1 мм. Остаточний час тужавлення - це час, виміряний від нуля, при якому голка проникає лише на 0,5 мм у зразок.

Компоненти сумішей і результати досліджень їх характеристик наведені в таблиці 2.2 - таблиці 2.4.

Загальний вигляд зразків композицій 1-3 після визначення термінів схвачування приведено на рис. 2.11.

Як видно з даних, наведених у таблиці 2.2, використання цементних в'яжучих речовин (склади 1-5) для розчинів характеризується тривалими термінами схвачування. У той час, коли початок схвачування становить 75-465 хв, це означає, що ці в'яжучі не є технологічно ефективними при нанесенні розчину за допомогою 3D-принтера.



Рис. 2.11. Загальний вигляд зразків композицій 1-3 після визначення терміну схвачування

Таблиця 2.2.

Матеріали сумішей і властивості розчинів складів 1-8

Компоненти і властивості розчинів	№ складу/ вміст в мас. % / показники							
	1	2	3	4	5	6	7	8
глиноземний цемент	78,4	-	71,9	-	-	-	-	-
високо-глиноземний цемент	-	76,9	-	-	-	-	-	-
рідке скло	-	-	28,1	-	-	5,9	11,9	18,9
портланд - цемент М400	-	-	-	78,4	-	73,9	68,6	62,4
портланд - цемент М500	-	-	-	-	77,9	-	-	-
вода	21,6	23,1	-	21,6	22,1	20,2	19,5	18,7
нормальна густина	0,275	0,3	0,39[1]	0,275	0,283	0,353[2]	0,457[2]	0,603[2]
початковий термін схвачування, хвилини	380	465	75	190	235	60	17	10
кінцевий термін схвачування, хвилини	590	535	85	255	320	115	110	20

Примітка: [1] Відношення «рідке скло до цементу»;

[2] Відношення рідкого скла і води до цементу.

Серед складів на цементних в'яжучих найбільш економічно доцільно варіювати термінами схвачування суміші при застосуванні портландцементу М400 (рис. 2.12, рис. 2.13).

Значного зниження термінів схвачування можна домогтися при введенні в в'яжучий на портландцементі добавок рідкого скла (склади 6-9). При цьому найбільш доцільно застосування складу 7 з добавкою рідкого скла 11,9%, коли початок схвачування наступає через 17 хв. після укладання суміші. Подальше збільшення в суміші кількості рідкого скла хоча і веде до подальшого скорочення термінів схвачування, однак при цьому суміш стає нетехнологічною через її комкування.

Таблиця 2.3.

Матеріали сумішей і властивості розчинів складів 9-16

Компоненти і властивості розчинів	№ складу/ вміст в мас. % / показники							
	9	10	11	12	13	14	15	16
портланд - цемент М400	75,2	69,6	75,8	72,8	73,2	70,3	71,8	72,8
мелене вапно	-	-	-	-	-	4,2	2,15	1,5
будівельний гіпс	2,2	6,0	-	-	-	-	-	-
хлорид кальцію $CaCl_2$	-	-	1,5	2,9	-	2,1	2,15	1,5
борна кислота	-	-	-	-	2,4	-	-	-
вода	22,6	24,4	22,7	24,3	24,4	23,4	23,9	24,2
нормальна густина	0,29	0,322	0,294	0,32	0,323	0,306	0,314	0,32
початковий термін схвачування, хв.	105	80	80	37	250	35	40	60
кінцевий термін схвачування, хв.	160	135	135	65	575	70	75	90

Застосування в складах сумішей прискорювачів твердіння як гіпсу і борної кислоти (склади 9-10,13) не дозволяє досягти термінів схвачування, прийнятних

для укладання суміші за допомогою 3-D принтера. Більш того, застосування борної кислоти значно подовжує терміни схвачування.

Застосування в якості прискорювача хлористого кальцію ефективно тільки при його вмісті в суміші 2,9% (склад 12), при цьому початок схвачування становить 37 хв.

Таблиця 2.4.

Матеріали сумішей і властивості розчинів складів 17-24

Компоненти і властивості розчинів	№ складу/ вміст в мас. % / показники							
	17	18	19	20	21	22	23	24
портланд - цемент М400	73,3	74,5	74,7	72,0	-	-	3,2	-
мелене вапно	-	-	-	1,6	-	-	-	-
сода Na_2CO_3	2,2	0,7	0,4	0,4	-	-	-	-
вода	24,5	24,8	24,9	26,0	-	-	-	-
концентрат дистенсиллі-маніту	-	-	-	-	66,7	66,7	66,7	66,7
ферохромовий шлак	22,6	24,4	22,7	24,3	3,2	-	-	-
Кремнефторис-тий натрій	-	-	-	-		3,2	-	-
глиноземний цемент	-	-	-	-	-	-	-	3,2
рідке скло	-	-	-	-	30,1	30,1	30,1	30,1
нормальна густина	0,324	0,33	0,332	0,353	0,43[1]	0,43[1]	0, 43[1]	0, 43[1]
початковий термін схвачування, хв.	5	9	10	170	20	25	70	100
кінцевий термін схвачування, хв.	15	25	135	195	30-35	37	175	210

Примітка: [1] Відношення рідкого скла до сипучих компонентів.



Рис. 2.12. Загальний вигляд зразків композицій 4-11 після визначення термінів схвачування

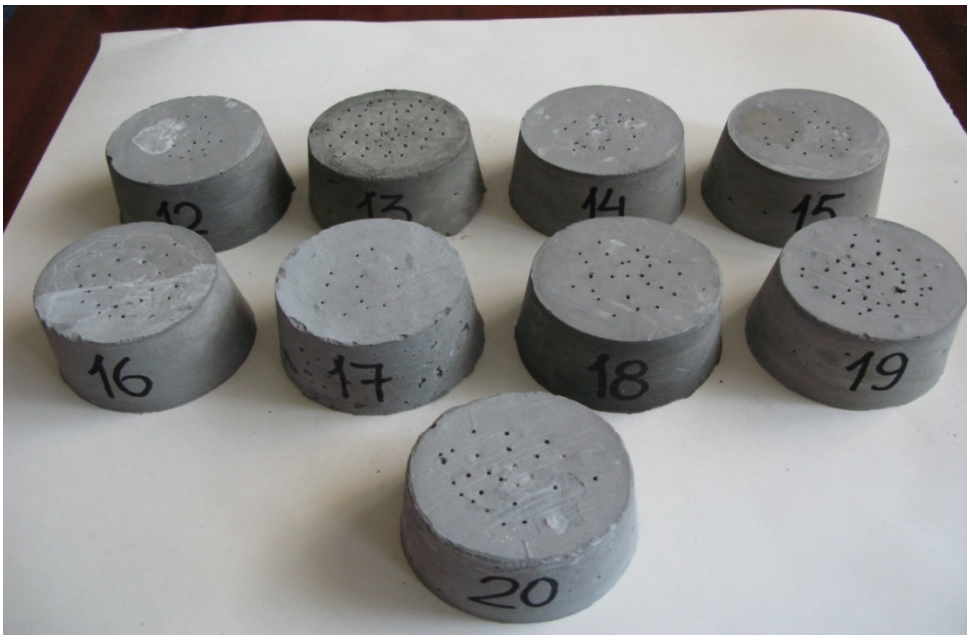


Рис. 2.13. Загальний вигляд зразків на в'яжучому з портландцементу після визначення термінів схвачування (склади 12-20)

Застосування поєднання вапно - хлористий кальцій ефективно при їх співвідношенні 2: 1 і 1: 1 (склади 14,15), при цьому початок схвачування таких сумішей настає через 35-40 хв.

Цікавим є застосування в якості прискорювача твердіння сумішей соди (склади 17-19). При цьому відбувається інтенсивне схвачування сумішей, а початок схвачування сумішей настає вже через 5-10 хв. Однак застосування складу 17 технологічно недоцільно через труднощі укладання суміші в форму. Також не доцільно додаткове введення до соди вапна, так як при цьому значно збільшуються терміни схвачування суміші.

Використання сумішей на в'яжучому із рідкого скла найбільш ефективно при використанні в якості отверджувачів феррохромового шлаку і кремнефтористого натрію (склади 21, 22). При цьому терміни початку схвачування сумішей становлять 20 - 25 хв., а кінця схвачування 30-37 хв.

Таким чином, для прискорення термінів схвачування сумішей на в'яжучому з портландцементу ефективно застосування добавок рідкого скла і соди, а при використанні в якості в'яжучого рідкого скла - отверджувачів у вигляді феррохромового шлаку і кремнефтористого натрію.

2.4. Фізико-механічні характеристики бетону за технологією 3D-друку

З метою визначення характеристики міцності і щільності бетонів, які виготовляються за методом 3D-друку, в лабораторії по випробуванню будівельних матеріалів та конструкцій ДВНЗ ПДАБА були проведені експериментальні дослідження бетонних зразків.

Бетонні суміші для досліджень виготовлялися на підприємстві, що випускає дрібноштучні вироби за технологією 3Д друку, яке розташоване в с. Братське, Дніпровського району, Дніпропетровської області.

2.4.1. Характеристика вихідних матеріалів та технологія виготовлення бетонних зразків

Характеристика вихідних матеріалів – компонентів бетонних сумішей

Для виготовлення виробів в приміщенні цеху використовуються бетонні суміші, які складаються з наступних матеріалів:

а) щебеню;

б) піску річкового;

в) портландцементу М500 Heiderbergcement;

г) води;

д) пластифікатору В10;

ж) прискорювача тужавлення Redament;

з) фібри поліпропіленової BauGut довжиною 6-9мм.

Фракційний склад вихідних компонентів визначали шляхом просіювання через набір стандартних сит за методикою [13, 14]. Фракційний склад щебеню та річкового піску наведений в табл.2.5.

Таблиця 2.5.

Фракційний склад компонентів бетонної суміші

Найменування компонентів	Повні залишки на ситах, %, з розміром вічок в мм							
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	менше 0,16
Щебінь	-	30,27	61,78	4,11	0,96	1,85	0,96	0,07
Пісок річковий	-	-	-	0,31	3,4	86,67	9,18	0,44

Згідно отриманому фракційному складу піску був встановлений його модуль крупності, який дорівнює 0,98. Таким чином, за модулем крупності $М_{кр}$ пісок відноситься до дрібнозернистого.

За методикою для сипучих матеріалів, наведеною в [13, 14] були встановлені об'ємні насипні ваги щебеню, піску та портландцементу. Об'ємна насипна вага щебеню склала 1320 кг/м^3, піску - 1460 кг/м^3, портландцементу - 1100 кг/м^3.

Вологість матеріалів визначали за методикою [13, 14]. В результаті визначення встановлено, що вологість щебеню становить 0,8%, а піску – 6,73%.

Оскільки пластифікатор В10 та прискорювач твердіння Redament є рідинами, то заміряли ареометром їх щільність. В результаті визначення щільність пластифікатора В10 склала 1,0 г/см^3, а прискорювача тужавлення Redament – 1,15г/см^3.

Враховуючи фракційний склад компонентів, а також їх об'ємну вагу, встановлені витрати компонентів бетону в суміші, які становлять, мас,%: щебінь– 39,44, пісок– 36,35, цемент – 19,17, вода – 4,98, пластифікатор – 0,035, прискорювач тужавлення – 0,01, фібра – 0,008.

Технологія виготовлення бетону і бетонних зразків

Бетонний розчин готували в бетонозмішувачі БСМ-500, з об'ємом барабану 500 л. Потужність двигуна бетонозмішувача складала 2,2 кВт, а частота обертання – 18 об/хв. Загальний вигляд бетонозмішувача наведений на рис. 2.1.

Технологія виготовлення суміші була прийнята наступною. Спочатку в воду додавали послідовно пластифікатор, прискорювач твердіння і фібру і всю рідину перемішували протягом 1 хв. Рідину заливали в бетонозмішувач, запускали двигун і додавали необхідну кількість піску і цементу. Отриману суміш перемішували протягом 2 хв. Потім додавали необхідну кількість щебеню і усю суміш перемішували на протязі 2-3 хв до отримання однорідної маси. Виготовлений бетонний розчин подавали в відрові ємності.

Технологія укладки суміші включала в себе наступні етапи:

1. Загрузку виготовленої суміші в ємність бетоноукладача об'ємом 20л з перемішуванням цієї суміші шнеком.

2. Розміщення каретки над формами, яка зв'язана з ємністю бетоноукладача, на рухомій поперечній балці, яка переміщується по двох повздовжніх нерухомих балках.

3. Переміщення каретки, яка зв'язана з ємністю бетоноукладача в необхідному напрямку за допомогою комп'ютерної програми на мові G-коду.

4. Витискування суміші через сопло діаметром 40мм, з отриманням шару суміші шириною 55-60мм.

На рис. 2.15. наведений вигляд 3D принтеру, в процесі виготовлення секцій огородження.



Рис. 2.14. Загальний вигляд бетонозмішувача БСМ-500



Рис. 2.15. Загальний вигляд 3D принтеру при виготовленні секцій огородження

Бетонні зразки виготовлялись у стальних формах та вирізались з конструкцій, отриманих методом 3D друку. Зразки у формах виготовляли безпосередньо біля бетонозмішувача. Загальний вигляд виготовлених зразків наведений на рис. 2.16.

Для проведення дослідження міцності та щільності бетонів виготовляли зразки - куби розмірами 150 х 150 х 150 мм, 100х100х100мм, 70х70х70мм і 50 х 50 х 50мм.

Усього для проведення дослідження міцності та щільності бетонів, виготовлених за традиційною технологією і методом 3D - друку, було виготовлено по шість зразків кожного розміру. Таким чином було виготовлено по 24 зразки-куби, а усього кількість бетонних зразків - кубів для зазначених випробувань склала 48.

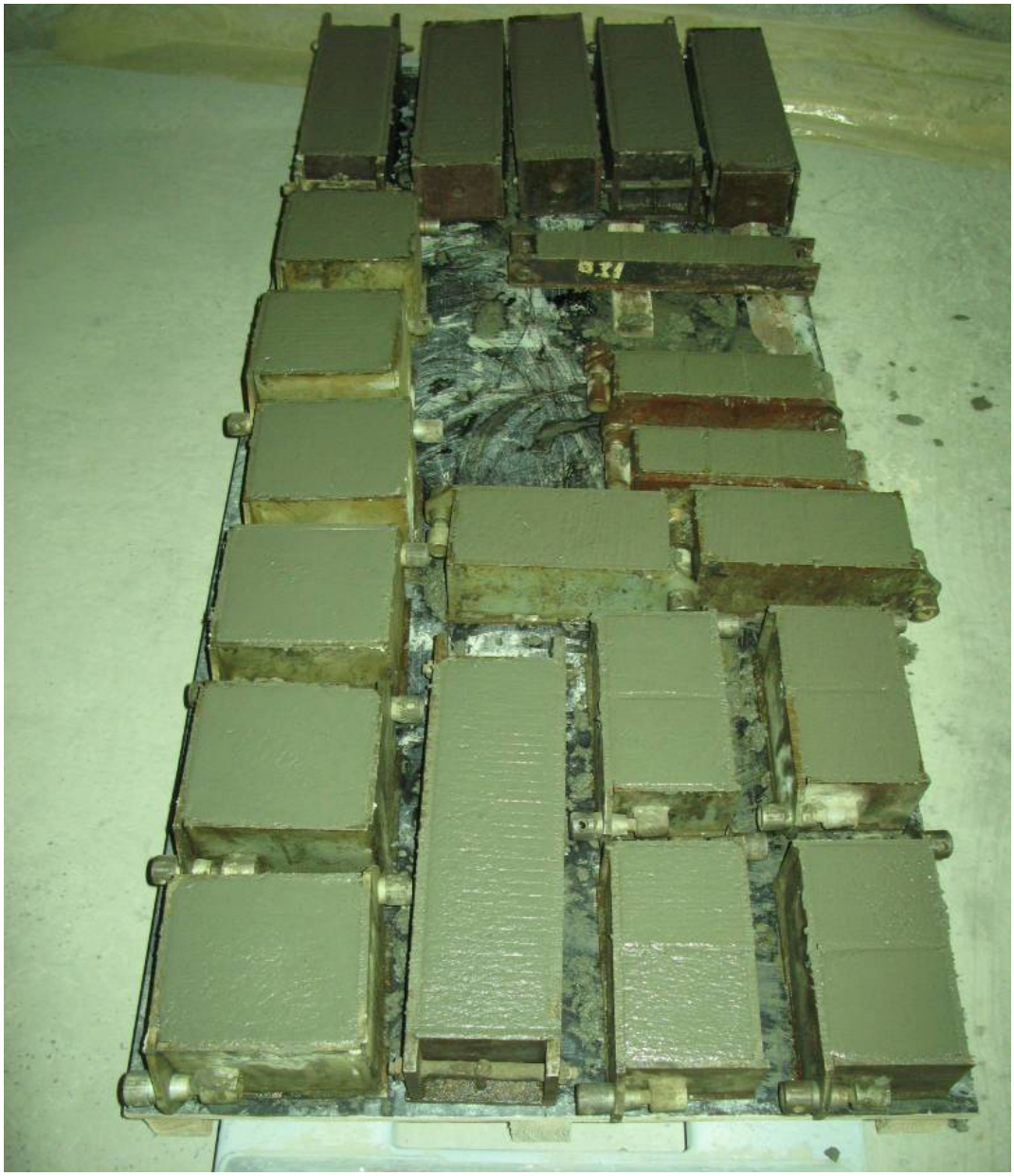
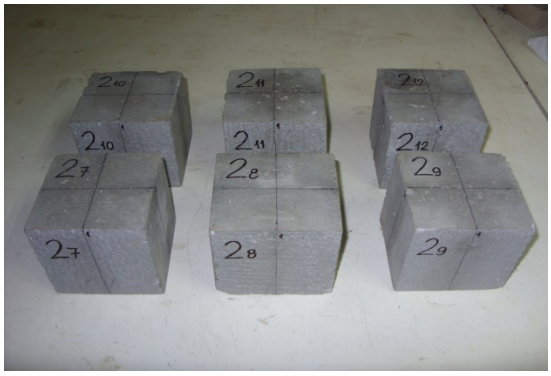


Рис. 2.16. Загальний вигляд зразків, що виготовлялись в формах

Для визначення характеристик водостійкості бетонів, таких як межа міцності при стиску, об'ємна вага, лінійного і об'ємного набухання і коефіцієнта розм'якшення виготовляли зразки - куби розмірами 100 х 100 х 100 мм (рис. 2.17). Усього було виготовлено по шість зразків, виготовлених за традиційною технологією і методом 3D - друку. Таким чином загальна кількість бетонних зразків-кубів для зазначених випробувань склала 12.



а)



б)

Рис. 2.17. Загальний вигляд бетонних зразків, номінальним розміром ребра 100 мм: а) виготовлених в формах, б) відібраних з конструкцій

Для визначення деформативних характеристик бетонів виготовляли призми розмірами 100 х 100 х 400 (висота) мм за традиційною технологією і методом 3Д друку. Загальний вигляд зразків для визначення призмової міцності на осьовий стиск та модуля пружності наведений на рис. 2.18 .





а)





б)

Рис. 2.18. Загальний вигляд бетонних призм, виготовлених: а) в формах, б) відібраних з конструкцій, що виготовлялись методом 3D-друку

Перед проведенням досліджень зразки витримували 28 діб в нормальних термовологісних умовах.

Методика проведення випробувань

Міцність бетону на стиск в МПа визначали в лабораторних умовах на зразках - кубах згідно нормативного документу [15]. Зразки - куби розмірами 150 х 150х150 мм, 100х100 х100 мм та 70 х 70 х 70 мм доводили до руйнування на пресі П-125 (рис. 2.19). Зразки-куби розмірами 50 х 50 х 50 мм доводили до руйнування на пресі УММ-20 (рис. 2.20). Швидкість підйому навантаження складала 4 кН за секунду.

Межу міцності на стиск визначали шляхом відношення руйнівного навантаження до площі поперечного перерізу зразка.

Об'ємну вагу зразків в кг/м^{3}визначали згідно нормативного документу [16] шляхом їх контрольного зважування (рис. 2.21) та відношення цієї ваги до об'єму зразка. Об'єм зразка визначали шляхом його розмітки та вимірювання розмірів в характерних перерізах (рис. 2.22).

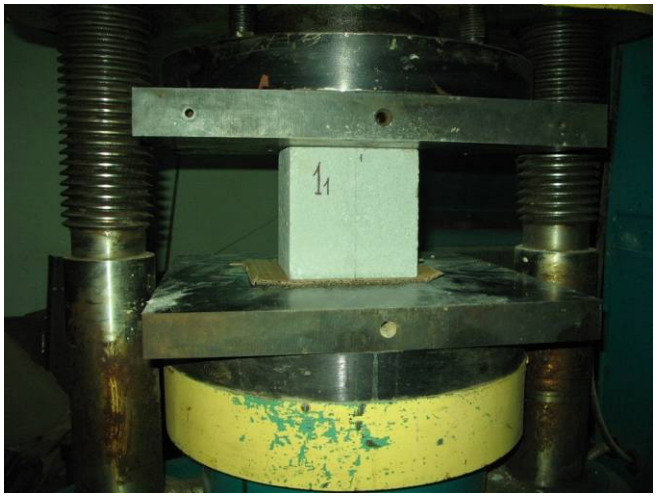




Рис. 2.19. Визначення міцності на стиск бетонних зразків розміром 150 х 150 х 150 мм, 100х100 х100 мм та 70 х 70 х 70 мм на пресі П-125

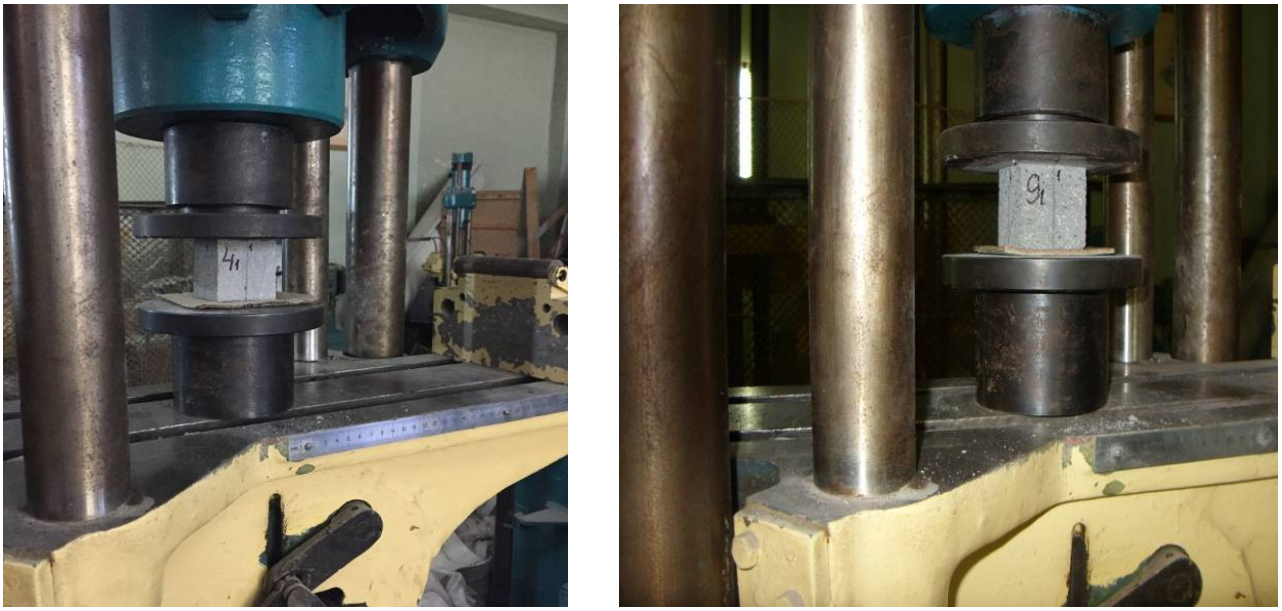


Рис 2.20. Визначення міцності на стиск бетонних зразків розміром 50 х 50 х 50 мм на пресі УММ-20



Рис. 2.21. Зважування зразків бетону для визначення їх об’ємної маси



Рис. 2.22. Вимірювання лінійних розмірів зразків

Для визначення характеристик водостійкості бетонів, таких як межа міцності при стиску, об'ємна вага, лінійного і об'ємного набухання і коефіцієнта розм'якшення зразки - куби витримували під водою на протязі 2-х діб (рис. 2.23), а потім виймали з води і витирали від залишкової води ганчіркою. Загальний вигляд зразків після водонасичення наведений на рис. 2.24.

Міцність водонасичених бетонів на стиск та їх об'ємну вагу визначали аналогічно визначенню цих характеристик бетонів до водонасичення. Водонасичені зразки-куби, розмірами 100х100 х100 мм, доводили до руйнування на пресі П-125

Коефіцієнт розм'якшення визначали згідно методиці [21], як відношення міцності зразків в водонасиченому стані до міцності зразків в сухому стані.

$$К_р = \frac{R_в}{R_с}, \qquad (2.1)$$

де: $R_в$ – міцність зразків після водонасичення, МПа;

$R_с$ - міцність зразків до водонасичення, МПа.

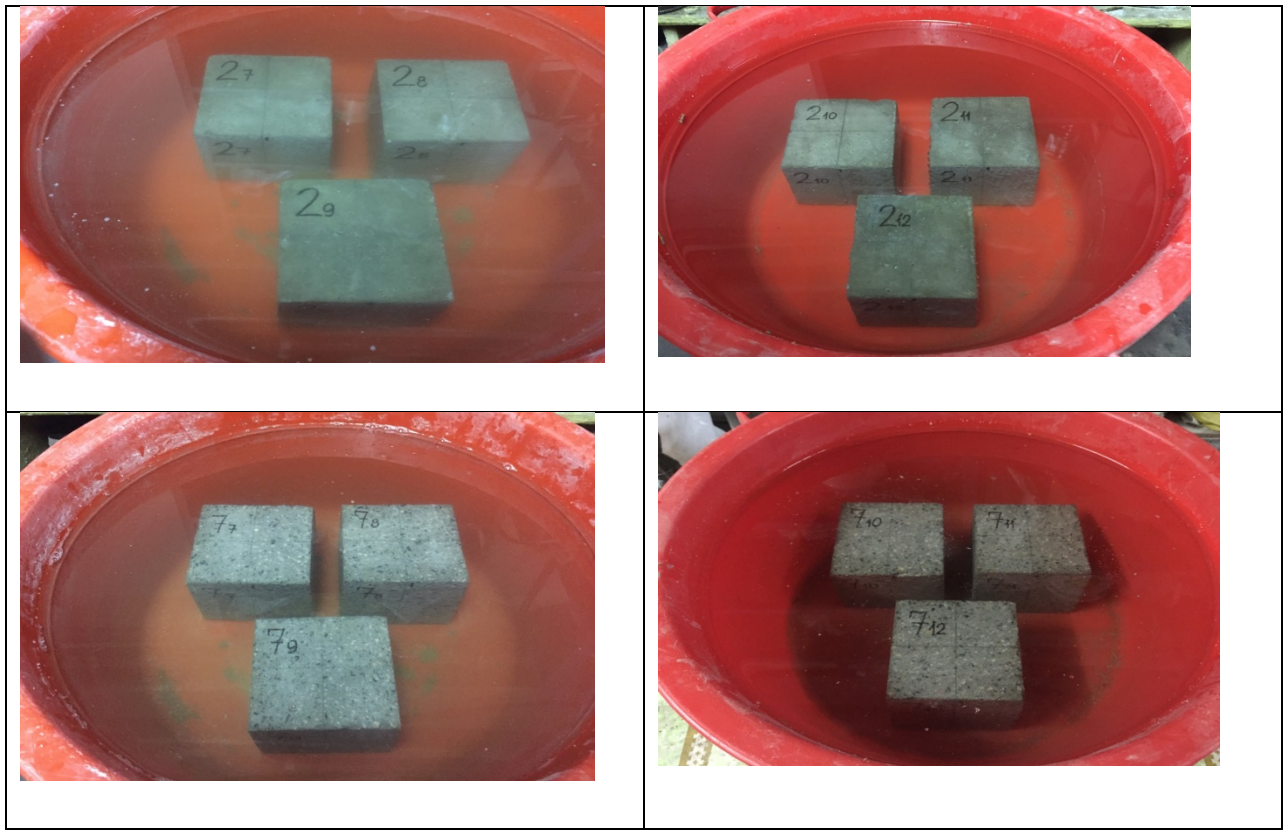


Рис. 2.23. Витримка бетонних зразків під водою протягом 2-х діб

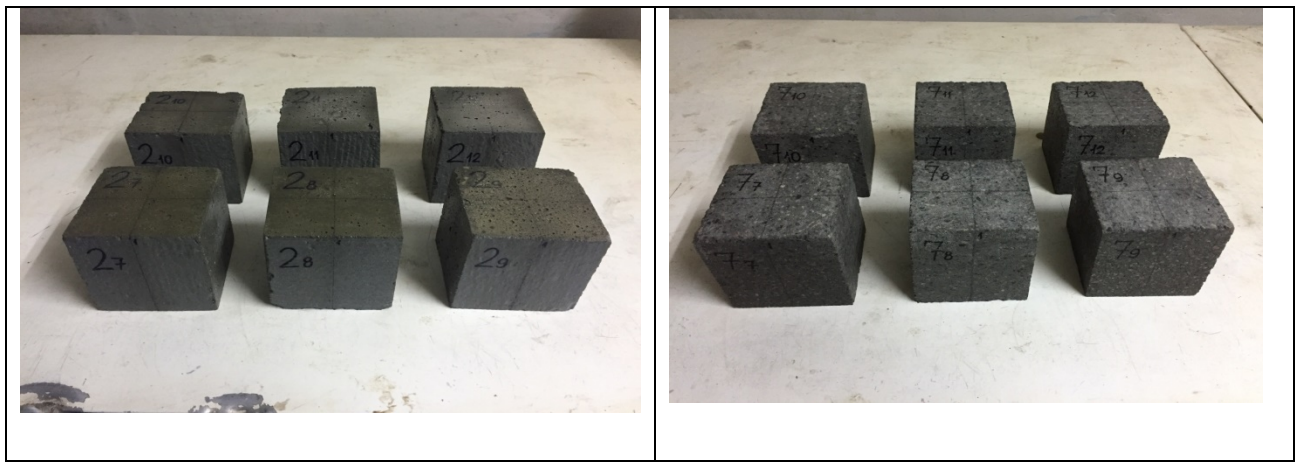


Рис. 2.24. Загальний вигляд бетонних зразків після взаємодії з водою

Лінійне набухання бетонів в % визначали наступним чином. Після витримки зразків - кубів на протязі 28 діб у нормальних умовах на чотирьох протилежних гранях (по висоті зразка) наносили чотири лінії паралельно центральній осі. Довжину ліній брали за вихідний розмір. Вимірювання проводили

штангенциркулем. Через 2 доби зберігання зразків під водою їх виймали з води і розміри вимірювали знову, а набухання бетону обчислювали за формулою:

$$\varepsilon = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \times 100, \qquad (2.2)$$

де: l_1 – початковий розмір зразка після 28 діб витримки;

l_2 – розмір зразка після зберігання під водою протягом 2 діб.

Об'ємну усадку (набухання) у % визначали шляхом фіксації зміни обсягу зразків за формулою:

$$\varepsilon_v = \frac{V_2 - V_1}{V_1} \times 100, \qquad (2.3)$$

де: V_1 – початковий обєм зразка після 28 діб витримки;

V_2 – обєм зразка після зберігання під водою протягом 2 діб.

Характер залежності напружень від деформацій для бетону визначали поетапним навантаженням виготовлених призм [22]. Для проведення досліджень на чотирьох протилежних гранях призм встановлювали індикатори годинникового типу. Призми поетапно завантажували на пресі П-125 навантаженням 12,5 кН. Після кожного етапу навантаження фіксували показники індикаторів і визначали середні деформації бетону.

Навантаження доводили до руйнівного і будували графіки залежності напружень від деформацій. На графіках визначали зони пружних і пружно-пластичних деформацій, напруги σ_{02} і деформації ε_{02}, до яких діє закон Гука. Напруження σ_{02} брали рівними 0,2 R_b руйнуючих. Обчислювали початкові модулі пружності E_b кожного складу відношенням напруг σ_{02} до деформацій ε_{02} [23]. Крім того, визначали характеристичні модулі пружності E_{cm} (які застосовуються при розрахунках) при навантаженнях, які складають 30% від руйнуючих [24].

Визначали залежність між початковим модулем пружності і характеристичним модулем пружності. Ця залежність згідно [23] визначається

коефіцієнтом пружньопластичних деформацій бетону, який визначається за формулою:

$$\nu = E_b / E_{cm} \qquad (2.4)$$

Для вивчення структури бетону розколювали одну з призм в напрямку перпендикулярному до шарів укладання суміші і оцінювали рівномірність розподілу заповнювача по внутрішній поверхні бетону та стан в'яжучої речовини.

2.4.2. Результати визначення міцності і щільності бетонів

Результати випробування кубів номінальним розміром 150 х 150 х 150мм.

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, виготовлених за традиційною технологією, наведені в табл. 2.6 та на рис. 2.25 і рис. 2.26.

Таблиця 2.6.

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 150 мм виготовлених в формах традиційним методом

Зразок	**Маса, г**	**Довжина, мм**	**Ширина, мм**	**Висота, мм**	**Площа, $см^2$**	**Об'єм, $см^3$**	**Щільність, $г/см^3$**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Міцність на стиск, МПа**
1_1	6572	149,6	150,3	149,5	224,8	3361	1,955	365,0	16,2
1_2	6593	149,2	150,4	149,5	224,4	3355	1,965	377,5	16,8
1_3	6657	150,9	150,1	149,7	226,4	3389	1,964	366,2	16,2
1_4	6569	149,3	149,8	149,6	223,6	3345	1,964	312,5	14,0
1_5	6538	149,3	150,0	149,4	223,9	3345	1,954	338,8	15,1
1_6	6612	150,1	149,9	149,5	224,8	3361	1,967	386,2	17,2

Як видно з даних, наведених в табл. 2.6, міцність бетону на стиск зразків, номінальним розміром 150 х 150 х 150 мм, виготовлених за традиційною технологією, склала 14,0 – 17,2 МПа. При цьому показники щільності бетону зразків становлять 1,954 – 1,967 г/см^3 .



Рис. 2.25. Загальний вигляд бетонних зразків номінальним розміром ребра 150 мм після руйнування

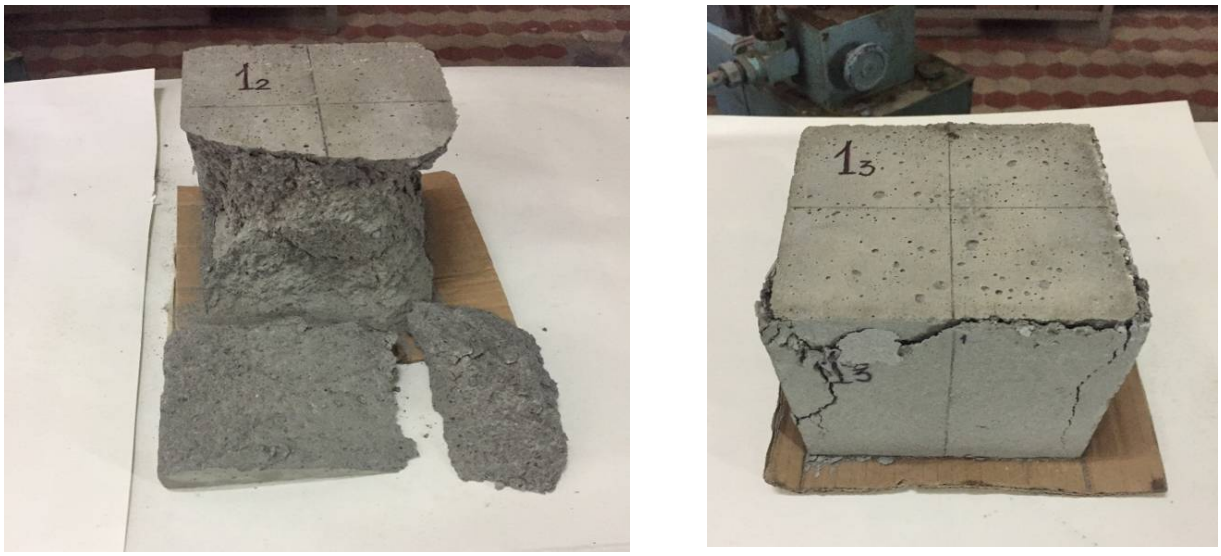


Рис. 2.26. Структура внутрішньої поверхні і характер руйнування зразків розмірами 150 х 150 х 150мм

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, номінальним розміром ребра 150 мм, відібраних із масиву бетону, виготовленого за технологією 3D - друку, наведені в табл. 2.7 та на рис. 2.27 і рис. 2.28.

Таблиця 2.7

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 150 мм виготовлених методом 3Д друку

Зразок	**Маса, г**	**Довжина, мм**	**Ширина, мм**	**Висота, мм**	**Площа, $см^2$**	**Об'єм, $см^3$**	**Щільність, $г/см^3$**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Міцність на стиск, МПа**
6_1	6376	149,0	148,0	148,6	220,5	3276	1,946	243,0	11,0
6_2	6388	147,5	148,5	149,0	219,0	3263	1,958	267,5	12,2
6_3	6452	148,5	148,8	149,1	221,0	3295	1,958	241,2	10,9
6_4	6457	148,8	149,4	148,9	222,2	3307	1,952	263,5	11,9
6_5	6394	148,8	147,6	149,8	219,6	3289	1,944	257,5	11,7
6_6	6446	148,9	148,6	149,0	221,3	3297	1,955	256,2	11,6

Як видно з даних, представлених в табл. 2.7 міцність бетону на стиск зразків, номінальним розміром 150 х 150 х 150 мм, відібраних вирізанням із масиву бетону конструкції, виготовленого методом 3Д друку, склала 10,9 – 12,2 МПа. При цьому показники щільності бетону зразків становлять 1,944 – 1,958 $г/см^3$.



Рис. 2.27. Загальний вигляд бетонних зразків складу 6 після руйнування

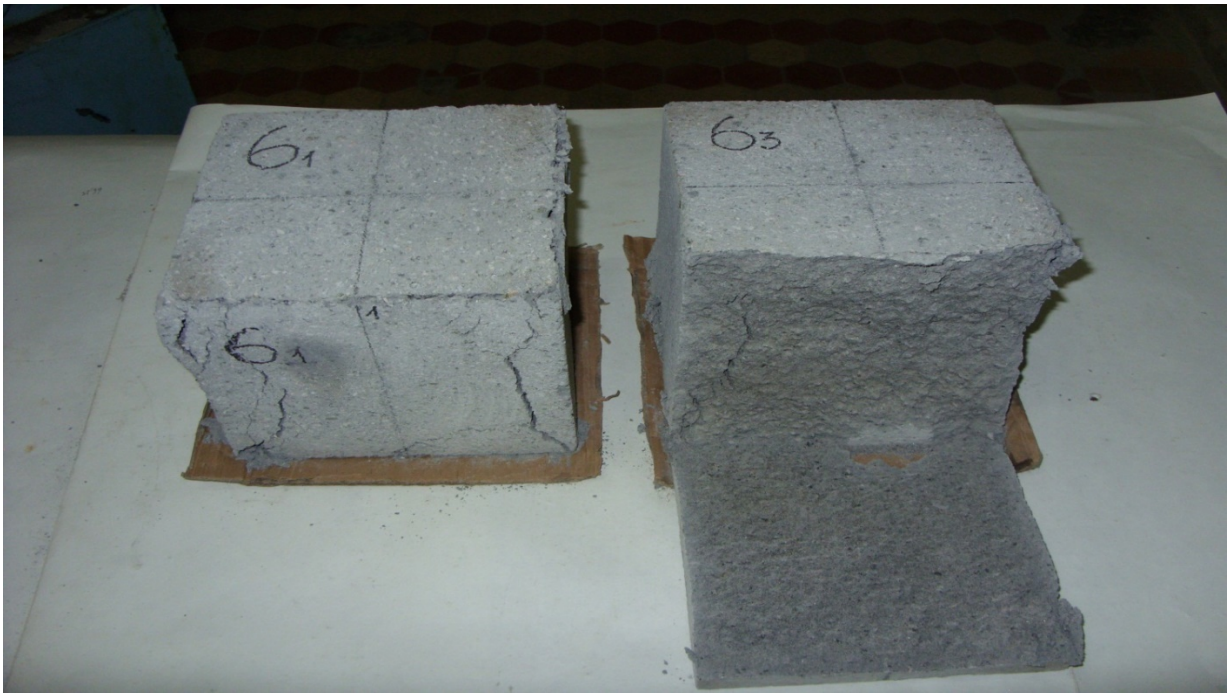


Рис. 2.28. Характер руйнування зразків і структура внутрішньої поверхні зразків, номінальними розмірами 150 х 150 х 150мм, виготовлених методом 3D - друку

Результати випробування кубів, номінальним розміром 100 х 100 х 100мм.

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, виготовлених за традиційною технологією, наведені в табл. 2.8 та на рис. 2.29 і рис. 2.30.

Таблиця 2.8

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 100 мм

Зразок	**Маса, г**	**Довжина, мм**	**Ширина, мм**	**Висота, мм**	**Площа, $см^2$**	**Об'єм, $см^3$**	**Щільність, $г/см^3$**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Міцність на стиск, МПа**
2_1	2008	99,2	99,9	99,7	99,2	988,5	2,03	210,0	21,2
2_2	2036	101,45	99,5	98,9	100,8	997,1	2,04	171,2	17,0
2_3	2087	102,0	99,9	99,4	101,9	1012,9	2,06	197,5	19,4
2_4	2045	99,3	100,45	101,1	99,6	1006,9	2,03	137,5	13,8
2_5	2050	101,0	100,4	99,7	101,4	1010,5	2,029	201,2	19,8
2_6	2100	103,5	100,25	99,0	103,8	1027,2	2,044	192,5	18,6

Як видно з даних, наведених в табл. 2.7, міцність бетону на стиск зразків, номінальним розміром 100 х 100 х 100 мм, виготовлених за традиційною технологією склала 13,8 – 21,2 МПа. При цьому показники щільності бетону зразків, виготовлених за традиційною технологією, становлять 2,029 – 2,06$г/см^3$.



Рис. 2.29. Загальний вигляд бетонних зразків після руйнування



Рис. 2.30. Структура внутрішньої поверхні і характер руйнування зразків, номінальними розмірами 100 х 100 х 100 мм, виготовлених за традиційною технологією

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, номінальним розміром ребра 100 мм, відібраних із масиву бетону, виготовленого за технологією 3D - друку, наведені в табл. 2.9 та на рис. 2.31 і рис. 2.32.

Таблиця 2.9.

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 100 мм, відібраних із масиву бетону, виготовленого за технологією 3D друку,

Зразок	**Маса, г**	**Довжина, мм**	**Ширина, мм**	**Висота, мм**	**Площа, $см^2$**	**Об'єм, $см^3$**	**Щільність, $г/см^3$**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Міцність на стиск, МПа**
7_1	2007	100,8	99,4	100,6	100,3	1009	1,989	181,2	18,0
7_2	1985	99,1	101,7	99,8	100,8	1006	1,973	174,2	17,3
7_3	1981	99,5	102,0	99,6	101,5	1011	1,959	175,0	17,2
7_4	2032	101,4	100,4	100,0	101,8	1019	1,995	181,5	17,8
7_5	2095	100,0	100,5	99,7	100,5	1002	2,090	182,5	18,2
7_6	2081	99,3	100,8	99,6	100,0	997	2,087	198,8	19,9

Як видно з даних, наведених в табл. 2.9, міцність бетону на стиск, зразків, номінальним розміром 100 х 100 х 100 мм, відібраних вирізанням із масиву бетону конструкції, виготовленого методом 3D - друку, склала 17,2 – 19,9 МПа. При цьому показники щільності бетону зразків становлять 1,959 – 2,090 $г/см^3$.



Рис. 2.31. Загальний вигляд бетонних зразків після руйнування.

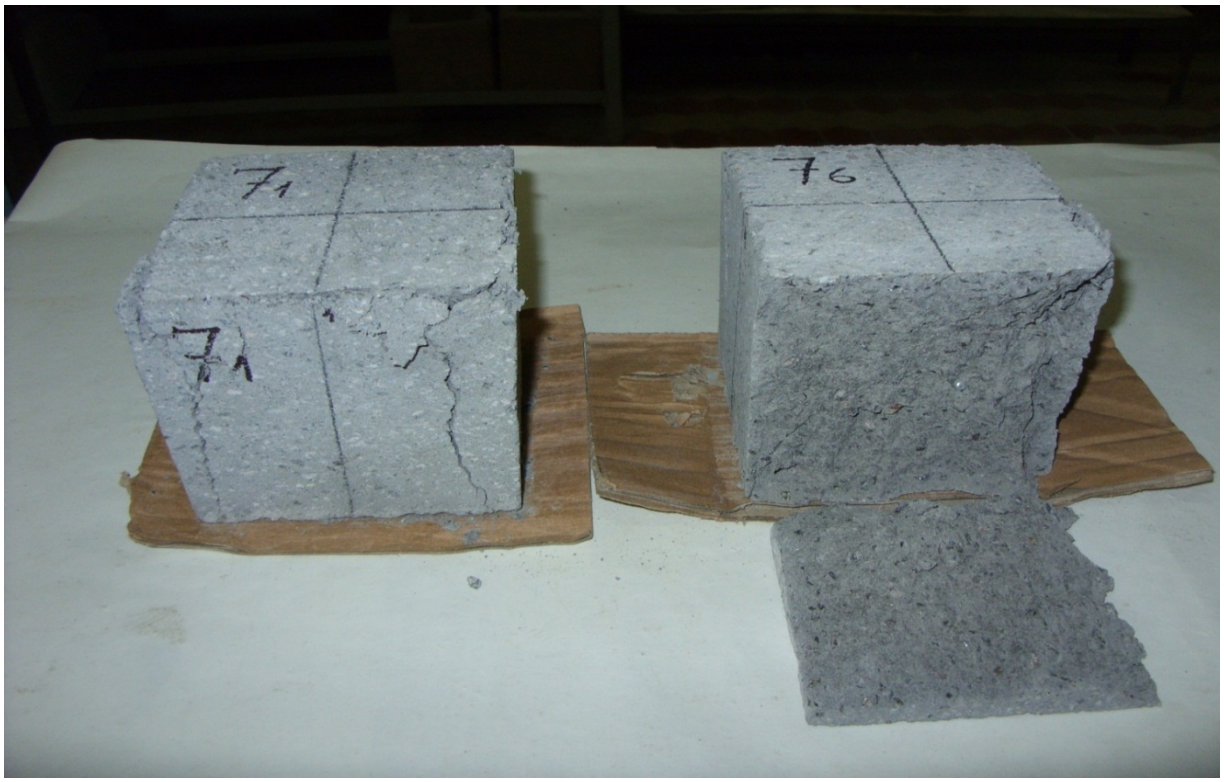


Рис. 2.32. Характер руйнування зразків і структура внутрішньої поверхні зразків, номінальними розмірами 100 х 100 х 100мм

Результати випробування бетону зразків - кубів номінальним розміром 70 х 70 х 70 мм

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, виготовлених за традиційною технологією, наведені в табл. 2.10 та на рис. 2.33 і рис. 2.34.

Таблиця 2.10.

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 70 мм

Зразок	**Маса, г**	**Довжина, мм**	**Ширина, мм**	**Висота, мм**	**Площа, $см^2$**	**Об'єм, $см^3$**	**Щільність, $г/см^3$**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Міцність на стиск, МПа**
$З_1$	742	70,1	70,9	72,2	49,7	358,8	2,068	66,2	13,3
$З_2$	723	70,6	70,5	70,4	49,7	350,3	2,064	87,5	17,6
$З_3$	751	73,0	71,2	70,4	52,0	366,1	2,051	68,8	13,2
$З_4$	728	70,0	70,0	71,3	49,0	349,2	2,084	93,8	19,1
$З_5$	748	70,2	71,5	72,2	50,2	362,9	2,061	65,0	12,9
$З_6$	738	71,7	70,3	70,8	50,4	356,7	2,069	85,0	16,9

Як видно з даних, наведених в табл. 2.8 міцність бетону на стиск зразків, розміром 70 х 70 х 70 мм, виготовлених за традиційною технологією, склала 12,9 – 19,1 МПа. При цьому показники щільності бетону зразків становлять 2,051 – 2,069 $г/см^3$.



Рис. 2.33. Загальний вигляд бетонних зразків після руйнування

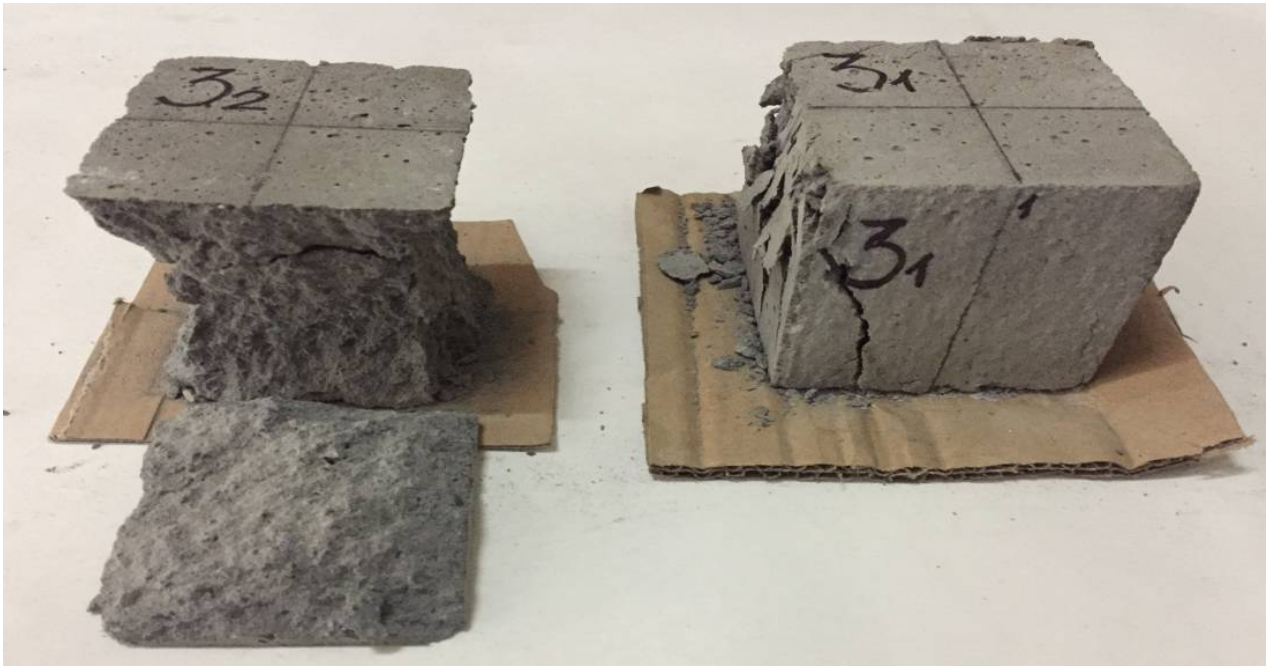


Рис. 2.34. Структура внутрішньої поверхні і характер руйнування зразків номінальними розмірами 70 х 70 х 70мм

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, номінальним розміром ребра 70 мм, відібраних із масиву бетону, виготовленого за технологією 3D - друку, наведені в табл. 2.11 та на рис. 2.35 і рис. 2.36.

Таблиця 2.11.

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 70 мм, відібраних із масиву бетону, виготовленого за технологією 3Д друку.

Зразок	**Маса, г**	**Довжина, мм**	**Ширина, мм**	**Висота, мм**	**Площа, $см^2$**	**Об'єм, $см^3$**	**Щільність, $г/см^3$**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Міцність на стиск, МПа**
8_1	658	69,5	70,0	69,3	48,6	337,1	1,952	80,0	16,4
8_2	660	69,7	68,7	69,1	47,9	331,0	1,994	76,2	15,9
8_3	658	69,8	69,6	69,2	48,6	336,2	1,957	88,8	18,3
8_4	661	69,0	69,0	70,0	47,6	333,2	1,984	85,0	17,8
8_5	661	69,4	69,0	69,6	47,8	333,2	1,984	83,8	17,5
8_6	657	69,6	68,7	69,2	47,8	330,6	1,987	82,5	17,3

Як видно з даних, наведених в табл. 2.11, міцність бетону на стиск, зразків, номінальним розміром 70 х 70 х 70 мм, відібраних вирізанням із масиву бетону конструкції, виготовленого методом 3D - друку, склала 15,9 – 18,3 МПа. При цьому показники щільності бетону зразків становлять 1,952 – 1,994 $г/см^3$.

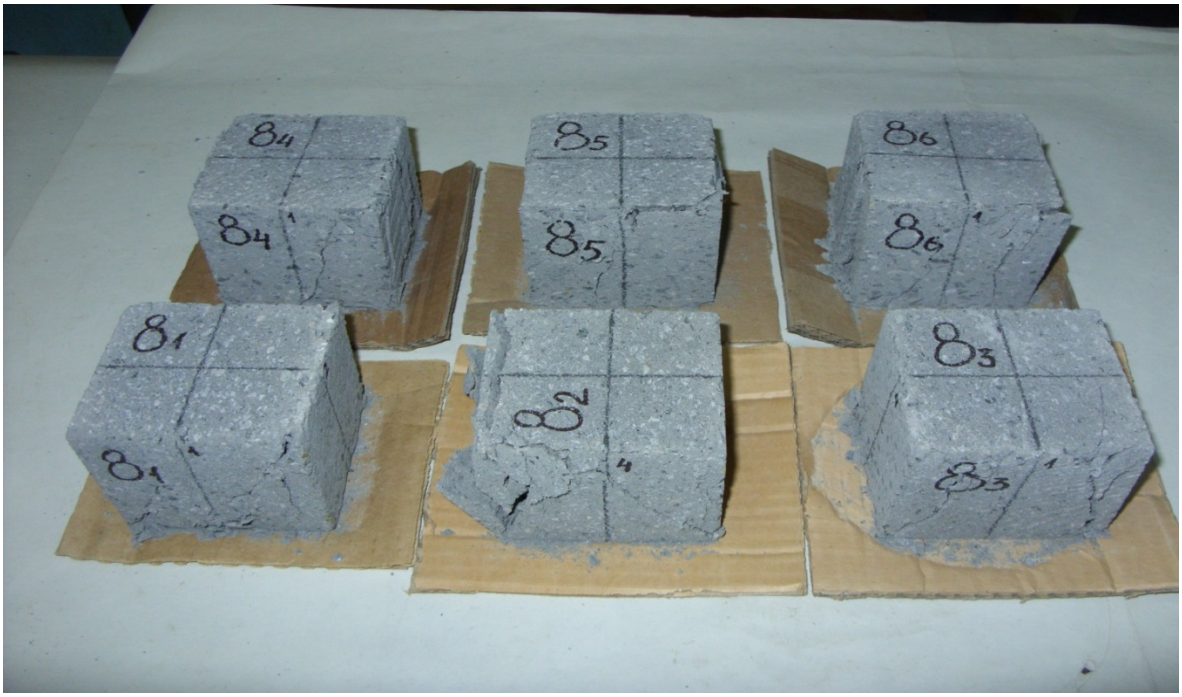


Рис 2.35. Загальний вигляд бетонних зразків після руйнування



Рис. 2.36. Характер руйнування зразків номінальними розмірами 70 х 70 х 70мм і структура внутрішньої поверхні бетону

Результати випробування зразків - кубів номінальним розміром 50 х 50 х 50мм

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, виготовлених за традиційною технологією, наведені в табл. 2.12 та на рис. 2.37 і рис. 2.38.

Таблиця 2.12.

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 50 мм

Зразок	**Маса, г**	**Довжина, мм**	**Ширина, мм**	**Висота, мм**	**Площа, $см^2$**	**Об'єм, $см^3$**	**Щільність, $г/см^3$**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Міцність на стиск, МПа**
4_1	266	50,3	49,1	51,2	24,7	126,5	2,103	46,8	19,0
4_2	267	49,2	49,4	51,2	24,3	124,5	2,144	48,8	20,1
4_3	253	49,1	49,0	50,7	24,1	122,0	2,073	47,4	19,7
4_4	262	49,3	49,1	51,6	24,2	125,0	2,095	47,0	19,4
4_5	262	49,2	49,6	51,6	24,4	125,7	2,084	46,8	19,2
4_6	271	50,6	49,0	51,8	24,8	128,8	2,105	46,0	18,5

Як видно з даних, наведених в табл. 2.12, міцність бетону на стиск зразків, номінальним розміром 50 х 50 х 50 мм, виготовлених за традиційною технологією, склала 18,5 – 20,1 МПа. При цьому показники щільності бетону зразків становлять 2,084 – 2,144 $г/см^3$.

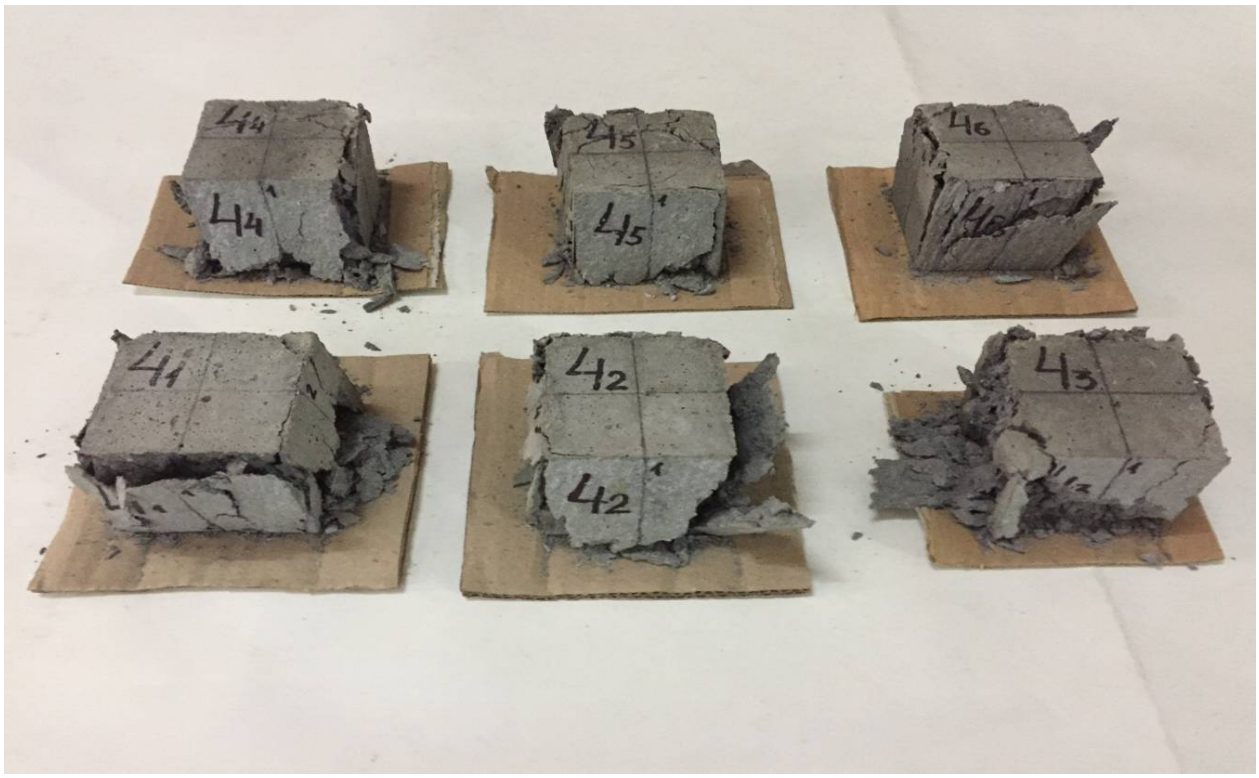


Рис. 2.37. Загальний вигляд бетонних зразків після руйнування

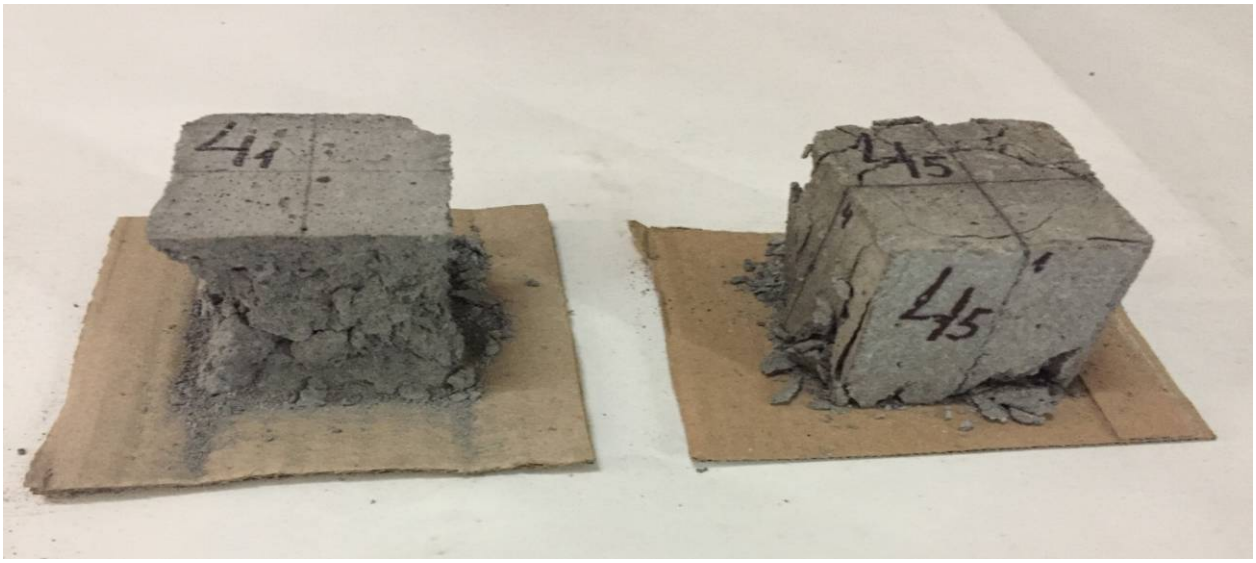


Рис. 2.38. Характер руйнування і структура внутрішньої поверхні зразків розмірами 50 х 50 х 50мм

Результати визначення міцності та щільності бетонів на зразках, номінальним розміром ребра 50 мм, відібраних із масиву бетону, виготовленого за технологією 3D - друку, наведені в табл. 2.13 та на рис. 2.39 і рис. 2.40.

Таблиця 2.13.

Результати визначення міцності та щільності бетонів зразків з ребром 50 мм, відібраних із масиву бетону, виготовленого за технологією 3D - друку.

Зразок	**Маса, г**	**Довжина, мм**	**Ширина, мм**	**Висота, мм**	**Площа, $см^2$**	**Об'єм, $см^3$**	**Щільність, $г/см^3$**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Міцність на стиск, МПа**
9_1	257	50,4	50,0	50,1	25,2	126,4	2,032	43,6	17,3
9_2	257	50,7	50,2	50,8	25,4	129,2	1,989	47,8	18,8
9_3	258	51,0	49,8	50,6	25,4	128,6	2,007	47,4	18,6
9_4	257	50,5	50,2	50,4	25,4	127,8	2,01	49,4	19,5
9_5	258	50,4	50,1	50,5	25,2	127,4	2,025	33,6	13,3
9_6	257	50,0	50,3	50,4	25,2	126,8	2,027	43,4	17,3

Як видно з даних, наведених в табл. 2.13, міцність бетону на стиск, зразків, номінальним розміром 50 х 50 х 50 мм, відібраних вирізанням із масиву бетону конструкції, виготовленого методом 3D - друку, склала 13,3 – 19,5 МПа. При цьому показники щільності бетону зразків становлять 1,989 – 2,032 $г/см^3$.



Рис 2.39. Загальний вигляд бетонних зразків після руйнування

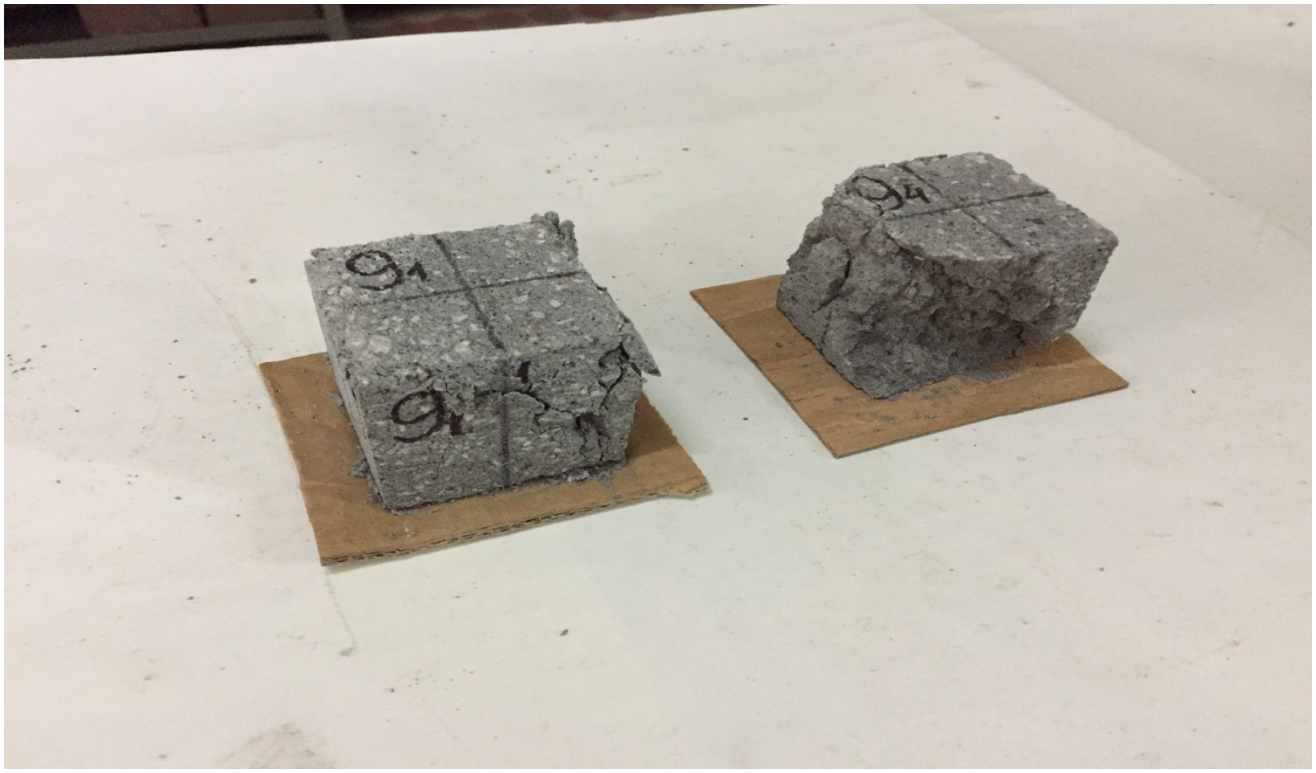


Рис. 2.40. Характер руйнування і структура внутрішньої поверхні зразків, номінальними розмірами 50 х 50 х 50мм

Результати випробувань бетонів виготовлених як за традиційною технологією, так і технологією 3D - друку дозволили систематизувати залежність показників міцності та щільності в залежності від розмірів зразків. В якості критерію залежності був обраний масштабний коефіцієнт при стиску бетонів [15]. Масштабні коефіцієнти були визначені по відношенню до міцності стандартних зразків, розмірами 150 х 150 х 150мм.

При визначені показників міцності нормативний документ [15] передбачає з шістьох випробувань зразків до розрахунку міцності брати лише чотири самі більші. На нашу думку такий результат є завищеним, тому для порівняння аналізувався також результат, коли міцність бетону була визначена за результатами усіх шістьох випробувань.

Оскільки клас бетону визначали за результатами випробуваннями призм, то при узагальненні результатів дослідження міцності кубів при стиску користувались таким поняттям, як найближча марка бетону за міцністю, котра була визначена при випробуванні стандартних зразків розмірами 150 х 150 х 150 мм.

Так, як в теперішній час в літературних джерелах є два різних підходи в визначенні класу бетону, то на нашу думку цілком доцільно проаналізувати результати визначення класу бетону за обома підходами. Перший підхід [23] передбачає клас бетону В визначати за призмовою міцністю R_b на осьовий стиск та початковому модулю пружності E_b , який визначається при навантаженнях, які складають 20% від руйнуючих. Згідно другого підходу [24] клас бетону С визначається за призмовою міцністю $f_{cm,prism}$ на осьовий стиск та середньому модулю пружності E_{cm} , який визначається при навантаженнях, які складають 30% від руйнуючих. Такий модуль пружності слід вважати характеристичним.

Клас бетону визначали аналогічно визначенню міцності кубів на стиск за результатами чотирьох та шести випробувань призм на осьовий стиск.

На рис. 2.41 та рис. 2.42, відповідно, наведені діаграми залежності міцності при стиску бетонів, які були виготовлені в формах за традиційною технологією та методом 3 D - друку, від розмірів зразків, а в табл. 2.14 і табл. 2.15 наведені

узагальнені результати міцності, об'ємної ваги бетонів і значення масштабних коефіцієнтів.

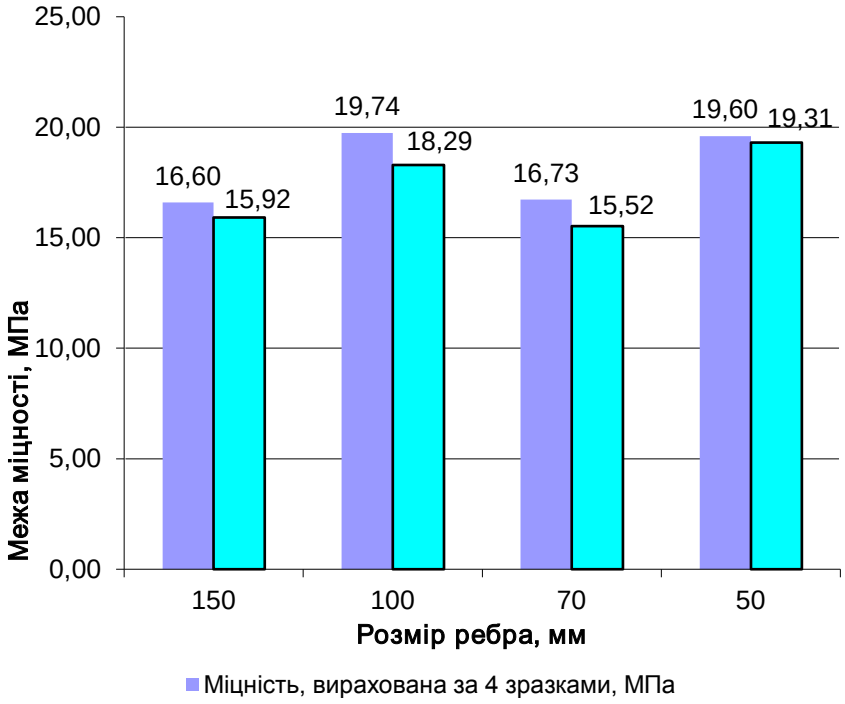


Рис. 2.41. Міцність при стиску бетонів, виготовлених в формах за традиційною технологією

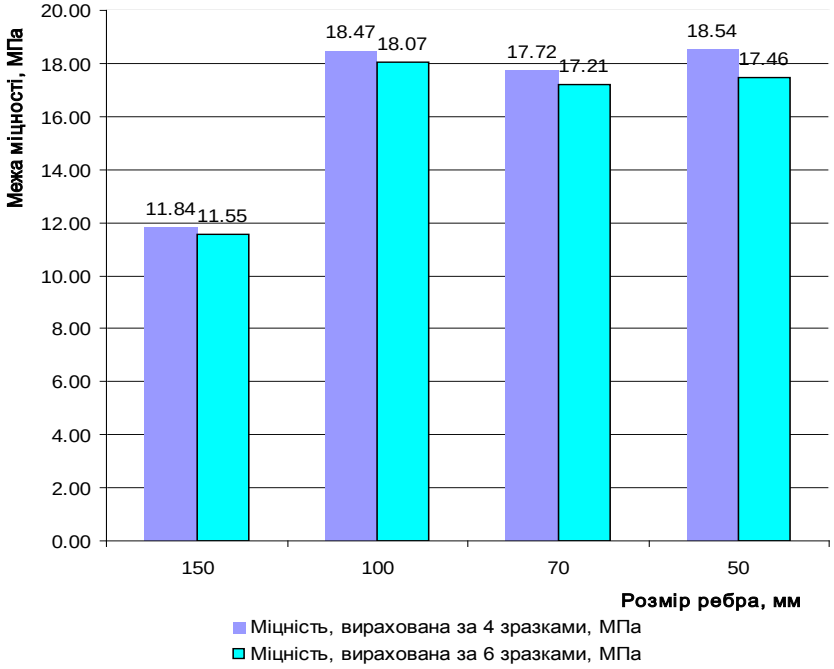


Рис. 2.42. Міцність при стиску бетонів, відібраних з конструкцій, виготовлених методом 3D - друку

Таблиця 2.14

Загальні результати визначення міцності та щільності бетонів, виготовлених за традиційною технологією

№ п/п	Показники	Куби розмірами ребра, мм			
		150	100	70	50
1	Межа міцності при стиску, МПа	16,60 (15,92)	19,74 (18,29)	16,73 (15,52)	19,6 (19,31)
2	Об'ємна вага, кг/м^3	1960 (1960)	2040 (2040)	2070 (2065)	2100 (2100)
3	Масштабний коефіцієнт	1,0 (1,0)	0,84 (0,87)	0,99 (1,025)	0,85 (0,825)
4	Найближча марка бетону за міцністю, М	М150			

Примітка: В дужках – середнє значення за результатами випробувань всієї партії зразків

Таблиця 2.15

Результати визначення міцності та щільності бетонів, виготовлених за технологією 3D - друку

№ п/п	Показники	Куби розмірами ребра, мм			
		150	100	70	50
1	Межа міцності при стиску, МПа	11,84 (11,55)	18,47 (18,07)	17,72 (17,21)	18,54 (17,46)
2	Об'ємна вага, кг/м^3	1950 (1950)	2040 (2015)	1980 (1975)	2010 (2015)
3	Масштабний коефіцієнт	1,0 (1,0)	0,64 (0,64)	0,67 (0,67)	0,64 (0,66)
4	Найближча марка бетону за міцністю, М	М100			

Примітка: В дужках – середнє значення за результатами випробувань всієї партії зразків

Як видно з даних, наведених на рис. 2.41, а також з табл. 2.14 показники межі міцності при стиску бетону зразків - кубів, виготовлених в формах, з розміром ребра 150 мм менші, ніж аналогічні показники міцності у бетонних зразків з розміром ребра 100 і 50 мм. Це пов'язано з ефектом дії сил тертя на зразки бетону при випробуванні на пресі. Межа міцності на стиск зразків з розміром ребра 100 і 50 мм збільшуються по відношенню до міцності базових зразків з розміром ребра 150 мм, яка дорівнює 16,6 МПа, і становить, відповідно, 19,74 та 19,6 МПа.

Таке збільшення міцності зразків узгоджується з даними нормативного документу [15], коли для приведення міцності зразків до міцності стандартного зразка вводяться знижуючі коефіцієнти.

При розмірі ребра кубів 70мм міцність зразків на стиск практично не відрізняється від базових зразків і становить 16,7 МПа.

Слід відзначити практично однакові показники міцності бетону, які були визначені на кубах розмірами 50 х 50 х 50 мм при випробуванні 4-х та 6-ти зразків, що засвідчує про однорідність бетону.

За результатами показників міцності при стиску бетон, який був виготовлений в формах, відноситься до марки М150

Об'ємна вага бетону, що визначена на зразках-кубах з розмірами ребра 150, 100, 70 і 50 мм послідовно підвищується зі зменшенням розміру зразків і становить відповідно 1960, 2040, 2070 і 2100 кг/м^3.

В результаті дослідження міцності бетону, який був виготовлений в формах, встановлені масштабні коефіцієнти по відношенню до результатів стандартних зразків, розміром 150 х 150 х 150мм.

Як видно з даних, представлених на рис. 2.42, а також з табл. 2.15 показники межі міцності при стиску зразків - кубів бетону, відібраних з конструкцій, виготовлених методом 3D - друку з розміром ребра 150 мм менші, ніж аналогічні показники міцності у бетонних зразків з розміром ребра 100, 70 і 50мм. Тут можна констатувати закономірність суттєвого підвищення міцності

зразків. Отримані масштабні коефіцієнти по міцності 0,64 - 0,67 значно менші ніж аналогічні коефіцієнти, які наведені у нормативному документі [15].

Можна констатувати практично однакові показники межі міцності на стиск зразків з розміром ребра 100 і 50мм, які становлять 18,5 та 18,5 МПа, відповідно.

За результатами показників міцності при стиску бетон, який був відібраний з конструкцій, належить до марки М100.

2.4.3. Характеристики водостійкості бетонів

Результати визначення характеристик бетону, зразків, виготовлених в формах за традиційною технологією до та після водонасичення наведені в табл. 2.16 та на рис. 2.43.

Таблиця 2.16.

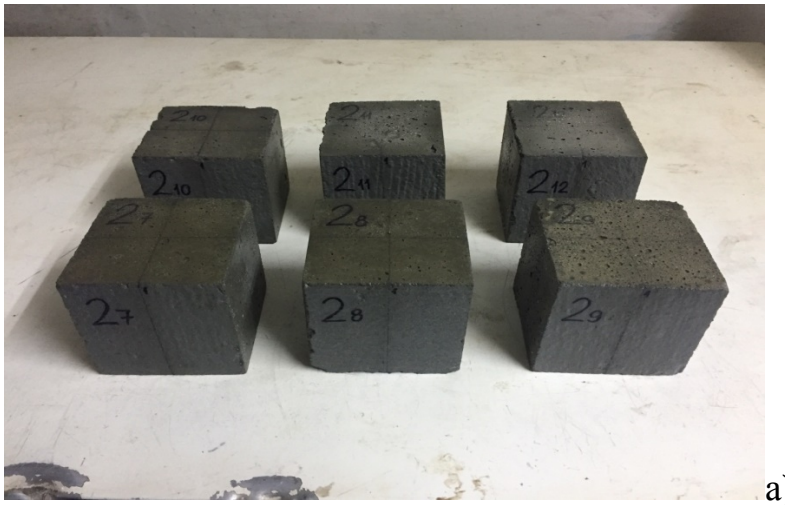
Результати визначення характеристик бетонів, виготовлених за традиційною технологією, до та після водонасичення

Зразок	Маса, г	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм	Площа, $см^2$	Об'єм, $см^3$	Щільність, $г/см^3$	Руйнівне зусилля, кН	Міцність на стиск, МПа
2_7	2015 2060	99,2 99,2	100,2 100,4	100,0 100,0	99,4 99,6	994,0 995,0	2,027 2,070	------- 153,8	----- 15,4
2_8	2016 2155	103,7 103,8	99,9 100,2	99,2 99,6	103,6 104,0	1027,7 1036,2	1,962 2,080	------ 182,5	----- 17,6
2_9	2035 2082	100,6 101,2	99,8 99,8	99,4 99,3	100,4 100,8	998,5 1001,7	2,038 2,079	------ 110,0	---- 10,9
2_{10}	2087 2137	101,4 102,0	99,8 100,3	99,6 99,8	101,2 102,3	1008,2 1021,0	2,070 2,093	------ 166,2	----- 16,2
2_{11}	2139 2192	100,4 100,4	99,0 99,8	103,4 103,4	99,4 100,2	1027,2 1033,8	2,082 2,120	------- 172,5	------ 17,2
2_{12}	2118 2118	97,8 97,8	99,8 100,5	104,4 104,4	97,6 98,2	1018,5 1023,4	2,080 2,117	-------- 107,5	----- 10,9

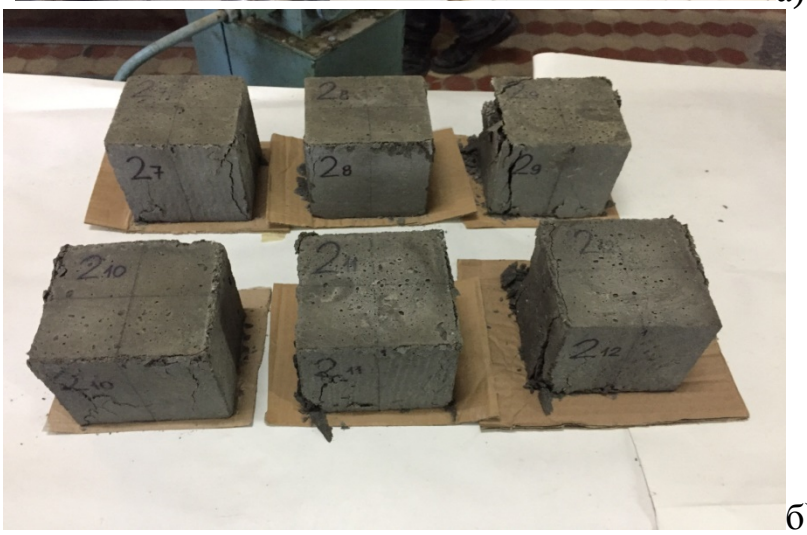
Примітка: В чисельнику – до водонасичення, в знаменнику – після водонасичення

Як видно з даних, представлених табл. 2.14 щільніть бетону зразків номінальним розміром 100 х 100 х 100 мм, виготовлених за традиційною

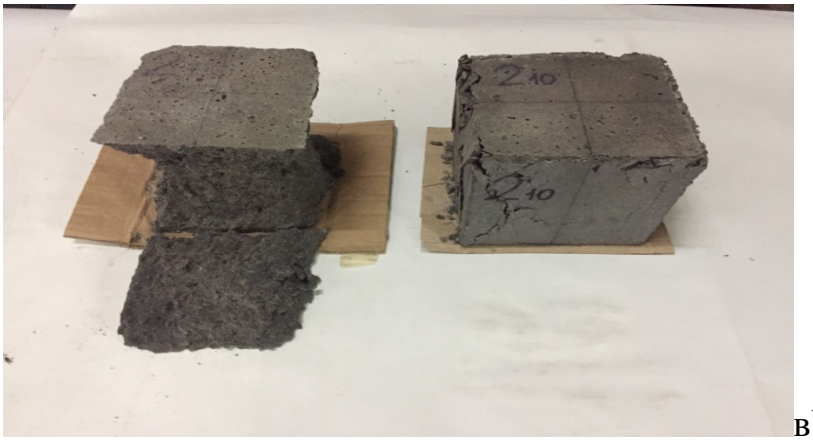
технологією до водонасичення становить 1,962 – 2,082 г/см^3. Щільність зразків після водонасичення (табл. 2.14) підвищується до 2,070 - 2,120 г/см^3, при цьому міцність водонасиченого бетону на стиск складає 10,9-16,2 МПа.



а)



б)



в)

Рис. 2.43. Зразки водонасиченого бетону: а) перед випробуванням, б) після руйнування, в) характер руйнування та структура бетону

Результати визначення характеристик бетону, зразків, виготовлених за технологією 3D - друку до та після водонасичення наведені в табл. 2.17 та на рис. 2.44.

Таблиця 2.17.

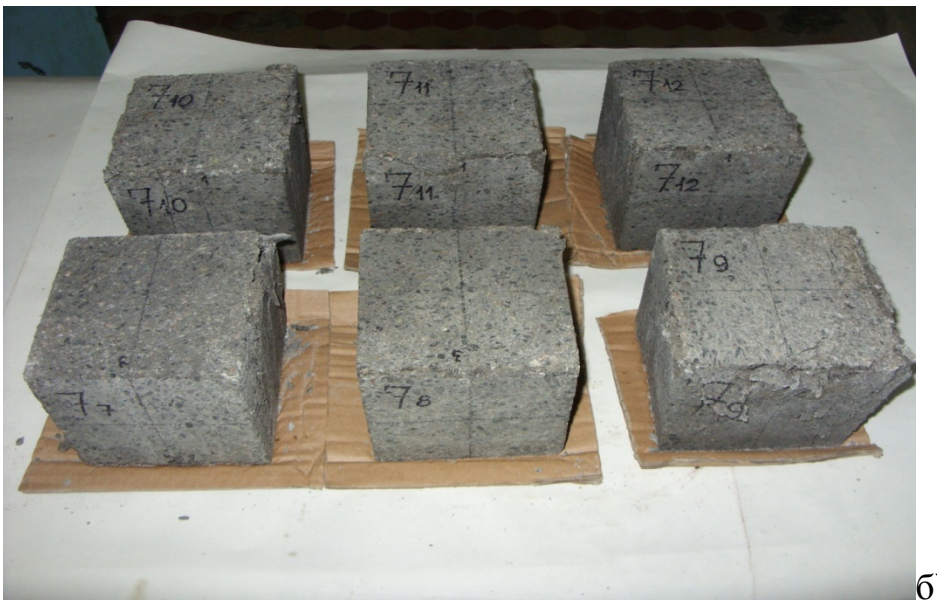
Результати визначення характеристик бетонів, виготовлених за технологією 3Д друку, до та після водонасичення

Зразок	**Маса, г**	**Довжина, мм**	**Ширина, мм**	**Висота, мм**	**Площа, $см^2$**	**Об'єм, $см^3$**	**Щільність, $г/см^3$**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Міцність на стиск, МПа**
7_7	2085 2123	100,8 101,2	100,0 100,4	99,1 99,2	100,8 101,6	998,68 1007,9	2,088 2,106	------ 126,8	------- 12,5
7_8	2093 2132	99,9 100,0	100,4 101,0	99,6 99,9	100,3 101,0	998,73 1008,7	2,096 2,114	------- 152,5	------ 15,1
7_9	2065 2104	100,8 101,2	99,6 99,9	99,00 99,3	100,4 101,0	993,93 1003,2	2,078 2,097	------- 123,8	------ 12,2
7_{10}	2092 2129	99,8 99,9	100,5 100,5	99,7 100,0	100,2 100,2	999,48 1002,0	2,093 2,125	------- 133,8	------- 13,3
7_{11}	2096 2135	99,6 100,4	100,6 101,4	99,8 100,3	100,2 101,8	998,97 1020,9	2,098 2,091	------ 178,8	------- 17,6
7_{12}	2094 2133	100,2 100,7	100,6 101,2	99,2 99,7	100,8 101,9	998,95 1016,0	2,096 2,099	------- 166,2	------ 16,3

Як видно з даних, наведених в табл. 2.15, щільності бетону зразків номінальним розміром 100 х 100 х 100 мм, виготовлених методом 3D - друку до водонасичення становить 2,078 – 2,098 $г/см^3$. Щільність зразків після водонасичення (табл. 2.15) підвищується до 2,091 - 2,125 $г/см^3$, при цьому межа міцності бетону на стиск складає 12,2 - 17,6 МПа.



а)



б)



в)

Рис. 2.44. Зразки водонасиченого бетону 3D - друку: а) перед випробуванням, б) після руйнування, в) характер руйнування та структура бетону

На рис. 2.45 та 2.46 наведені діаграми залежності міцності при стиску і об’ємної ваги бетонів, які були виготовлені, відповідно, в формах за традиційним методом і методом 3D - друку, до і після водонасичення, а в табл. 2.18 і табл. 2.19 наведені узагальнені результати міцності і об’ємної ваги бетонів, а також показники коефіцієнту розм’якшення та лінійного і об’ємного набухання бетонів.

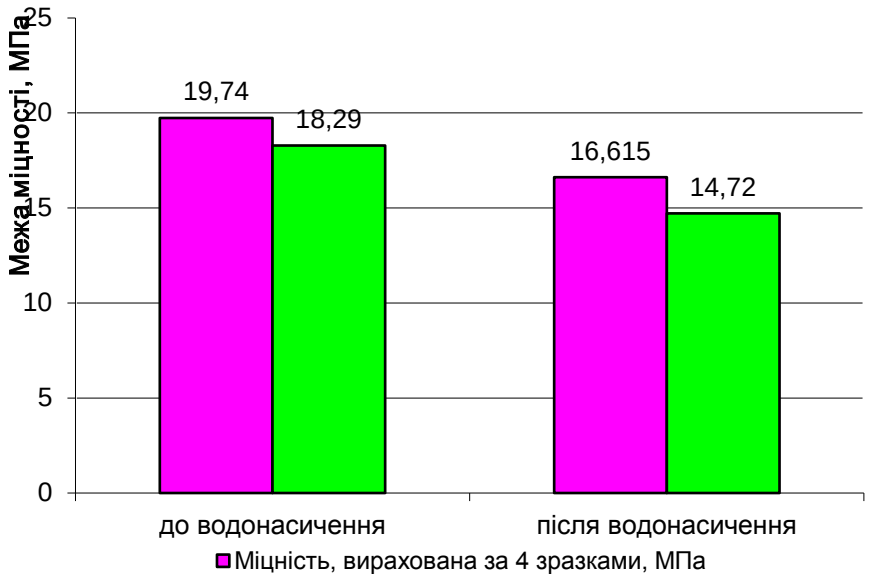


Рис. 2.45. Міцність при стиску бетонів , виготовлених в формах, до- і після водонасичення

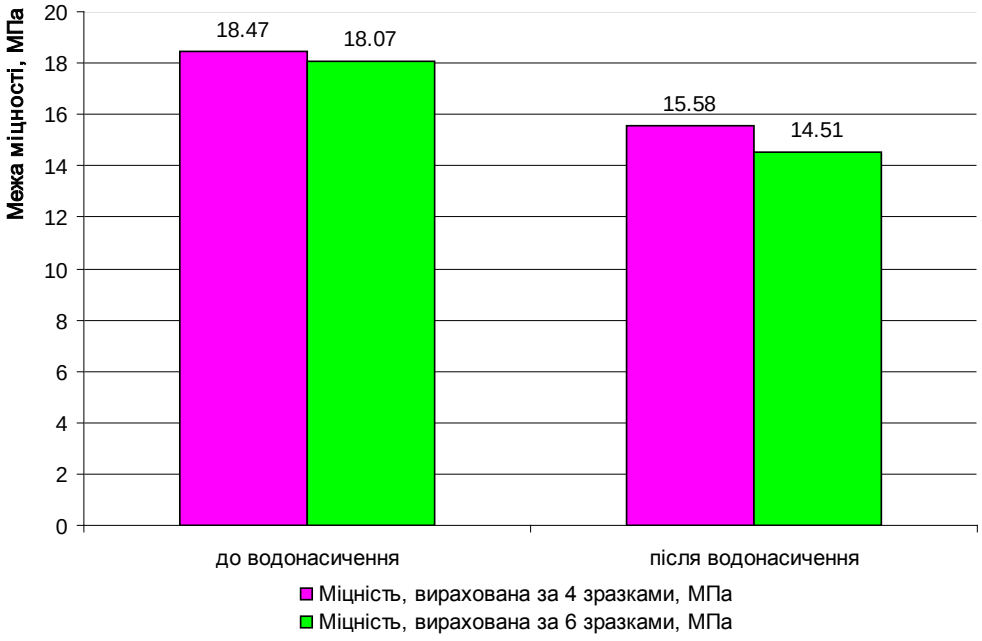


Рис. 2.46. Міцність при стиску бетонів 3D - друку, відібраних з конструкцій, до- і після водонасичення

Таблиця 2.18.

Загальні результати досліджень бетонів, виготовлених у формах, при водонасичені

№ п/п	Показники	До водонасичення	Після водонасичення
1	Межа міцності при стиску, МПа	19,7 (18,3)	16,6 (14,7)
2	Об'ємна вага, кг/м^3	2035 (2045)	2090 (2095)
3	Набухання, % лінійне об'ємне	- -	+ 0,08(0) +0,71(+0,61)
4	Коефіцієнт розм'якшення	-	0,84 (0,8)

Примітка: В дужках – середне значення за результатами випробувань всієї партії зразків

Таблиця 2.19.

Загальні результати дослідження бетонів, виготовлених методом 3D - друку, при водонасиченні

№ п/п	Показники	До водонасичення	Після водонасичення
1	Межа міцності при стиску, МПа	18,47 (18,07)	15,58 (14,51)
2	Об'ємна вага, кг/м^3	2040 (2015)	2105 (2105)
3	Набухання +, % лінійне об'ємне	- -	+ 0,41(0,35) +1,29 (1,17)
4	Коефіцієнт розм'якшення	-	0,84 (0,8)

Примітка: В дужках – середне значення за результатами випробувань всієї партії зразків

Як видно з даних, наведених на рис. 2.45, а також з табл. 2.18, показники межі міцності при стиску зразків-кубів бетону, виготовлених в формах, зменшуються після насичення їх водою на протязі 2-х діб. Початкова межа міцності бетону на стиск, яка дорівнює 19,7 МПа, зменшується до 16,6 МПа.

За даними показниками міцності зразків бетону визначений коефіцієнт розм'якшення становить 0,84.

Показник величини об'ємного набухання становить 0,71%.

Як видно з даних, наведених на рис. 2.46, а також з табл. 2.19, показники межі міцності при стиску зразків-кубів бетону, відібраних з конструкцій, виготовлених за технологією 3D - друку, зменшуються після насичення їх водою на протязі 2-х діб. Початкова межа міцності бетону на стиск, яка дорівнює 18,5 МПа, зменшується до 15,6 МПа.

За даними показниками міцності зразків бетону визначено коефіцієнт розм'якшення, який становить 0,84. При цьому слід відзначити практично однакові показники водостійкості бетонів, виготовлених у формах за традиційною технологією і відібраних із конструкцій, виготовлених методом 3D - друку.

Показник величини лінійного набухання бетонів становить 0,41%, а об'ємного набухання - 1,29%. Слід відзначити, що показник об'ємного набухання зразків, відібраних з конструкцій, в 1,82 рази вище ніж у зразків, які були виготовлені в формах.

2.4.4. Результати визначення деформативних характеристик бетонів

Деформативні характеристики бетону, виготовленого за традиційною технологією, були визначені на 5-ти зразках - призмах.

Результати визначення характеристик бетону випробування призм наведені в табл. 2.20.

Результати залежності деформацій від напружень в бетоні наведені, як приклад, для призми П-5_1 на рис. 2.47. Типовий характер руйнування призми по

гранях (на прикладі призми П-5_1) наведений на рис. 2.48. На рис. 2.49 наведена структура внутрішньої поверхні бетону призми після її розколювання.

Таблиця 2.20.

Результати визначення характеристик бетону, виготовленого в формах за традиційною технологією, після випробування на стиск зразків - призм

Зразок	**Площа поперечного перерізу, см^2**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Призмова міцність, МПа**	**Напруження, МПа**		**Деформації, ε 10^5**		**Модуль пружності, Е·10^3, МПа**	
				$б_{02}$,	**$б_{03}$,**	**$ε_{02}$**	**$ε_{03}$**	**початковий, E_b·**	**характеристичний E_{cm}·**
5_1	99,2	145,0	14,6	2,9	4,4	12,1	18,8	24,1	23,3
5_2	101,0	146,8	14,5	2,9	4,4	13,7	19,4	21,2	22,4
5_4	99,1	118,8	12,0	2,4	3,6	8,9	15,2	26,8	23,6
5_5	100,8	150,0	14,9	3,0	4,5	17,4	24,8	17,0	18,0
5_6	103,0	141,2	13,7	2,7	4,1	13,7	20,3	20,0	20,3

Як видно з даних, наведених в табл. 2.20, призмова міцність бетону на осьовий стиск, виготовленого за традиційною технологією, складає 12,0 - 14,9 МПа. При цьому, початковий модуль пружності бетону складає (17,0-26,8)·10^3 МПа, а характеристичний модуль пружності – (18,0 - 23,3)·10^3 МПа.

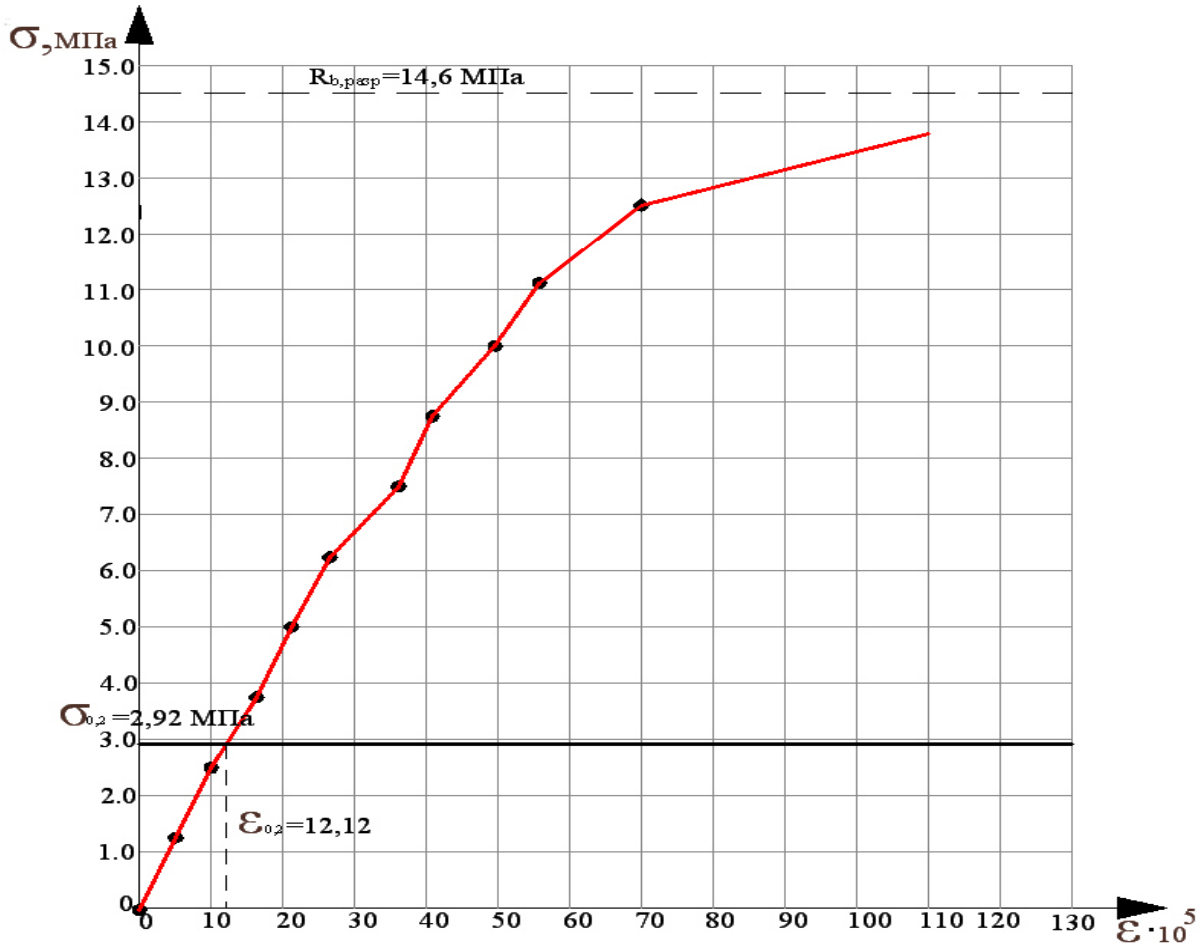


Рис 2.47. Залежність між напруженнями і деформаціями бетону за традиційною технологією виготовлення при випробуванні призми П-5_1 на стиск



Рис 2.48. Характер руйнування бетонної призми П-5_1



Рис. 2.49. Структура внутрішньої поверхні бетону призми після розколювання

Деформативні характеристики бетону, відібраного з конструкцій, виготовлених методом 3D - друку, були визначені на 6-ти призмах.

Результати визначення характеристик бетону випробування зразків - призм наведені в табл. 2.21.

Результати залежності деформацій від напружень в бетоні наведені, як приклад, для призми П-10_1 на рис. 2.50. Типовий характер руйнування призми по гранях (на прикладі призми П-10_1) наведений на рис. 2.51.

На рис. 2.52 наведена структура внутрішньої поверхні бетону призми після її розколювання.

Таблиця 2.21.

Результати визначення характеристик бетону, виготовленого методом 3Д друку, після випробування на стиск зразків - призм

Зразок	**Площа поперечного перерізу, см^2**	**Руйнівне зусилля, кН**	**Призмова міцність, МПа**	**Напруження, МПа**		**Деформації, ε 10^5**		**Модуль пружності, E·10^3, МПа**	
				$б_{02}$,	**$б_{03}$,**	**$ε_{02}$**	**$ε_{03}$**	**початковий, E_b·**	**характеристичний E_{cm}·**
10_1	101,4	128,8	12,7	2,5	3,8	12,4	16,6	20,5	22,9
10_2	101,0	117,5	11,5	2,3	3,5	11,8	15,6	19,4	22,2
10_3	102,1	122,5	12,0	2,4	3,6	6,7	10,0	35,7	36,0
10_4	101,0	175,0	17,3	3,5	5,2	12,9	21,2	26,8	24,5
10_5	103,3	157,2	15,2	3,0	4,6	10,7	17,5	28,5	26,1
10_6	102,4	172,5	16,8	3,4	5,0	15,6	24,4	24,4	20,7

Як видно з даних, наведених в табл. 2.17 призмова міцність бетону на осьовий стиск зразків, відібраних із конструкції, виготовленої методом 3D - друку складає 11,5 - 17,3 МПа. При цьому, початковий модуль пружності бетону складає (19,4 - 28,5)·10^3 МПа, а характеристичний модуль пружності – (20,7 - 36,0)·10^3 МПа.

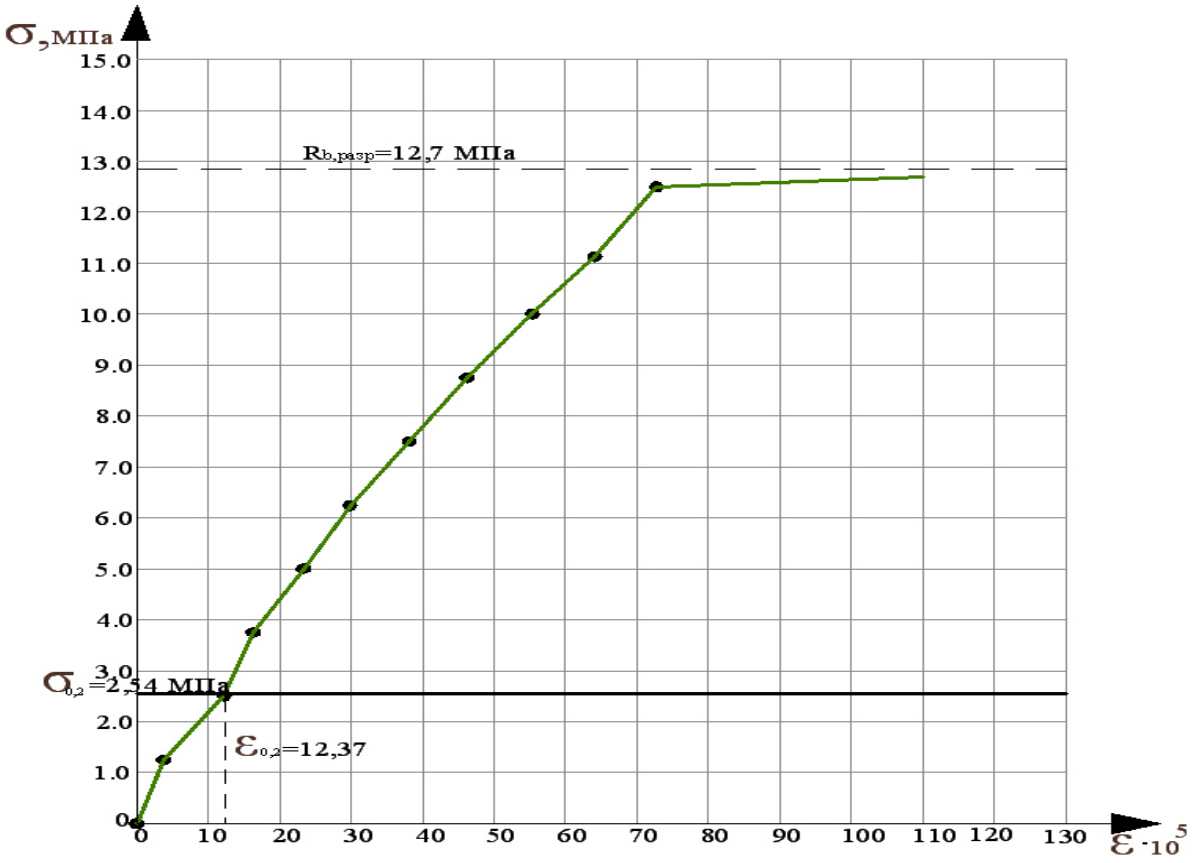


Рис. 2.50. Залежність між напруженнями і деформаціями бетону при випробуванні призми П-10_1 на стиск



Рис. 2.51. Характер руйнування бетонної призми П-10_1 по гранях I-II і III-IY відповідно



Рис. 2.52. Структура внутрішньої поверхні бетону призми, відібраної з конструкції

В табл. 2.22 наведені загальні результати визначення деформативних характеристик бетонів, які були виготовлені в формах. Ці результати були отримані шляхом систематизації попередніх досліджень (табл. 2.20) та даних, наведених в [23] і [24].

Таблиця 2.22.

Загальні результати визначення деформативних характеристик бетонів, виготовлених в формах за традиційною технологією

№ п/п	Характеристики бетонів	Показники	Клас бетону	
			В згідно [23]	С згідно [24]
1	Призмова міцність, R_b та $f_{cm,prism}$, МПа	14,4 (13,9)	В20 (-)	С16/20 (-)
2	Початковий модуль пружності, $E_b \cdot 10^3$, МПа	23,0 (21,8)	В15 (В12,5)	-
3	Характеристичний модуль пружності, $E_{ck} \cdot 10^3$, МПа	22,4 (21,5)	-	С16/20 (-)
4	Коефіцієнт пружньопластичних деформацій бетону, ν	0,97 (0,98)	-	-

Як видно з даних табл. 2.22 середня призмова міцність бетону, який був виготовлений в формах, складає 14,4 МПа, при цьому клас бетону, що відповідає цієї міцності складає В20 за даними [23] та С16/20 - за даними [24]. Середнє значення початкового модуля пружності складає $23,0 \cdot 10^3$ МПа, що згідно [23] відповідає класу В15. При спробі вирахувати клас бетону по середньому початковому модулю пружності за усіма 5-ма зразками призм, клас бетону знижується до В12,5. Клас бетону за значеннями середнього характеристичного значення модуля пружності, якій дорівнює $22,4 \cdot 10^3$ МПа відповідає С16/20.

Коефіцієнт пружньопластичних деформацій бетону рівний 0,97 свідчить про те, що при навантаженнях від 20 до 30 % від руйнівного, має місто пружня стадія роботи бетону.

Слід відзначити гарну збіжність результатів класу бетону, отриманих за модулем пружності, як початковим, так і характеристичним та розбіжність цих результатів по [23] при врахуванні призмової міцності.

В табл. 2.23 наведені загальні результати визначення деформативних характеристик бетонів, які були відібрані з конструкцій, виготовлених методом 3Д друку. Ці результати були отримані шляхом систематизації попередніх досліджень (табл. 2.19) та даних, наведених в [23] і [24].

Таблиця 2.23

Загальні результати визначення деформативних характеристик бетонів, виготовлених методом 3D - друку

№ п/п	Характеристики бетонів	Показники	Клас бетону	
			В згідно [23]	С згідно [24]
1	Призмова міцність, R_b та $f_{cm,prism}$, МПа	15,5 (14,3)	В20 (В20)	С16/20 (С16/20)
2	Початковий модуль пружності, $E_b \cdot 10^3$, МПа	24,4 (25,4)	В15 (В15)	-
3	Характеристичний модуль пружності, $E_{ck} \cdot 10^3$, МПа	23,6 (25,4)	-	С16/20 (С20/25)
4	Коефіцієнт пружньопластичних деформацій бетону, ν	0,97 (1,0)	-	-

Як видно з даних, наведених в табл. 2.23 середня призмова міцність бетону, який був відібраний з конструкцій, складає 15,5 МПа, при цьому клас бетону, що відповідає цієї міцності складає В20 за даними [23] та С16/20 - за даними [24]. Середнє значення початкового модуля пружності складає

$24{,}4 \cdot 10^3$ МПа, що згідно [23] відповідає класу В15. При спробі визначити клас бетону по середньому початковому модулю пружності за усіма 6-ти зразками клас бетону не знижується, а залишається тим же, тобто В15. Клас бетону за величиною середнього характеристичного значення модуля пружності, якій дорівнює $23{,}6 \cdot 10^3$ МПа відповідає С16/20. А при визначені класу бетону за усіма 6-ма зразками призм клас бетону підвищується до С20/25.

Слід відзначити гарну збіжність результатів класу бетону, отриманих за середнім характеристичним модулем пружності за 6-ю зразками та класу бетону, який визначений за призмовою міцностю за 4-ма зразками. Також співпадає клас бетону, який отриманий, як за середнім початковим модулем пружності, так і призмовою міцністю за нормативним документом [24].

Коефіцієнт пружньопластичних деформацій бетону рівний 0,97 свідчить про те, що при навантаженнях від 20 до 30 % від руйнівного, має місто пружня стадія роботи бетону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Construction 3D Printing, https://en.wikipedia.org/wiki Construction_ 3D_printing.

2. https://futureofconstruction.org/case/winsun/.

3. A. Kazemian, X. Yuan, E. Cochran, B. Khoshnevisac, Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture, Construction and Building Materials, Volume 145, 1 August 2017, Pages 639-647, https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817306657

4. T. Le, S. Austin, S. Lim, R. Buswell, Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, Mate. Struct. 45 (2012) 1221-1232.

5. Yi Wei Tay, Biranchi Panda, Suvash Candra Paul, Ming Jen Tan, Shunzhi Quian, Kah Fai Leong, Chee Kai Chua, Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing, Materials Science Forum, Vol. 861 (2016), 177-181.

6. Z. Malaeb, H. Hachem, A. Tourbah, T. Maalouf, N. Zarwin, F. Hamzeh, 3D concrete printing: mashine and mix design, Int. J. Civ. Eng. 6 (2015), 14-22.

7. Buswell, R.A.; Leal de Silva, W.R.; Jones, S.Z.; Dirrenberger, J. (October 2018). "3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research". Cement and Concrete Research. 112: 37–49. doi:10.1016/ j.cemconres. 2018.05.006. ISSN 0008-8846.

8. Jump up to:a b c Lim, S.; Buswell, R.A.; Le, T.T.; Austin, S.A.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T. (January 2012). "Developments in construction-scale additive manufacturing processes". Automation in Construction. 21: 262–268. doi:10.1016/j.autcon.2011.06.010. ISSN 0926-5805.

9. Gosselin, C.; Duballet, R.; Roux, Ph.; Gaudillière, N.; Dirrenberger, J.; Morel, Ph. (2016-06-15). "Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders" (PDF). Materials & Design. 100: 102–109. doi:10.1016/j.matdes.2016.03.097. ISSN 0264-1275.

10. Le, T. T.; Austin, S. A.; Lim, S.; Buswell, R. A.; Gibb, A. G. F.; Thorpe, T. (2012-01-19). "Mix design and fresh properties for high-performance printing

concrete". Materials and Structures. 45 (8): 1221–1232. doi:10.1617/s11527-012-9828-z. ISSN 1359-5997.

11. Tay, Yi Wei Daniel; Li, Mingyang; Tan, Ming Jen (2019). "Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures". Journal of Materials Processing Technology. 271: 261–270. doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.04.007.

12. Zhang, Xu; Li, Mingyang; Lim, Jian Hui; Weng, Yiwei; Tay, Yi Wei Daniel; Pham, Hung; Pham, Quang-Cuong (November 2018). "Large-scale 3D printing by a team of mobile robots". Automation in Construction. 95: 98–106. doi:10.1016/j.autcon.2018.08.004. ISSN 0926-5805.

13. ГОСТ 8735-88. Межгосударственный стандарт. Песок для строительных работ. Методы испытаний. - М.: Госстрой СССР, 1989.

14. ДСТУ Б В.2.7-71-98 (ГОСТ 8269.0-97). Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. - К.: Державний комітет будівництва, архітектури і житлової політики України, 1999. – 47с.

15. ДСТУ Б В.2.7. – 214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. - К.: Мінрегіонбуд України, 2010 – 43с.

16. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Бетоны. Методы определения средней плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости. – К.: Госстрой Украины, 2008.

17. https://en.wikipedia.org/wiki/D-Shape

18. Cesaretti, Giovanni; Enrico Dini; Xavier de Kestelier; Valentina Colla; Laurent Pambaguian (January 2014). "Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology". Acta Astronautica. 93: 430–450. doi:10.1016/j.actaastro.2013.07.034.

19. Edwards, Lin (19 April 2010). "3D printer could build moon bases". Phys.org. Retrieved 21 October 2013.

20.

&q=%D0%A3%D0%BD%D1%96%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%82%D1%83+%D0%9B%D0%B0%D1%84%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BE+3%D0%B4+%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%82&oq=%D0%A3%D0%BD%D1%96%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B8%D1%82%D0%B5%D1%82%D1%83+%D0%9B%D0%B0%D1%84%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BE+3%D0%B4+%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D1%82&gs_lcp=CgZwc3ktYWIQAzIFCCEQoAEyBQghEKABOgQIIxAnOgYIABAWEB5Qm9QFWNr7BWCQgQZoAHAAeACAAZQBiAGACpIBAzEuOZgBAKABAaoBB2d3cy13aXo&sclient=psy-ab&ved=0ahUKEwiRl9b7oaLqAhVy-ioKHYa0BGQQ4dUDCAw&uact=5

21. Физические свойства бетона, определяемые путем его взаимодействия с водой. [Электронный ресурс] www.bsu-5. ru/voda.

22. ДСТУ Б В.2.7. – 217:2009. Бетони. Методи визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона. - К.: Мінрегіонбуд України, 2010.

23. В.Н. Байков, Э.Е. Сигалов. Железобетонные конструкции. Общий курс. – М.: Стройиздат, 1991. – 767с.

24. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. - К.: Мінрегіонбуд України, 2011 – 71с.

3. АРХІТЕКТУРА БУДІВЕЛЬ, ЗВЕДЕНИХ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3Д ДРУКУ

3.1. Історія перших архітектурні рішення будівель, зведених за технологією 3Д друку

Архітектор Джеймс Брюс Гардінер (James Bruce Gardiner) [1] став піонером архітектурного дизайну для будівництва 3D друку з двома проектами. Перша вежа Freefab 2004 та друга Villa Roccia 2009–2010. FreeFAB Tower [2] базувались на оригінальній концепції поєднання гібридної форми побудови 3D друку з модульною конструкцією. Це був перший архітектурний проект будівлі, орієнтований на використання будівельної 3D - друку. Вплив технології можна побачити в різних проектах, включаючи [3] та офіс майбутнього [4]. Проект FreeFAB Tower також зображує перше комерційне комерційне використання багатоосевої роботизованої техніки в будівництві 3D - друку; використання таких машин у будівництві неухильно зростає в останні роки разом з проектами MX3D [5] та Branch Technology [6].

Villa Roccia 2009–2010 [7] зробила цю піонерську роботу на крок далі, розробивши дизайн вілли в Порто-Ротондо, Сардинія, Італія, у співпраці з D-Shape. Дизайн вілли був зосереджений на розробці специфічного архітектурного образу під впливом скельних утворень на місці та уздовж узбережжя Сардинії, а також з урахуванням використання збірного процесу 3D - друку. Проект пройшов прототипування, але не пройшов до повного будівництва.

Франсіош Рош (Francios Roche) (R & Sie) розробив виставковий проект і монографію «Я чув про це» у 2005 році [8], в якій досліджував використання високопродуктивної самохідної змії, як автономного пристрою 3D - друку та генеративної системи дизайну для створення висотних житлових веж. Проект, хоча неможливо втілити в життя за допомогою

сучасних технологій, продемонстрував глибоке дослідження майбутнього проектування та будівництва.

3D - друковану будівлю голландського архітектора Янджаапа Руйссенаарса (Janjaap Ruijssenaars's) планувалося збудувати за допомогою партнера голландських компаній [9…11]. Будинок планували побудувати наприкінці 2014 року, але на сьогодні він ще не збудований.

Будинок на вимогу, або БПК, невеликий офісний готель 3D, надрукований 3D Printhuset (нині COBOD International) та розроблений архітектором Ана Гойдеа (Ana Goidea), увібрав в себе вигнуті стіни та брижі ефектів на їх поверхні, щоб продемонструвати свободу дизайну, яку дозволяє 3D - друк в горизонтальній площині.

3.2. Приклади 3D друку в будівництві. Світовий досвід

На сьогодні існує значний досвід друкування різноманітних за призначенням будівель: одноповерхових та з одним приміщенням; двоповерхових з декількома приміщеннями, в конструкції яких використовують арматурні елементи; з екологічних матеріалів та енергозаощаджувальних; багатоповерхових; різноманітної зовнішньої архітектури, яка враховує призначення будівлі, національні традиції та затратні показники (табл.. 3.1).

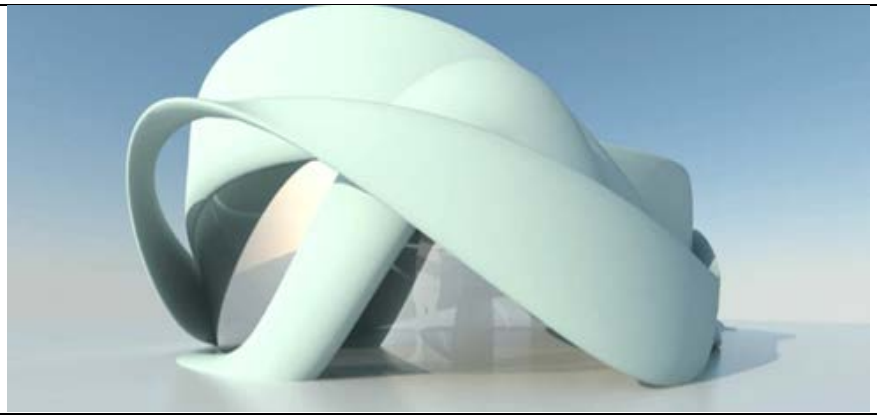
Таблиця 3.1.

Дані про будівлі, зведені в світі, з використанням технології 3Д друку

№	Зображення	Літ.
1	2	3
1	 	[12]

	Китай, Шанхай, 2014	
	3D-друк Winsun - 150x10x6(h)	
	Вілла WinSun в Сучжоу. Площа 1100 м2	
	Друк деталей. Вироби із бетону. Суміш – цементу та будівельних відходів з добавленням затверджувача.	
2	 	[12]
	Китай, Сучжоу	
	3D-друк Winsun - 40x10x6(h)	
	Особняк WinSun в Сучжоу. Площа 1100 м2.	
3	 	[12]
	США, Міннесота, 2014	
	Контурний 3D друк Stroybot 2	
	Замок	
	Моноліт, вироби. Матеріал: цементний розчин, добавки.	
4	 	[13]
	Китай, Сучжоу, 2015	
	3D-друк Winsun 150x10x6(h)	
	5-поверховий житловий будинок	
	Друк окремих блоків. Вироби із бетону. Матеріал: суміш із будівельних відходів, включно скло, сталь, цемент.	

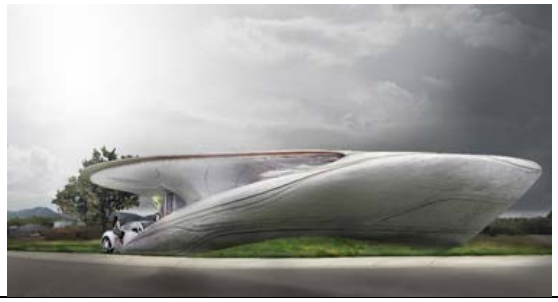
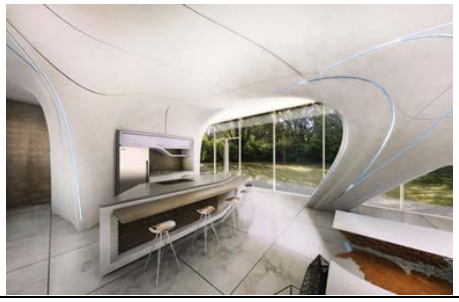
5	 	[12]
	Китай, Шанхай, 2015	
	3D-друк Winsun 150x10x6(h)	
	Вироби з бетону, армованого скловолокном.	
6	 	[13] [29]
	ОАЕ, Дубай, 2016 - Офіс Dubai Future Foundation (ОАЕ)	
	3D-друкWinsun	
	Будівля “Офіс майбутнього”. Площа 240 м2. 17 модулів (елементів). Одноповерхова будівля.	
	Друк елементів. Вироби із бетону.	
7	 	[15]
	Росія, Московська область, м. Ступіно, 2016	
	Apis Cor 3D-друк	
	Житлова будівля, 38м2. Складна форма будівлі, в основі циліндр.	
	Вироби із бетону. Друк самонесучих стін, перегородок і огороджувальних конструкцій будівлі.	

8		[15]
	Нідерланди, 2017. Компанія CyBe Additive Industries.	
	3D-друк-маніпулятор CyBe Construction	
	Конференц-центр, 90 м2. Складна архітектурная форма.	
	Конструкції довільної форми із спеціального бетонного розчину CyBe MORTAR.	
9		[15]
	Франція, Університет Нанта - (University of Nantes) спільно з Nantes Digital Sciences Laboratory (LS2N)	
	Проект Yhnova - роботизована рука Batiprint 3D. Архітектурна фірма TICA.	
	Соціальне житло. П'ятикімнатний житловий будинок. Площа 95 $м^2$. Будинок з дугоподібними стінами і округленими кутами. Висота до 7 м.	
	Метод Batiprint3D – 3D друку «зсередини»	

10	  	[16]
	Росія, Ярославль, 2015-2017	
	Принтер S-6044 «АМТ-СПЕЦ-АВІА» – модель портального типу з робочим полем 3,5 х 3,6 х 1 м.	
	Житлова будівля. Площа 298,5 м2.	
	Друкували будівлю по частинах (стіни будинку, декоративні елементи, вежа). Збирали на будмайданчику як конструктор. Принтер друкує стандартними бетонами М-300.	
11	 	[17]
	Китай, Пекін, 2016	
	Китайська компанія Hua Shang Tengda	
	Двоповерховий особняк. Площа 400 м2	
	Матеріал: спеціальний залізобетон.	

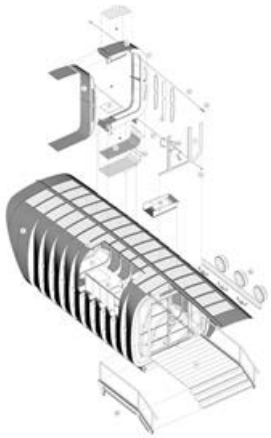
12	   	[17] [27]
	Філіпіни, 2015	
	Lewis Grand Hotel – створює перший в світі готель з допомогою 3D принтера.	
	Трикімнатна вілла 130 м2 (10,5x12,5x3 (h) - прибудова до основної будівлі.	
	Матеріал: бетон	
13	 	[18]
	Росія, 2018	
	Американські компанії ICON і New Story	
	Житлова будівля. Площа 55-75 м2	
14	 	[19]
	Італія, дім Гайа, 2018	
	Модульний 3D-принтер Crane Wasp. Компанія WASP (будинки різних форматів і розмірів)	
	Житловий будинок. Площа 30 м2. Будинок круглий в плані. 3D-друк - зовнішня оболонка. Внутрішні дерев'яні конструкції,	

	утримують дерев'яний дах. Порожнини в конструкції стіни залишається порожніми для природної вентиляції, що дозволяє вбудовувати енергообладнання в стіни будинку.	
	Матеріал: натуральні суміші, зроблені з грунту прилеглої території, а також відходів виробництва рису, таких як подрібнена солома і рисове лушпиння.	
15	  	[20]
	Ейндховен, Босрийськ, Голландія, 2017-2019	
	Проект Віха в Голландії від Houben & Van Architecten. Технологічний університет Ейндховена спільно з місцевою архітектурою студією Houben & Van Architecten.	
	Проект 5 житлових будинків, які будуть доступні в оренду через фірму по нерухомості Vesteda.	
16	   	[24]
	ОАЕ, Дубай, 2018	
	Професор Берок Хошневіс з Університету Південної Каліфорнії розробив 3D принтер, який може побудувати будинок площею 250 кв. м. Для будівництва використовується 3D принтер	

	висотою 6 м, довжиною 37 м і шириною 12 м.	
	Офісна будівля, одноповерхова. Площа 250 м2. У ньому є електрика, телекомунікації, водопостачання і система кондиціонування повітря.	
	3D друк елементів. Збірка будівлі на будмайданчику.	
17	   	[21]
	США, Curve Appeal в місті Чаттануга	
	Архітектурна студія WATG. Проект виконаний в концепції Freeform, що має на увазі нестандартну форму будівлі.	
	Житловий будинок, 56-74 м2.	
	Для спорудження будинку будуть використовуватися 28 панелей, які надрукують на 3D-принтері за межами будівельного майданчика. Надалі панелі будуть з'єднані, щоб сформувати зовнішні стіни, дах і внутрішні елементи. Кожен з цих елементів буде збиратися окремо, і тільки потім на будівельному майданчику їх з'єднають разом.	
18	 	[22] [25]

	 	
	ОАЕ, Дубай	
	Компанія Apis Cor	
	Двоповерхова адміністративна будівля, 640 м2. Висота будівлі 10 м.	
	Матеріали: пісок, цемент, гіпс.	
19	 	[13]
	ОАЕ, Дубай	
	3Dпринтер CyBe. Голландська компанія CyBe Construction. Лаборатория R&Drone.	
	Інноваційний центр Solar Park. Площа 168 м2. Виготовлення збірних конструкцій. 27 окремих елементів.	
	Матеріали: бетонна суміш.	
20	 	[24] [15]
	Росія, Ступіно, 2017	
	Мобільний 3D-принтер Digital Construction Platform (DCP) -2011, США, Массачусетський Техничний Інститут.	
	Купол висотою 3,7 м і діаметром 14,6 м	
	DCP може працювати з бетоном, льодом, грунтом і піно-поліуретаном. Будівництво базової конструкції стін купола.	

21		[23]
	Китай	
	3D принтери, размірами 20 м в ширину и 6 м в висоту.	
	Житловий будинок.	
22	 	[30] [31]
	ОАЕ, Дубай, мікрорайон Arabian Ranches III	
	Концепція Smart City в Дубаї. Державний забудовник Emaar Properties.	
	Житловий будинок.	
	3D друк як альтернатива традиційної технології будівництва більш екологічна. Технологія знижує обсяг відходів, а також	

	рівень шумового забруднення.	
23	 	[29]
	Італія, Мілан	
	Робот-принтер (спеціальний роботизований маніпулятор) був розроблений CyBe Construction (вартість - 400 тисяч доларів США).	
	Житловий будинок. Проект 3D Housing 05. Складне планування і дизайн. Представлений на виставці Salone del Mobile.	
24		[25]
	Латинськая Америка	
	Будівельні 3D принтери ICON	
	Бюджетне житло для малозабезпечених. Досвід дешевого і швидкого спорудження будівель.	
25	 	[26]

	 	
	США, Департамент енергетики Національної лабораторії Ок-Ридж США (ORNL).	
	3D принтер - BAAM (Big Area Additive Manufacturing). Концепція будівлі і транспортного засобу, надрукованих на 3D принтері - AMIE (Additive Manufacturing Integrated Energy).	
	Житловий будинок (мобільний, пересувний). Розміри будинку: довжина - 12 м, ширина - 3,5 м, висота - 3,5 м. Каркас складається: 80% - непрозорі панелі, 20% - скло. Сонячні панелі розташовані на даху будинку, заряджають акумулятори під будівлею - джерело енергії в нічний час.	
	Дана технологія, яка забезпечує двосторонній потік енергії між житлом і транспортним засобом, покликана об'єднати можливості чистої енергії і мсштабного 3D друку і продемонструвати революційний підхід до використання, зберігання і споживання енергії.	
26	  	[27]
	Франція	
	Метод 3D друку під назвою BatiPrint3D, який був розроблений дослідниками з Університету Нанта (роботизована рука	

	довжиною 4 метри з лазерним управлінням для осадження шарів різних будівельних матеріалів). Проект Ynhova - є продуктом співпраці між Університетом Нанта, міською радою, Bouygues Construction, Lafarge Holcim, організацією Habitat Nantes Métropole, архітекторами TICA і урбаністами.	
	Доступне житло. Житловий будинок з чотирма спальнями, площею 95 м^2.	
	Принтер працює, друкуючи шари знизу вгору. Роботизована машина BatiPrint3D підтримує три типи шарів: опалубка з піно-подібного матеріалу, що ізолює шар і шар конструктивний, виконаний зі спеціальної бетонної суміші. Це створює товсту і дуже міцну стіну.	

3.3. Типологічний ряд індивідуальних і малоповерхових житлових будівель для технології 3D-друку будівельних об'єктів

3.3.1. Класифікація типів житлової забудови та житлових будинків згідно з державними будівельними нормами

Згідно з ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування та забудова території» зона житлової забудови складається із ділянок територій [32]:

- багатоквартирної житлової забудови;

- садибної, в тому числі блокованої, житлової забудови;

- житлово-громадської забудови, тобто житлових будинків, з приміщеннями громадського призначення у вбудовано-прибудованих або стилобатних частинах.

Багатоквартирна забудова – це територія житлової забудови або її частини, у межах якої розташовуються багатоквартирні житлові будинки з

відповідними прибудинковими територіями, на яких розміщуються дитячі, спортивні, господарські майданчики, проїзди, пішохідні доріжки, зелені насадження та автостоянки.

Садибна забудова. Зони садибної забудови можуть формуватись окремими індивідуальними чи зблокованими житловими будинками з присадибними ділянками. Поверховість будинків в межах територій садибної забудови не може перевищувати 3-х поверхів без урахування мансарди.

Садибний будинок (індивідуальний будинок) **–** це житловий будинок з присадибною ділянкою та господарськими спорудами, призначеними для одного домогосподарства.

Зблокований житловий будинок **–** це будинок квартирного типу, що складається з двох і більше квартир, кожна з яких має безпосередній вихід на приквартирну ділянку або вулицю.

Житлово-громадська забудова. ***Багатофункціональні споруди*** - будинки і комплекси, які формуються з приміщень, їх груп, різного громадського, житлового та іншого призначення, поєднання яких обумовлене економічною доцільністю і містобудівними вимогами.

Інші типи житлової забудови.

Дачна та садова забудова. Території дачної та садової забудови призначаються для організації відпочинку громадян, ведення садівництва та городництва з будівництвом дачних, садових будинків для тимчасового або постійного проживання. ***Будинок дачний*** **-** житловий будинок садибного типу для використання протягом року для відпочинку, тимчасового перебування або постійного проживання. ***Будинок садовий*** **-** будівля для літнього (сезонного) використання, яка в частині нормування площі забудови, зовнішніх конструкцій та інженерного обладнання не відповідає нормативам, установленим для житлових будинків**.**

Рекреаційне житло. Різновид розміщення туристів та відпочиваючих, представлений виключно приватними житловими будинками, призначеними для постійного проживання власників житла спільно з тимчасовим

розміщенням обмеженої кількості відпочиваючих (менше 30 осіб) і які розміщені за межами озеленених територій загального користування.

Хостел. Тимчасове житло економ-класу для туристів, головна відмінність якого від готелю - плата за місце, а не за номер.

Згідно з ДБН В.2.2-15:2019 «Житлові будинки. Основні положення» житлові будинки поділяються за планувальною ознакою, рівнем комфорту, складу приміщень квартири та параметрів приміщень квартири [33].

За планувальною ознакою житлові будинки поділяються на слідуючи типи:

- ***житловий будинок секційного типу*** - будинок, що складається з однієї або декількох секцій;
- ***житловий будинок коридорного типу (галерейного)*** типу - будинок, у якому квартири (або кімнати гуртожитків) мають виходи через загальний коридор (галерею) не менше ніж на двоє сходів (сходових кліток).

Будинок квартирного типу, що складається з двох і більше квартир, кожна з яких має безпосередній вихід на приквартирну ділянку або вулицю називається ***зблокований житловий будинок.***

Класифікація квартир за рівнем комфорту, складу приміщень квартири та параметрів приміщень квартири [33]:

- ***житло 1 категорії*** – це житло з нормованими нижніми і ненормованими верхніми межами площ квартир та одноквартирних житлових будинків (чи котеджів), які забезпечують рівень комфорту проживання не нижче за мінімально допустимого.
- ***житло 2 категорії*** – це житло з нормованими нижніми і верхніми межами площ квартир та житлових кімнат гуртожитків відповідно до чинних санітарних норм, які забезпечують мінімально допустимий рівень комфорту проживання.

3.3.2. Архітектурно-будівельна типологія будинків

Архітектурно-будівельна типологія будівель - наука, що класифікує і вивчає архітектурно - будівельні об'єкти в їх порівнянні та співвідношенні за загальними ознаками [34].

Архітектурна типологія будівель - один з найважливіших розділів теорії архітектури, в якому систематизуються основні принципи формування типів будівель з урахуванням їх бажаних рис і характеристик. Вона визначає класифікацію і номенклатуру типів будівель, встановлює основні параметри норм проектування, складу, розмірів і функціональної взаємозалежності приміщень. Однією з головних задач архітектурної типології є визначення тенденцій і перспектив вдосконалення типів будівель [37].

Питання архітектурно-будівельної типології будівель достатньо повно на сучасному етапі представлені в роботах [34…37]. Найбільш загальними є класифікації будинків за наступними ознаками [34, 35, 39, 40]:

- ***за функціональним призначенням*** - цивільні (житлові та громадські), промислові, сільськогосподарські. Соціальні запити суспільства визначають в першу чергу функціональне призначення споруджуваних будинків, а функціональне призначення будівлі головним чином визначає їх форму;

- ***за типами*** - класифікуються в залежності від їх функціонального призначення. Наприклад, житлові будівлі підрозділяють на наступні типи: - одноквартирні (одно-, двоповерхові, мансардні); - блоковані (двоквартирні одно-, двоповерхові, чотирьох-квартирні двоповерхові; багатоквартирні одно-, двоповерхові); - секційні (одно- секційні триповерхові і вище, багатосекційні двоповерхові і вище); - коридорні; - коридорно-секційні; - галерейні; галерейно-секційні;

- ***за об'ємно-планувальними параметрами*** будинки класифікуються по поверховості, планувальним схемам, функціональному зонуванні будівель на генеральному плані і приміщень в самій будівлі;

- ***за закономірностями формоутворення*** - будівлі підрозділяють на складені простими геометричними тілами і елементами (паралелепіпедами, призмами, кубами) і складними (циліндрами, куполами, конусами, їх перетинами і т. п.). Форма будівлі безпосередньо пов'язана з конструктивною системою. Форма також залежить від містобудівних функцій будівлі і впливає на його положення в планувальній структурі поселення;

- ***за містобудівними функціям і вимогам до них*** - важливі будівлі з підвищеними архітектурно-композиційними якостями (більшою мірою громадські будівлі та інженерні споруди), які можуть бути основним композиційними елементами забудови, можуть визначати силует населеного пункту, формувати містобудівні ансамблі та інш.;

- ***за експлуатаційними якостями*** - будівлі підрозділяють залежно від наступних параметрів: довговічності; вогнестійкості; капітальності; фізичної та моральної амортизації; і т. п.;

- ***за матеріалами несучих конструкцій***: кам'яні (з цегли і природного каменю); бетонні (зі штучного каменю, бетонних і легкобетонних блоків); залізобетонні; металеві; дерев'яні; з полімерних матеріалів; змішаного типу;

за способом зведення будівлі розрізняють: з малорозмірних елементів (дрібнорозмірні елементи - це конструктивні елементи будівель, що переміщуються на будівельному майданчику вручну або за допомогою засобів малої механізації); з великорозмірних елементів (для монтажу цих елементів застосовують потужні підйомні механізми, крани); монолітні (попередньо приготована бетонна суміш укладається в форму (опалубку) безпосередньо на будівельному майданчику, де і відбувається її твердіння).

До будівель незалежно від їх функціонального призначення пред'являються загальні вимоги:

- ***технічні*** - забезпечення захисту приміщень від впливу зовнішнього середовища, достатні міцність, стійкість, довговічність;

- ***протипожежні*** - забезпечення можливості конструктивних елементів будівель зберігати при пожежі несучі та огороджувальні здатності;

- ***естетичні*** - формування зовнішнього вигляду будівлі і навколишнього простору за рахунок певного вибору будівельних матеріалів, конструктивної форми, колірної гами;

- ***економічні*** - забезпечення мінімальних приведених витрат (зменшення витрат праці, матеріалів, термінів будівництва і експлуатаційних витрат).

3.3.3. Типологія житлових будівель

Житлові будинки призначені для постійного або тимчасового проживання в них людей, підрозділяють на наступні групи [34]:

- ***квартирні будинки***
- ***гуртожитки***
- ***будинки для людей похилого віку та сімей з інвалідами***, що пересуваються на кріслах-колясках.

У число житлових будинків не входять дачі (будови капітальні, полегшені), що належать державним підприємствам, організаціям і установам і дачно-будівельним кооперативам, громадянам на праві приватної власності, літні садові будиночки членів садівницьких товариств, мисливські будиночки, спортивні та туристичні бази, мотелі, кемпінги, санаторії, будинки відпочинку, пансіонати, будинки для приїжджих, готелі, казарми, келії, залізничні вагончики та інші будівлі та приміщення, призначені для відпочинку, сезонного і тимчасового проживання.

Житлові будинки за кількістю квартир у домі розділяються на [33]:

- ***багатоквартирний житловий будинок*** - житловий будинок, до складу якого входить більш ніж одна квартира. Можуть бути зблокованого, секційного, коридорного, галерейного и терасного типів;

- ***одноквартирний житловий будинок*** - індивідуальний житловий будинок, який має прибудинкову ділянку.

Багатоквартирні житлові будинки діляться з урахуванням поверховості на [32, 34]:

- ***малоповерхові житлові будинки*** до 3 поверхів (без урахування мансардного поверху);

- ***житлові будівлі середньої поверховості*** (від 4 до 5 поверхів включно);

- ***багатоповерхові житлові будинки*** (від 6 до 9 поверхів включно);

- ***житлові будівлі підвищеної поверховості*** (від 10 до 16 поверхів включно);

- ***висотні житлові будівлі*** (вище 16 поверхів).

3.3.4. Номенклатура типів житлових будівель

Номенклатура типів житлових будинків складається з диференційовано розроблених типологічно схожих проектів житлових будинків по об'ємно-планувальної структури [34]. **З урахуванням об'ємно-планувальної структури** житлові будинки підрозділяють на наступні типи:

- одноквартирні; - двоквартирні; - блоковані; - секційні; коридорні; - галерейні.

Основними **критеріями** поділу житлових будинків на типи є соціально-економічні умови, демографія, специфіка ведення особистого підсобного господарства.

Залежно від **призначення** житлові будинки поділяються на три групи:

- ***постійного проживання***. До першої групи входять всі види квартирних будинків, в тому числі і будинки для малосімейних, інтернати для престарілих, інвалідів та ветеранів.

- ***тимчасового проживання***. Другу групу складають будинки для тимчасового проживання, розраховані для одинаків (гуртожитку), тобто на заселення робочої молоддю, студентами, учнями.

- ***сезонного проживання***. Третя група - для тимчасового проживання в певний час сезону як стаціонарні, так і мобільні або збірно-розбірні. Вони призначені для промисловиків, нафтовиків, газовиків, тваринників, пастухів, будівельників і т. п.

За **характером забудови**, квартирні житлові будинки поділяються на чотири типи:

- ***з приквартирними ділянками***, в яких кожна квартира має свою земельну ділянку;

- ***з елементами первинного господарсько-побутового обслуговування*** і з озеленює територією, призначеної для загального користування;

- ***з розвиненим обслуговуванням***, що включає різний набір сучасних квартир, комплекс обслуговуючих установ для задоволення найрізноманітніших культурно-побутових потреб населення цього типу будинків (МЖК - молодіжні житлові комплекси);

- ***готельного типу***, призначені для одинаків і сімей з двох-трьох чоловік, які не ведуть в повному обсязі домашнього господарства. У них квартири мають невелику житлову площу, зменшений склад.

3.3.5. Малоповерхові житлові будинки

Житлові малоповерхові садибні будинки поширені в сільських поселеннях і малих містах, а також у великих містах на спеціально виділених ділянках для котеджної забудови. Їх поділяють на одно-квартирні і двоквартирні будинки. [34, 35, 39… 42].

Одноквартирні садибні будинки. Будинок житловий одноквартирний призначений для постійного спільного проживання однієї сім'ї.

За архітектурно-планувальним прийомам садибного одноквартирного будинку можна поділити на такі типи:

- одноповерхові (в одному рівні);

- одноповерхові мансардні;

- дво-, триповерхові мансардні;

- двоповерхові;

- триповерхові.

Двоквартирні садибні будинки (дуплекс). Двоквартирні будинку (спарені) представляють собою блок, що складається з двох ізольованих садибних будинків, що мають одну спільну стіну і об'єднаних одним дахом.

Блоковані житлові будинки (таунхаус). Блокованим житловим будинком називають будівлю квартирного типу, що складається з двох квартир або більше, кожна з яких має безпосередній вихід на приквартирну ділянку. Блоковані малоповерхові будинки (таунхауси) складаються з декількох прилеглих один до одного ізольованих блок-квартир. Кількість блоків, що входять до складу будинку, залежить від різних факторів (характер ділянки, рельєф місцевості, ступінь вогнестійкості будинку і т. п.) І може включати від 2 до 16 квартир і більше. Блоковані будинки будують, як правило, одно-, дво- і триповерховими.

Блокування будинків можна здійснювати з найрізноманітніших поєднань блок-квартир з різною формою плану (прямокутної, Г-образної, Т-образної, криволінійної, складної), що дозволяє, зокрема, влаштовувати відкриті і закриті внутрішні дворики:

- ***лінійне блокування*** (в тому числі дзеркальна) - однорядна при необмеженої орієнтації, дворядна при обмеженою орієнтації, пілообразная;

- ***блокування із зсувом квартир в плані*** (в одну або в різні боки, а також дзеркальна) - однорядна і дворядна;

- ***блокування у вигляді складних структур - «килимова»*** (в тому числі сітчаста з напівзамкнутих або замкнутими дворами);

- ***кругова*** з ділянками всередині дворів;

- ***зі зрушенням по вертикалі і горизонталі на крутому рельєфі.***

Блокування квартир може здійснюватися по вертикалі, при цьому квартири верхнього рівня мають вхід з прибудинкової території через свою відокремлену сходову клітку або сходи.

Блоковані будинки будують найчастіше одно- і двоповерховими, а останнім часом для підвищення щільності міської забудови застосовують трьох- і чотириповерхові з більш складною об'ємно-просторової структурою.

3.3.6. Типологія житлових будівель за технологією 3D друку

Аналіз світового досвіду зведення будинків методом 3D друку в світі, який тільки набирає темп, вже дозволяє зробити певні висновки щодо класифікації будинків за такими ознаками як: функціональне призначення будинку, поверховість будинку, площа і габарити будинку, архітектурно-планувальні характеристики, особливості формоутворення, технологія зведення будівлі, будівельні матеріали, тип 3D-принтера.

Класифікація будинків зведених методом 3D друку за характерними ознаками:

- ***функціональне призначення будинку*** – житлові будинки (одноквартирний (котедж, особняк, вілла), багатоквартирний), готель, офіс, конференц-центр; двоповерхова адміністративна будівля; інноваційний центр Solar Park;
- ***тип будинку*** – стаціонарний, мобільний;
- ***поверховість будинку*** – одноповерховий (переважно), двоповерховий,

багатоповерховий (п’ять поверхів);

- ***площа*** – від 30 м2 до 1100 м2;
- ***габарити будинку*** – ширина – 10,0 м, 12,0 м, 20,0 м; висота – від 3,0 м до 6,0 м; діаметр – 15,0 м;
- ***планування:*** проста схема - квадрат, прямокутник, коло; складна схема - прямокутник з дугоподібними стінами, прямокутник з округленими кутами; вільне планування;

- ***формоутворення*** - будівля - куб, будівля - паралелепіпед, будівля - купол, будівля - циліндр, будівля - модуль, будівля - капсула, складна архітектурна форма, біонічна форма, вільна форма, конструкції довільної форми;

- ***технологія зведення будівлі***:

- друк будівлі цілком;

- друк елементів будівлі, збірка елементів;

- друк будівлі по частинам;

- друк окремих блоків;

- друк окремих панелей складної форми, збірка;

- друк модулів, збірка модулів;

- друк методом Batiprint3D - 3D друк «зсередини»;

- ***будівельні матеріали:***

- цементний розчин з добавками;

- опалубка з піноподібного матеріалу, що ізолює шар і структурує шар;

- спеціальна бетонна суміш;

- натуральні суміші з ґрунту, взятої з прилеглої території, а також відходів виробництва рису, таких як подрібнена солома і рисове лушпиння;

- цементний розчин, посилений скловолокном;

- суміш з будівельних відходів, включаючи скло, сталь, цемент;

- суміш з цементу і будівельних відходів з додаванням затверджувача;

- матеріали для друку: грунт, пінополіуретан, пісок, цемент, гіпс.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 3

1. "Linkedin Profile". Linkedin.

2. Gardiner, James Bruce. "Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing" (PDF). RMIT Research bank. Retrieved 21 February 2017. (pp. 176–202), 2011

3. "How a Chinese Company 3D-Printed Ten Houses In a Single Day". Gizmodo. Retrieved 2017-02-21.

4. "Office of the Future is 3D printed in Dubai". Treehugger. Retrieved 2017-02-21.

5. Kira. "Construction of world's first 3D printed metal bridge begins today in Red Light District of Amsterdam". 3ders. Retrieved 21 February 2017.

6. Clark, Corey. "Branch Technology unveils SHoP Architects' 3D printed pavilion at Design Miami". 3D Printing Industry. Retrieved 21 February 2017.

7. Gardiner, James Bruce. "Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing" (PDF). RMIT Research bank. Retrieved 21 February 2017. (p203-279), 2011.

8. "R&Sie (n) I've Heard About" (PDF). Retrieved 21 February 2017.

9. "EeStairs Founding Father of the Landscape House". www.eestairs.com.

10. "The World's First 3D-Printed Building Will Arrive In 2014". TechCrunch. 2012-01-20. Retrieved 2013-02-08.

11. UniverseArchitecture (15 September 2014). "Landscape House Forum & Workshop Sept 3rd 2014_NRC Cafe_Amsterdam" – via YouTube.

12. Калугина Ю.Е., Золотарев А.Д. Возведение зданий с помощью контурного строительства//Современные инновации:Журн. - Тула, ТГУ, 2018. Вып. №2 (30) - С.27-31.[Электронный ресурс] - https://cyberleninka.ru/article/n/vozvedenie-zdaniy-s-pomoschyu-konturnogo-stroitelstva.

13. Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Тхань Куй. Анализ существующих технологических решений 3d-печати в строительстве //

Журнал Весник МГСУ - М., 2018. Том 13, вып. №7–С.863-876. [Электронный ресурс] -https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-suschestvuyuschih-tehnologicheskih-resheniy-3d-pechati-v-stroitelstve

14. Текущая ситуация и перспективы применения 3D печати в строительстве (3DCP) в России и мире. [Электронный ресурс] - http://json.tv/ict_telecom_analytics_view/tekuschaya-situatsiya-i-perspektivy-primeneniya-3d-pechati-v-stroitelstve-3dcp-v-rossii-i-mire-20190726054004

15. 3D-печать домов. Лучшие принтеры. Обзор, 2017 г.[Электронный ресурс] -https://fastsalttimes.com/sections/obzor/1200.html.

16. Напечатанный на 3D-принтере дом в Ярославле готовится к заселению. - News 3dtoday, 2017. [Электронный ресурс] - https://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/printed-on-a-3d-printer-house-in-yaroslavl-prepares-to-move-in/.

17. Аддитивные технологии в строительстве. [Электронный ресурс] - https://docplayer.ru/49131329-Additivnye-tehnologii-v-stroitelstve.html.

18. Дом, напечатанныйна 3d-принтере. [Электронныйресурс] - https://rostov.media/novosti-i-sobytiya/article_post/dom-napechatannyy-na-3d-printere-oboydetsya-v-4-tys.

19. Напечатанный дом, 2019. [Электронный ресурс] - https://www.magazindomov.ru/2019/02/28/napechatannyj-dom/.

20. 3D-Дом в Голландии, 2018.[Электронный ресурс] - https://www.magazindomov.ru/2018/09/13/3d-dom-v-gollandii/.

21. Первый дом «свободной» формы, напечатанный на 3D-принтере. [Электронный ресурс] -https://5cek.livejournal.com/311513.html.

22. В Дубае возвели самый большой в мире дом, напечатанный на 3D-принтере. [Электронный ресурс]- https://news.finance.ua/ru/news/-/461552/v-dubae-vozveli-samyj-bolshoj-v-mire-dom-napechatannyj-na.

23. Напечатанный дом в Китае. [Электронный ресурс] - http://3dmag.org/ru/blog/3d-printing/1372.html.

24. В Дубае напечатали здание на 3D принтере за 19 дней.[Электронный ресурс]-https://stroi.mos.ru/unikalnaya-arhitektura/mir/v-dubaie-napiechatali-zdaniie-na-3d-printierie-za-19-dniei.

25. Экотехника. [Электронный ресурс]-https://ecotechnica.com.ua/tag/3d-stroitelstvo.html.

26. Напечатанный дом и автомобиль на 3D принтере. [Электронный ресурс] - https://3dreams.com.ua/.

27. Возведение отеля с помощью 3D принтера. [Электронный ресурс] – https://3dreams. com. ua/.

28. Первая французская семья, переехавшая в напечатанный дом. [Электронный ресурс] – http://3dmag.org/ru/blog/3d-printing/3266.html.

29. Дом, который распечатали на 3D принтере. [Электронный ресурс] -https://mixnews.lv/mixer/2019/10/25/dom-raspechatali-na-3d-printere/.

30. Emaar использует 3d печать в новом проекте. [Электронный ресурс] -https://www.thefirstgroup.com/ru/news/emaar-ispolzuet-3d-pechat/.

31. Emaar строит первый 3D-печатный дом в Дубае. [Электронный ресурс] -https://www.admiddleeast.com/emaar-is-building-3d-printed-homes-in-dubais-arabian-ranches

32. ДБН Б.2.2-12:2019 «Планування та забудова території». – Київ, 2019.

33. ДБН В.2.2-15:2019 «Житлові будинки. Основні положення». – Київ, 2019.

34. Синянский И.А., Манешина Н.И. Типология зданий. – М.:Изд.центр «Академия», 2014. [Электронный ресурс] - http://korotaev-info.ru/wp-content/uploads/2016/09/.

35. Архитектурная типология зданий и сооружений:Учебник для вузов:/ Змеул С.Г. Маханько Б.А. - М.: Архитектура-С, 2004. –240 с., ил.[Электронный ресурс] -http://bwbooks.net/index.php?author=zmeul-sg&book=2004&category=arhitektura&id1=4

36. Архитектурное проектирование жилых зданий/ М.В.Лисициан, В.Л.Пашковский, Э.В.петунина и др.: Под ред. М.В.Лисициана, Е.С. пронина. – М.: Архитектура –С, 2006. – 488с.; ил.[Электронный ресурс] - http://books.totalarch.com/architectural_design_of_residential_buildings_2006

37. Чикота С.И. Архитектура: Учебник. – М.:Издательство Ассоциация строительных вузов, 2010. – 152 с. - [Электронный ресурс] - http://books.totalarch.com/n/3207.http://science.totalarch.com/book/3207.rar.

38. Архитектура. Краткий справочник/ Гл. ред. М.В. Адамчик: гл.научн.ред.В.В.Адамчик и др. – Мн.:Харвест, 2004. – 624 с. -[Электронный ресурс] -http://books.totalarch.com/n/0650, http://science.totalarch.com/book/0650.rar.

39. Виды и характеристики жилых зданий. [Электронный ресурс] - https://extxe.com/15365/vidy-i-harakteristiki-zhilyh-zdanij/.

40. Классификация жилых зданий. [Электронный ресурс] - http://www.avengineering.ru/services/project_bilding/apartment_building/class_home/.

41. Основные типы малоэтажных жилых зданий. [Электронный ресурс] -https://extxe.com/15550/sovremennye-tipy-zhilyh-zdanij/

4. АРХІТЕКТУРНО - КОНСТРУКТИВНІ ЕЛЕМЕНТИ БУДІВЕЛЬ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3D-ДРУКУ

4.1. Конструктивно – технологічні особливості створення будівельних об’єктів за технологією 3Д друку

Процес створення продукту будівельним 3D-принтером можна умовно поділити на наступні підпроцеси [2]:

1) Розробка проекту та створення 3D-моделі будівельного об’єкту [2]:

- Створення 3D-моделі будівлі за допомогою програм Autodesk Revit, ArchiCAD, SketchUp тощо;
- Експорт геометрії в формат STL (stereolithography) за допомогою вбудованих команд, онлайн-конвертерів або спеціальних програм. Файл STL містить опис моделі, який складається з набору координат трьох точок по трьох осях. Кожна група з трьох точок утворює полігон, з числа яких складається тривимірна модель (рис. 4.1);

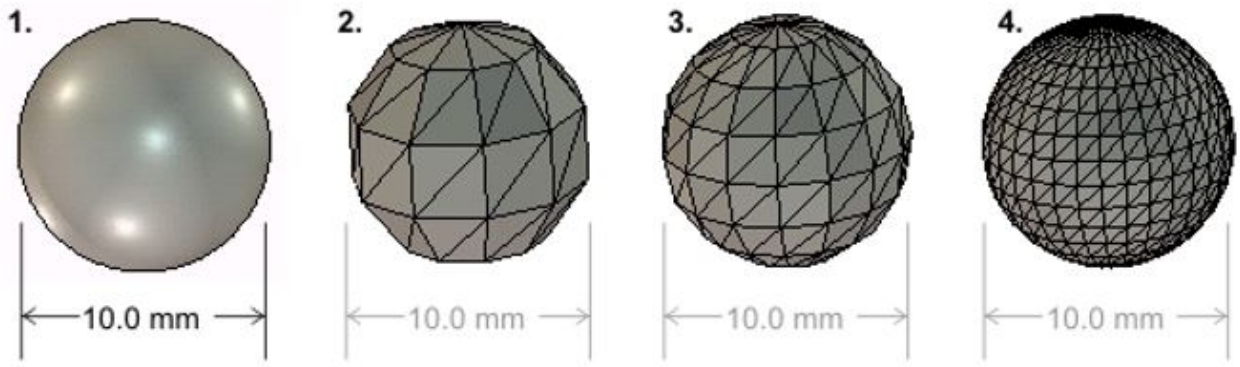


Рис. 4.1. Порівняння CAD та STL моделей

- Відкриття файлу STL у програмах - слайсерах (наприклад, CURA, POLYGON, Repetier-Host тощо), які обслуговують 3D-принтери. Основною функцією слайсера є розсічення твердого об’єкта на безліч шарів малої товщини і створення G-коду - мови програмування для пристроїв з

числовим програмним управлінням. В даному випадку він являє собою набір команд по створенню перетинів кожного шару в площині, перпендикулярній осі Z;

2) Передача G-коду на 3D-принтер;

3) Пошаровий друк тривимірної моделі будинку за допомогою 3D-принтера:

- Стандартні земляні роботи;
- Розмітка позицій 3D-принтера та кутових точок конструкцій;
- Монтаж 3D-обладнання на будівельному майданчику, установка в проектне положення, налаштування обладнання, підключення до бетононасосу та комунікацій, прив'язка до точки відліку;
- Завантаження 3D-моделі до бортового комп'ютера;
- Холостий хід 3D-принтера з метою сканування рельєфу поверхні;
- Вирівнювання поверхні за допомогою отриманої карти рельєфу, автоматичне заповнення нерівностей та заглибин сумішшю;
- Друк опалубки, встановлення арматури та закладних деталей фундаменту або ростверку за проектом;
- Автоматичне промивання сопла екструдера водою після закінчення процесу друку, заливка опалубки фундаменту важким бетоном;
- Друк несучих конструкцій стін, перекриттів та перегородок з встановленням арматури, перемичок за проектом;
- Влаштування антисейсмічних поясів;
- Очистка та демонтаж обладнання.

4) Влаштування покрівлі, монтаж дверей та вікон, інженерно-технічних комунікацій та обладнання, зовнішнє та внутрішнє оздоблення.

Особливості будівельних 3D-принтерів створюють широкі можливості щодо формоутворення та конфігурації будівельних конструкцій, шляхом варіювання:

• товщини стін, плит перекриття, перемичок та інших конструктивних елементів;

• товщини, висоти, матеріалу друкованого шару бетону;

• багатокамерної структури та форм поперечного перерізу.

Будівельний 3D-принтер здатний формувати стіни майбутньої будівлі криволінійної форми, з гострими і тупими кутами, закругленнями і вигинами будь-якого радіусу, що значно розширює спектр архітектурних рішень.

Фундаменти. Проектування фундаментів під несучі стіни, сформовані методом 3D-друку, слід виконувати відповідно до вимог нормативних документів щодо проектування основ і фундаментів будівель і споруд. Специфічних вимог до конструкції фундаментів при проектуванні будинків методом 3D-друку, не виявлено.

Стіни. При проектуванні будинків методом 3D-друку слід передбачати планувальні рішення з рівномірним і симетричним розташуванням елементів по відношенню до центральних осей. Не бажано приймати асиметричні схеми, що допускають виникнення крутильних зусиль. Будинки рекомендується проектувати з поздовжніми і поперечними несучими стінами. Стіни, що зводяться за допомогою будівельних 3D-принтерів можуть бути зовнішніми і внутрішніми, несучими, самонесучими і не несучими, однокамерними та багатокамерними. Пропоновані конструктивні рішення несучих стін для 3D-друку приведені на рис. 4.2.

На прикладі несучих стін представлені основні варіанти поперечних перерізів, які застосовуються для більшості конструкцій, виготовлених методом 3D-друку. Вони можуть відрізнятися шириною перерізу, товщиною бетонного шару, кількістю внутрішніх перегородок, теплоізоляційним матеріалом, наявністю звукоізоляційних матеріалів, наявністю гнучких зв’язків та повітряних включень, заповнених ізоляційними матеріалами або бетоном. Обов’язковою умою при визначенні товщини та структури стінової конструкції є її відповідність вимогам до несучої здатності та стійкості, а також умов тепло- і звукоізоляції.

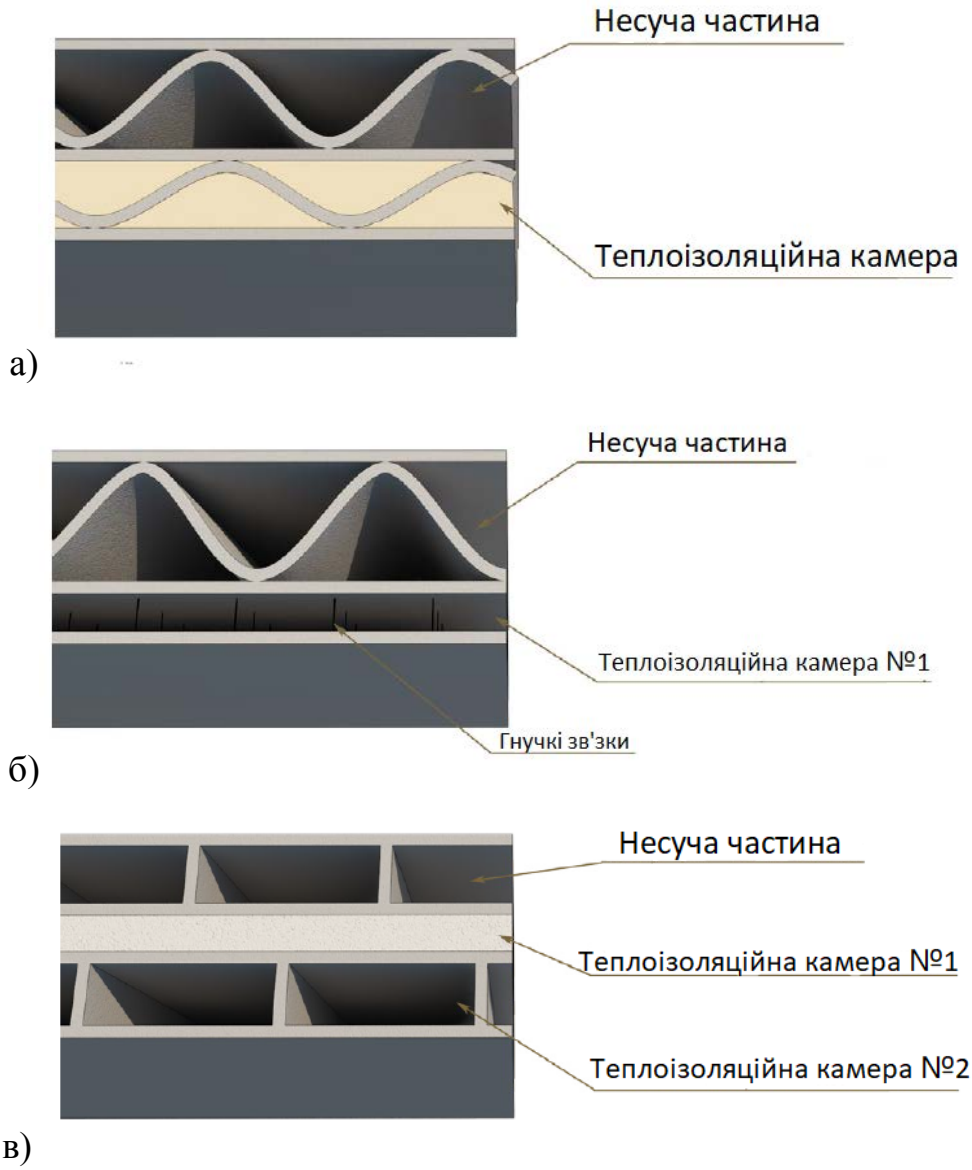


Рис. 4.2. Конструктивні рішення несучих стін для 3D-друку [2]:
а) несуча стіна з теплоізоляцією; б) несуча стіна з повітряним включенням та гнучкими зв’язками; в) несучої стіни з двома теплоізоляційними камерами

Для армування стінових конструкцій використовується як традиційна сталева, так і композитна арматура, з якої шляхом встановлення вертикальних та горизонтальних стержнів формується просторовий арматурний каркас (рис. 4.3). Окрім цього, в конструкціях за технологією 3D-друку широко використовується армування різними типами фіброволокна

(рис. 4.4). Порівняння характеристик різних видів фібро волокна для армування конструкцій за технологією 3D-друку наведено в табл. 4.1 [15, 16].

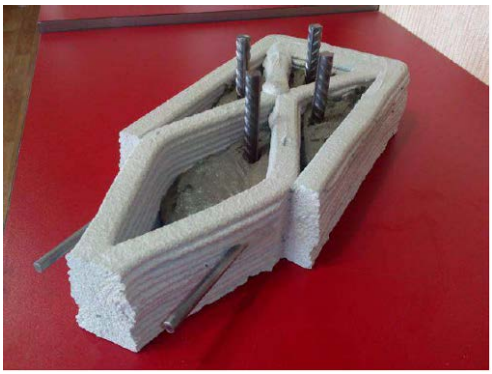


Рис. 4.3. Фрагмент конструкції за методом 3D-друку з вертикальним та горизонтальним армуванням сталевою арматурою [17]



Рис. 4.4. Різновиди фіброволокна для армування конструкцій

Таблиця 4.1

Порівняння характеристик різних видів фіброволокна для армування конструкцій за технологією 3D - друку

Фібра	Властивості					
	корозія	електро-статика	температура плавлення, ° С	густина, г/см^3	міцність на розрив, МПа	діаметр, мкм
Полі-пропіленова	ні	ні	170	0,91	150-600	20-50
Поліефірна	ні	ні	250	1,36	560	12-15
Базальтова	ні	ні	1450	2,8	120-650	13-20
Скляна	ні	ні	860	2,6	1500-3500	6-13
Металева	так	так	1550	7,8	600-1500	500-1200

Перекриття. Плити перекриття та покриття можуть бути збірними (традиційними або надрукованими за допомогою 3D-принтера), а також монолітними.

Глибина спирання збірних залізобетонних плит перекриття на несучі стіни повинна бути не менше 120 мм. Для з’єднання з антисейсмічним поясом в плитах перекриття слід передбачати випуски арматури. Для рівномірного перерозподілу навантаження на стіну спирання плит рекомендується виконувати через бетонну подушку товщиною 60 мм, яка при необхідності формується 3D-принтером за допомогою суцільного багаторядного нашарування бетону і армується між шарами сіткою з композитної арматури.

При влаштуванні монолітного перекриття в місцях сполучення зі стінами необхідно влаштовувати підкладки, перешкоджаючі потраплянню бетону в порожнину стін.

Покрівля. Покрівлі будівель слід проектувати з легких матеріалів та конструкцій. Несучі конструкції скатних покрівель повинні мати необхідну просторову жорсткість і виключати можливість передачі на стіни розпираючих зусиль, для чого рекомендується застосовувати безрозпірні конструкції. Допускається застосування плоских покрівель з внутрішнім і зовнішнім водостоком. При цьому основа покрівлі з необхідними ухилами для водостоків може бути виконана методом 3D-друку як окремий конструктивний елемент.

Віконні та дверні отвори. Опорні поверхні віконних і дверних отворів формуються 3D-принтером за допомогою суцільного багаторядного нашарування бетону на підкладку з композитної або металевої сітки. Для цього при формуванні 3D-моделі об’єкта необхідно додатково задати дані шари. Бічні грані отворів формуються в процесі друку чергового шару.

Перемички над віконними і дверними отворами рекомендується виконувати за допомогою 3D-принтера, проте можна використовувати готові залізобетонні перемички. Для друку готових залізобетонних перемичок необхідно заздалегідь задати в 3D-моделі об’єкта місця спирання перемичок, при цьому глибина спирання в отворах внутрішніх і зовнішніх стін повинна бути не менше 100 мм. Конструктивні параметри перемичок призначаються за результатами розрахунків, в залежності від розмірів отвору і діючих навантажень.

Інженерні комунікації. При проектуванні будівлі в 3D-моделі слід передбачати технологічні вертикальні ніші та отвори для монтажу водопроводу і каналізації, а в місцях їх горизонтального прокладання здійснювати монтаж по поверхні стін або перекриття. Електропроводка монтується в порожнинах камер стін. Для цього при формуванні 3D-моделі будівлі в останньому внутрішньому шарі повинні бути передбачені

технологічні канали та отвори для монтажу електропроводки. Для влаштування вентиляційних шахт рекомендується використовувати порожнини в структурі стінах.

Зовнішня і внутрішня обробка стін. Стінові конструкції повинні мати захист від зволоження в місцях інтенсивного впливу вологи і на горизонтальних ділянках (підвіконні зони, парапети, зони примикання до покриттів козирків, обпирання балконних плит і архітектурних елементів). Необроблену поверхню стін допускається фарбувати або обробляти гідрофобними розчинами. Експлуатація необробленої поверхні стін, але з просоченням гідрофобним розчином - допускається для будівель будь-якого призначення всіх ступенів довговічності. Допускається також оштукатурювання стін, фарбування по шару штукатурки, оштукатурювання і фарбування по шару утеплювача, влаштування облицювальної кладки або монтаж навісних фасадних систем. Облицювальна кладка і навісні фасадні системи можуть застосовуватися спільно з системами теплоізоляції з жорстких або напівжорстких мінеральних матеріалів. Також допускається використання полімерних теплоізоляційних матеріалів. Облицювальні кладки або навісні фасадні системи рекомендується влаштовувати з вентильованим зазором не менше 50 мм Допускається застосування облицювальної кладки без зазору.

Для *облицювання* стін застосовують керамічну, глиняну або силікатну цеглу, керамічні та бетонні плитки і плити з каменю. Кріплення облицювання до стін виконується за допомогою гнучких металевих або композитних зв’язків із заповненням вертикального шва цементним розчином.

Кріплення каркасів *навісних фасадних систем* допускається проводити по всій поверхні стін. Кронштейни є найбільш навантаженою частиною фасадної системи. Їх кількість визначається проектом залежно від архітектурних особливостей будівлі.

Необхідність, тип і товщина *теплоізоляції* визначається теплотехнічним розрахунком. Якщо застосовується кілька шарів

теплоізоляції, для виключення витрат тепла необхідно влаштовувати шви без перехрещень. Плити утеплювача фіксуються спеціальними полімерними дюбелями. З метою організації вільної циркуляції повітря, не допускається контактування облицювання з теплоізоляційним матеріалом або поверхнею стіни. Допустимий зазор 40 - 200 мм. При монтажі і кріпленні фасадних облицювань необхідно дотримуватися відповідних положень будівельних норм та технології виробника.

4.2. Дослідження напружено-деформованого стану тонкостінних несучих конструкцій за технологією 3D - друку

До аналізу прийнятий фрагмент зовнішньої несучої стіни розміром 300 х 1200 мм в плані, висотою 1 поверх (3 м) з одинарною перемичкою поміж зовнішніх шарів стіни (рис. 4.5).

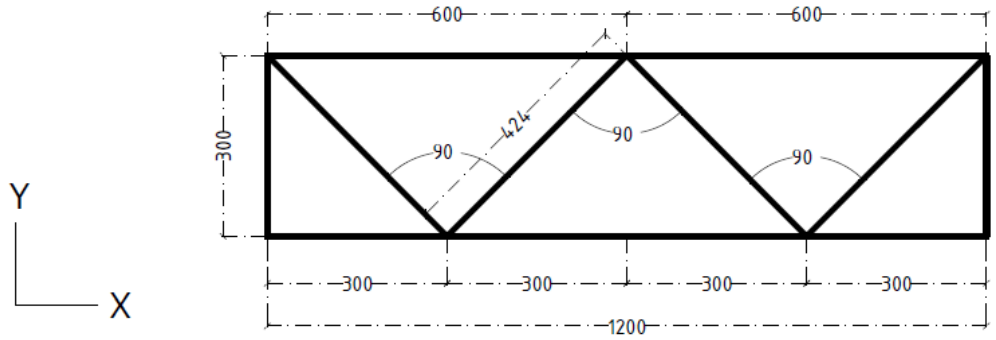


Рис. 4.5. Схема фрагменту зовнішньої несучої стіни

Конструктивний тип розрахункової моделі – балка-стінка. Балка-стінка знаходиться в плоскому напруженому стані. Розрахунковий модуль програмного забезпечення розраховує елемент залізобетонної балки-стінки на дію наступних силових факторів, обчислених в центрі елемента:

- нормальні напруження - Nx, Nz;
- дотичні напруження - τxz.

Моделювання виконувалось методом скінчених елементів в ПК Ліра-САПР 2013 R5 (некомерційна версія).

В розрахункову схему були включені наступні типи скінчених елементів:

1) тип 23 – універсальний прямокутний скінчений елемент (СЕ) плоскої задачі (балка-стінка) (рис. 4.6). Даний СЕ призначений для розрахунку на міцність пластин, навантажених у своїй площині (площина X_1OZ_1). За замовчуванням скінчений елемент дозволяє моделювати плоский напружений стан [10].

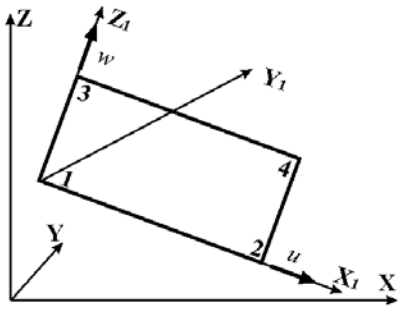


Рис. 4.6. Універсальний прямокутний скінчений елемент балки-стінки

На рис. 4.6 представлене схематичне зображення СЕ і послідовність нумерації його вузлів. Вузол кінцевого елемента має наступні ступені свободи: U – лінійне переміщення по осі X, W – лінійне переміщення по осі Z; V – лінійне переміщення по осі Y. Додатній напрямок переміщення збігається з напрямком осі. Скінчений елемент типу 23 може бути довільно розташований по відношенню до площин XOZ, YOZ, XOY загальної системи координат.

2) тип 42 – універсальний трикутний скінчений елемент оболонки (рис. 3.8). Даний СЕ призначений для розрахунку міцності тонких пологих оболонок (плит, балок-стінок). На рис. 4.7 представлені схематичне зображення СЕ і послідовність нумерації його вузлів [6].

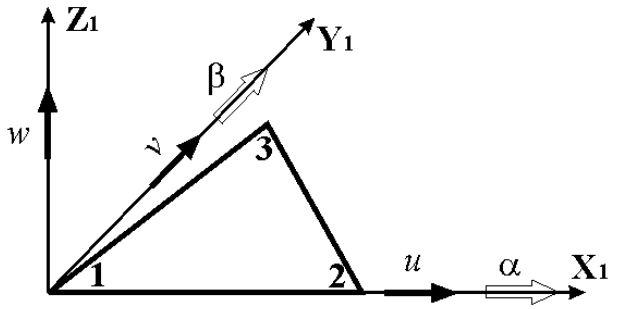


Рис. 4.7. Універсальний трикутний скінчений елемент оболонки

У кожному з вузлів СЕ є по шість ступенів свободи: U, V, W, UX, UY, UZ.

U – горизонтальне переміщення, позитивний напрямок якого збігається з напрямком X_1; V – горизонтальне переміщення, позитивний напрямок якого збігається з напрямком Y_1; W (ω) – вертикальне переміщення (прогин), позитивний напрямок якого збігається з напрямком осі Z_1; UX – кут повороту щодо осі X_1, позитивний напрямок якого протилежний напрямку обертання годинникової стрілки, якщо дивитися з кінця осі X_1; UY – кут повороту щодо осі Y_I, позитивний напрямок якого протилежний напрямку обертання годинникової стрілки, якщо дивитися з кінця осі Y_I; UZ – кут повороту щодо осі Z загальної системи координат.

Ступені свободи U, V відповідають мембранним, а W, UX, UY – деформаціям прогину. Кут повороту UZ не входить до числа вузлових параметрів, що визначають деформації елемента і в місцевій системі координат дорівнює нулю. Цей ступінь свободи з’являється при стикуванні елементів, які не лежать в одній площині, і необхідний для врахування просторової роботи конструкції.

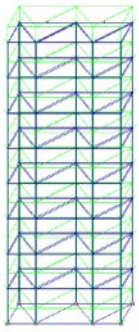


Рис. 4.8. Розрахункова схема фрагменту стіни

Характеристики жорсткості елементів схеми: Стіни – 4-х кутова пластина h=5 см, тип – балка-стінка, початковий модуль пружності для бетону С20/25 природного твердіння – 30×10^6 кН/м^2, коефіцієнт Пуассона – 0,2; питома вага ρ=21 кН/м^3, арматура А400С; плити – 3-х кутова пластина h=15 см, тип – оболонка, початковий модуль пружності для бетону С20/25 природного твердіння – 30×10^6 кН/м^2, коефіцієнт Пуассона – 0,2; питома вага ρ=21 кН/м^3, арматура А400С.

Всім опорним вузлам фрагменту стіни були задані обмеження на всі лінійні переміщення (X, Y, Z,) та всі кути повороту (UX, UY, UZ). Обмеження переміщень по верхньому контуру фрагменту стіни не задавалися.

При виборі розрахункових сполучень зусиль враховувалися навантаження від власної ваги елементів фрагменту стіни, перекриття, підлоги, корисне навантаження на перекриття, снігове навантаження на покриття та вітрове навантаження. До розрахункової моделі прикладалися приведені значення навантажень відповідно до архітектурного рішення будівлі, прийнятої до моделювання (розділ 4.4).

Для обчислення переміщень і зусиль (напружень) в елементах від стандартних і довільних лінійних комбінацій завантажень була застосована система РСН (розрахункові сполучення навантажень). Під стандартними лінійними комбінаціями маються на увазі комбінації, які встановлені нормативними документами ДБН В.1.2-2: 2006 [11]. Залежно від вибору нормативу змінюється набір відповідних формул обчислення комбінацій в процесорі Ліра-Сапр.

Умовна індексація та правила знаків зусиль в скінчених елементах розрахункової схеми є наступними:

СЕ Тип 23 – універсальний прямокутний СЕ плоскої задачі (балка-стінка). Кінцевий елемент сприймає такі види напруг і реакцій (рис. 4.6):

N_X – нормальне напруження уздовж осі X_1, позитивний знак відповідає розтягуванню;

N_Y – нормальне напруження уздовж осі Y_1 (для випадку плоскої деформації); позитивний знак відповідає розтягуванню;

N_Z – нормальне напруження уздовж осі Z_1, позитивний знак відповідає розтягуванню;

τ_{XZ} – дотичне напруження, позитивний знак відповідає подовженню діагоналі 1-4.

СЕ Тип 42 – універсальний трикутний СЕ оболонки. Скінчений елемент сприймає такі види зусиль, напруг і реакцій (рис. 4.7):

N_X – нормальне напруження уздовж осі X_1, позитивний знак відповідає розтягуванню;

N_Y – нормальне напруження уздовж осі Y_1, позитивний знак відповідає розтягуванню;

N_Z – нормальне напруження уздовж осі Z_1 (для випадку плоскої деформації), позитивний знак відповідає розтягуванню;

τ_{XY} – зсувне напруження, паралельно осі X_1 в площині, паралельної $X_1 0 Z_1$, за позитивний прийнято напрямок, що збігається з напрямком осі X_1, якщо N_Y збігається за напрямком з віссю Y_1.

M_X – момент, діючий на переріз, ортогональний осі X_1, позитивний знак відповідає розтягуванню нижнього волокна (відносно осі Z_1);

M_Y – момент, діючий на переріз, ортогональний осі Y_1, позитивний знак відповідає розтягуванню нижнього волокна (відносно осі Z_1).

M_{XY} – крутильний момент, позитивний знак відповідає кривизні медіани, що виходить з вузла 1, спрямованої опуклістю вниз (щодо осі Z_1).

Q_X – поперечна сила в перерізі, ортогональному осі X_1, позитивний знак відповідає збігу напрямку сили з напрямком осі Z_1 на тій частині елемента, в якій відсутній вузол 1.

Q_Y – поперечна сила в перерізі, ортогональному осі Y_1, позитивний знак відповідає збігу напрямку сили з напрямком осі Z_1 на тій частині елемента, в якій відсутній вузол 1.

Лінійні переміщення від найнесприятливішого розрахункового сполучення навантажень вздовж осей X, Y, Z мають вигляд (рис. 4.9 - 4.11).

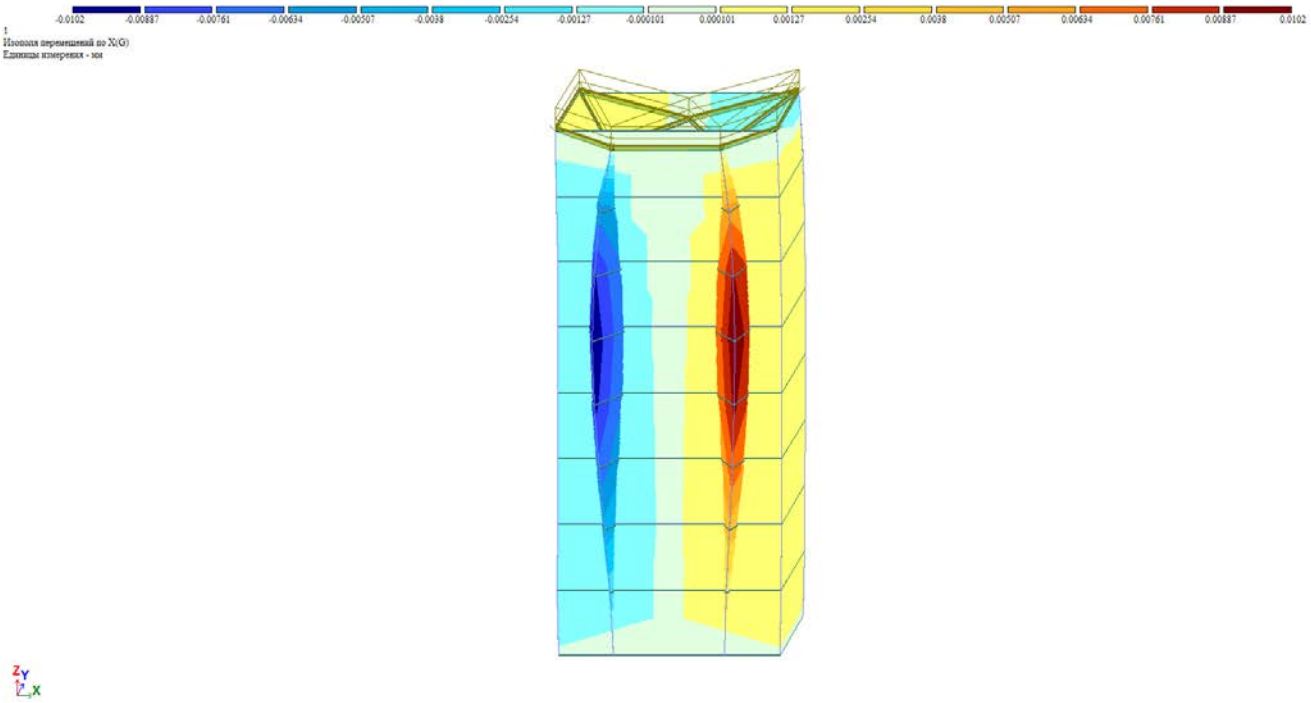


Рис. 4.9. Лінійні переміщення від найнесприятливішого РСН по осі X

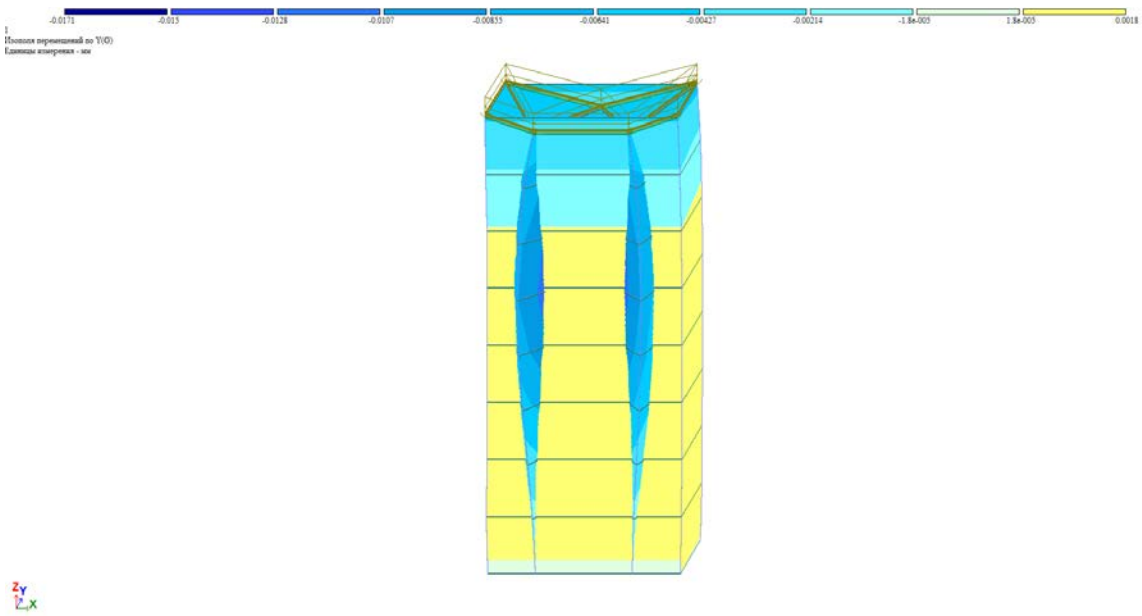


Рис. 4.10. Лінійні переміщення від найнесприятливішого РСН по осі Y

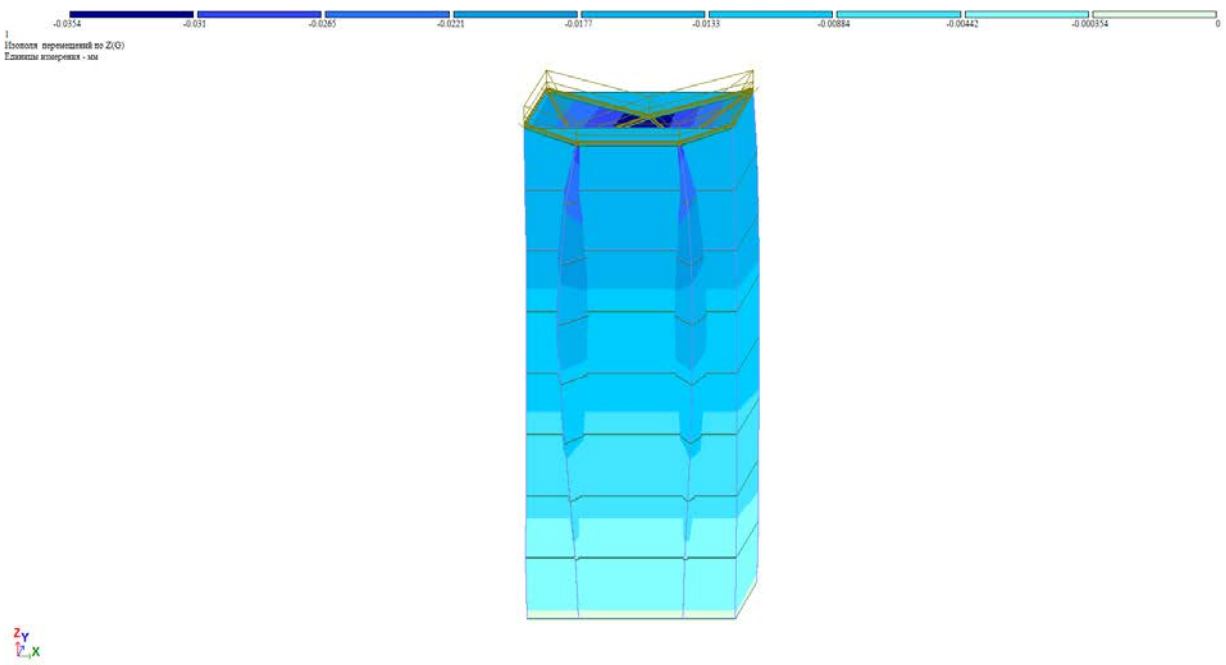


Рис. 4.11. Лінійні переміщення від найнесприятливішого РСН по осі Z

Величини максимального лінійного переміщення вузлів від найнесприятливішого РСН приведені у таблиці 4.2, а місця знаходження вузлів на рис. 4.12.

Таблиця 4.2

Величини максимального лінійного переміщення від найнесприятливішого РСН вздовж осей глобальної системи координат, мм

Елемент, №	Ось X	Ось Y	Ось Z
15, 40	-0.010	-0.008	-0.015
38	0	-0.017	-0.016
43	0	-0.005	-0.035

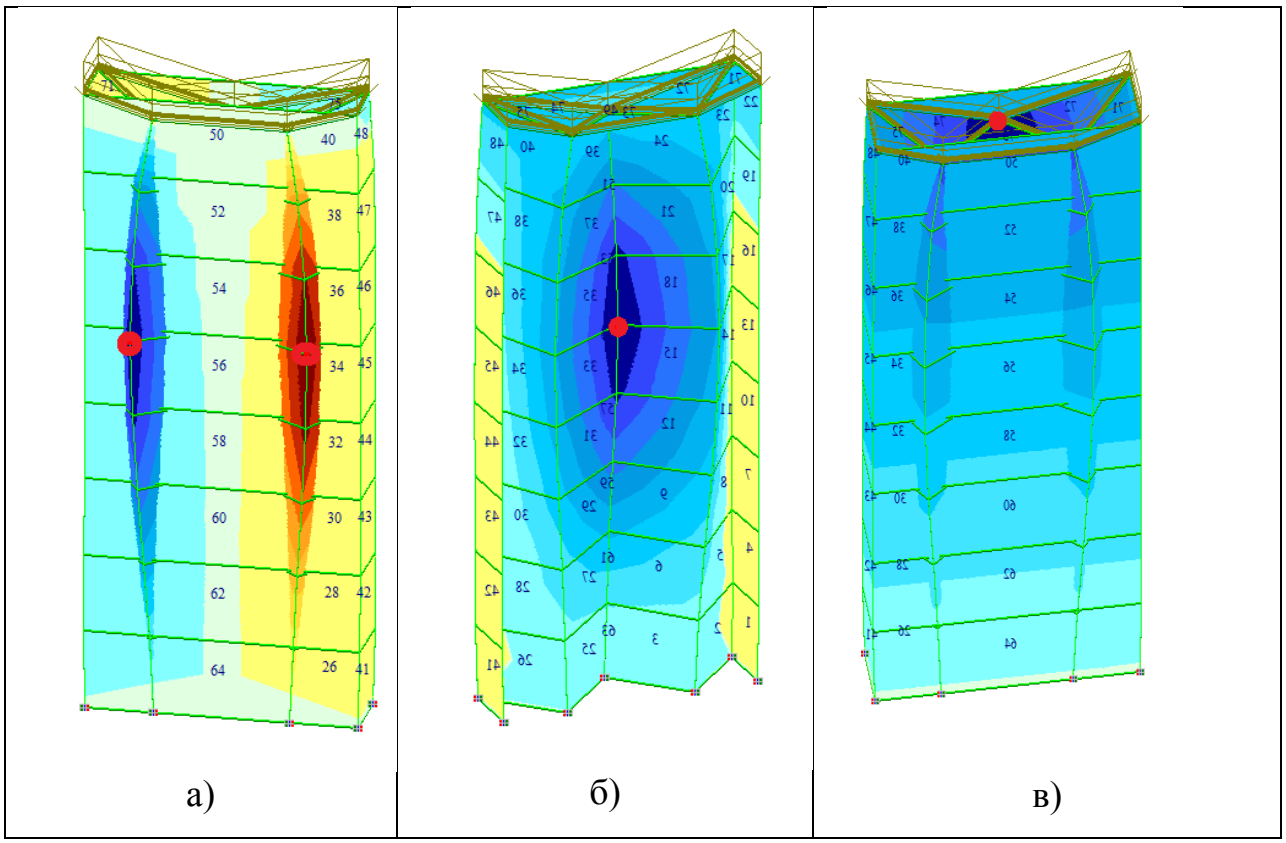


Рис. 4.12. Вузли з максимальними лінійними переміщеннями вздовж глобальної системи координат: а) X, б) Y, в) Z

Найбільші переміщення виникають у вузлах, що розташовані у площині внутрішньої зигзагоподібної перемички стіни.

На рис. 4.13 - 4.15 приведені значення нормальних напружень від найнесприятливішого розрахункового сполучення навантажень.

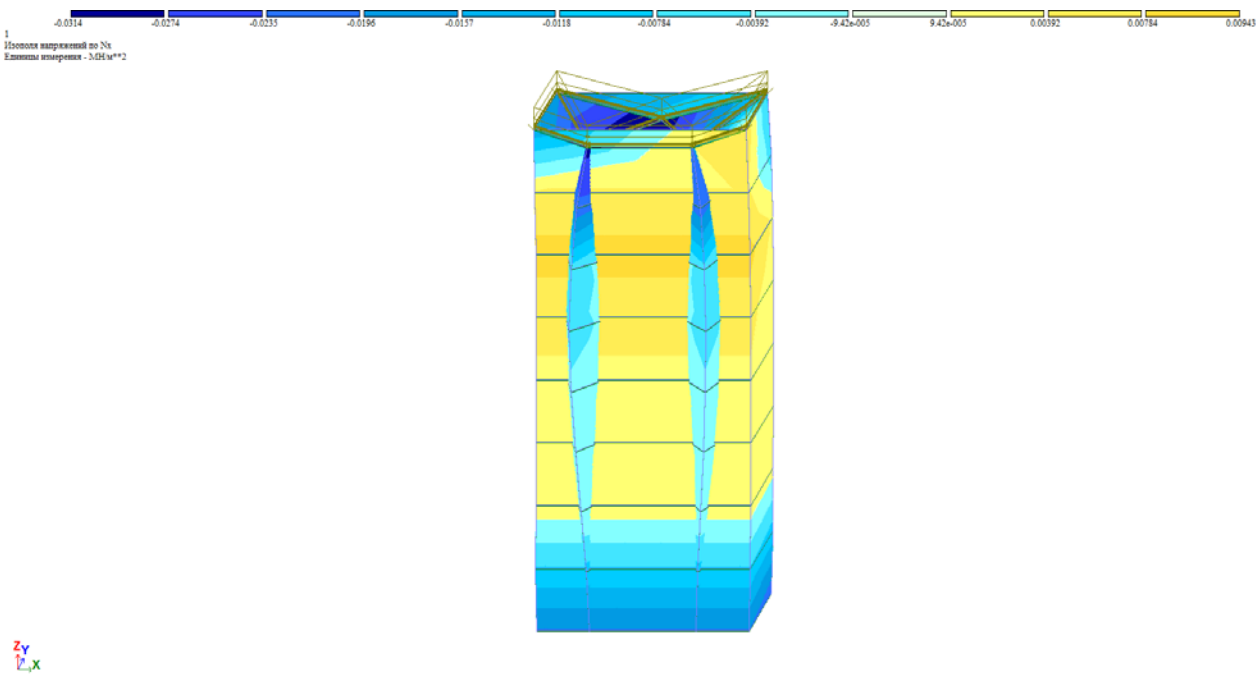


Рис. 4.13. Ізополя нормальних напружень вздовж осі X

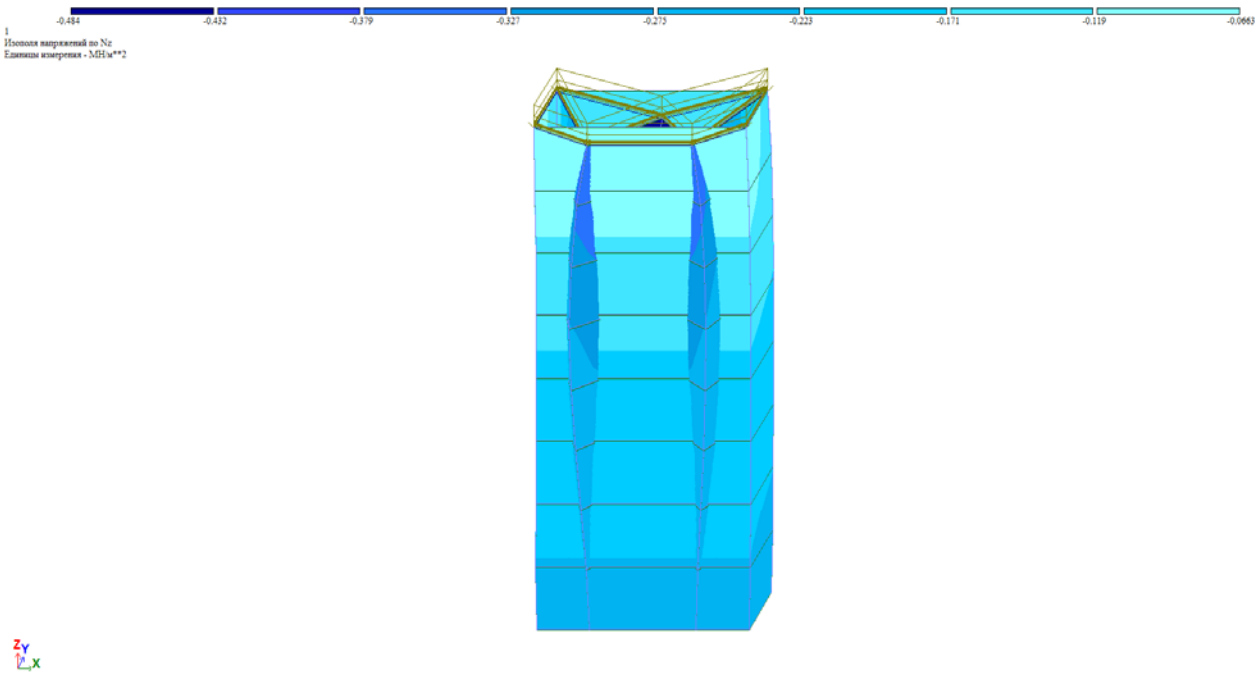


Рис. 4.14. Ізополя нормальних напружень вздовж осі Z

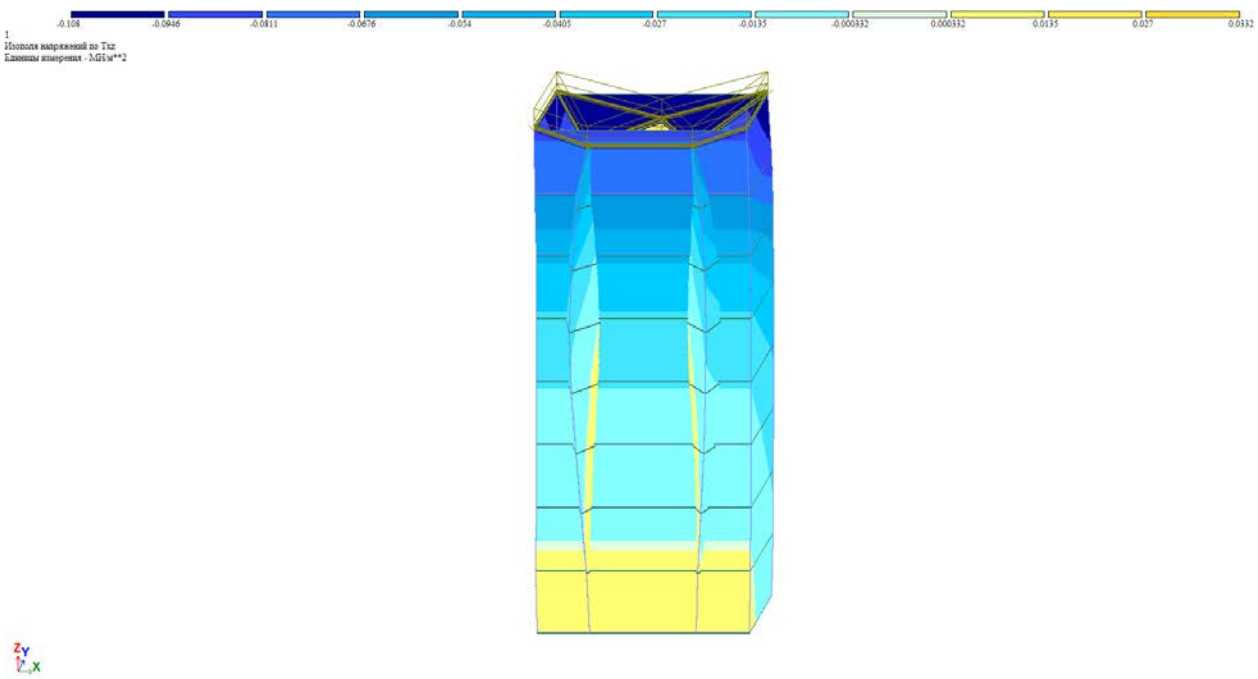


Рис. 4.15. Ізополя дотичних напружень в площині X0Z

Таблиця 4.3

Величини максимальних нормальних та дотичних напружень від найнесприятливішого РСН вздовж осей місцевої системи координат, МПа

Елемент, №	N_X	N_Z	τ_{XZ}
24,39	-0,046	-0,484	0,033

Проаналізувавши мозаїку зусиль від найнесприятливішого РСН, які виникають в елементах, можна зробити висновок, що найбільші дотичні напруження виникають у верхньому поясі внутрішньої зигзагоподібної перемички стіни. Від найнесприятливішого розрахункового сполучення навантажень по осі Z виникають нормальні напруження величиною 0,484 МПа, що значно менше за величину експериментально визначеної міцності бетону на стиск.

Граничні переміщення в горизонтальній площині для фрагменту стіни становить $f_u = h/150 = 3000/150 = 20$ мм (h – висота фрагменту стіни).

Максимальне розрахункове горизонтальне переміщення вздовж осі Y *f*=0.0171 мм.

Проаналізувавши отримані дані щодо напруженнь та деформацій, можна зробити висновок, що фрагмент стінової конструкції задовольняє вимогам до міцності та стійкості.

4.3. Теплотехнічні характеристики огороджувальної конструкцій за технологією 3D-друку

4.3.1. Основні теплотехнічні показники огороджувальних конструкцій, виконаних 3D принтером

З усіх елементів будівлі зовнішні огороджувальні конструкції мають найбільші потенційні можливості для зменшення споживання теплової енергії.

Інтенсивність теплового потоку, що проходить через дах, стіни або підлогу, залежить від так званого коефіцієнта теплопередачі (U) огороджувальної конструкції.

Основні теплотехнічні показники огороджувальної конструкцій, які впливають на теплоізоляційні властивості будівлі [12, 13]:

- термічний опір однорідної огороджувальної конструкції $R_к$, м² ×°С/Вт;

- опір теплопередачі R_0, м² ×°С/Вт;

- коефіцієнт теплопередачі $U=1/R_0$, Вт/ м² ×°С;

- коефіцієнт теплопровідності матеріалу однорідної частини огороджувальної конструкції λ, Вт/(м×°С).

Додаткові фізико-технічні параметри огороджувальної конструкції, які впливають на її теплозахисні властивості:

- наявність теплопровідних включень в огороджувальній конструкції (маса, щільність, об'єм, геометрія розташування), що захищає;

- щільність будівельного матеріалу (однорідної частині), з якого виконані огороджувальні конструкції, кг/м^3;

- пористість будівельного матеріалу, з якого виконані огороджувальні конструкції, яка викликає проблеми пов'язані з поздовжньою фільтрацією повітря і режимом вологості конструкцій.

Огороджувальна конструкція будівлі повинна відповідати наступним вимогам: приведений опір теплопередачі конструкцій має бути не менше нормованого значення, температура на внутрішній поверхні будь-якої конструкції має бути не нижча мінімально допустимого значення (санітарно - гігієнічна вимога). Вимоги теплового захисту будівлі виконуються при одночасному виконанні обох вказаних вимог.

Термічний опір однорідної огороджувальної конструкції $R_к$ м²×°С/Вт – це відношення різниці температур внутрішньої і зовнішньої поверхонь однорідної огороджувальної конструкції, до щільності теплового потоку через конструкцію в умовах стаціонарної теплопередачі, визначається за формулою

$$R_к = \frac{\tau_в - \tau_н}{q}, \qquad (4.1)$$

де $\tau_в$, $\tau_н$ - температура внутрішньої і зовнішньої поверхонь огороджувальної конструкції, °С;

q - щільність теплового потоку через огороджувальної конструкцію, Вт/м^2.

Опір теплопередачі однорідної огороджувальної конструкції $R_о$, м²×°С/Вт відношення різниці температур довкілля по обидві сторони однорідної огороджувальної конструкції, до щільності теплового потоку через конструкцію в умовах стаціонарної теплопередачі, визначається за формулою:

$$R_o = \frac{t_в - t_н}{q}, \qquad (4.2)$$

де: $t_в$, $t_н$ - температура довкілля по обидві сторони огороджувальної конструкції, °С.

Приведений опір теплопередачі неоднорідної огороджувальної конструкції $R_{\Sigma пр}$, визначається за формулою:

$$R_{\Sigma np} = \frac{\Sigma F_i}{\Sigma (F_i / R_{0i})}, \qquad (4.3)$$

де: *Fi*- площа *i*-ої однорідної зони огороджувальної конструкції;

R_{0i} - опір теплопередачі *i*-ої однорідної зони огороджувальної конструкції, яке визначається за формулою (4.2).

Для зовнішніх огороджувальних конструкцій і внутрішніх конструкцій, які відокремлюють приміщення, з температурою повітря, яке відрізняється на 3°С, перевіряється виконання умов згідно [14]:

$$R_{\Sigma пр} \geq R_{q\,min}, \qquad (4.4)$$

$$\Delta t_{пр} \leq \Delta t_{ст}, \qquad (4.5)$$

де: $R_{\Sigma пр}$ - приведений опір теплопередачі непрозорої огороджувальної конструкції або частини огороджувальної конструкції (для термічно однорідної конструкції - опір теплопередачі), приведений опір теплопередачі світлопрозорих захисної конструкції, $м^2 \cdot °С/Вт$;

R_{qmin} - мінімально допустиме значення опору теплопередачі непрозорої огороджувальної конструкції або частини огороджувальної конструкції, мінімальне значення світлопрозорої огороджувальної конструкції, $м^2 \times °С /Вт$;

$\Delta t_{пр}$ - температурний перепад між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огороджувальної конструкції,ºС;

$\Delta t_{сг}$ - допустима за санітарно-гігієнічним вимогам різниця температур внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огороджувальної конструкції, ºС.

Мінімально допустиме значення R_{qmin} опору теплопередачі непрозорих огороджувальних конструкцій в залежності від температурної зони експлуатації [13]:

- зовнішні стіни – $R_{q\,min}$ = 3,3 м^2×ºС/Вт;
- покриття та перекриття неопалюваних горищ – $R_{q\,min}$ = 4,95 м^2×ºС/Вт;
- перекриття над неопалюваними підвалами – $R_{q\,min}$ = 3,75 м^2×ºС/Вт.

Для внутрішніх огороджувальних конструкцій, які відокремлюють приміщення з температурою повітря, що відрізняється на 3ºС, $R_{q\ min}$ визначається за формулою:

$$R_{q\,min} = \frac{t_{b1} - t_{b2}}{\Delta t_{c2}\alpha_{b1}}, \qquad (4.6)$$

де $t_{в1}$, $t_{в2}$ – розрахункова температура повітря в приміщеннях °С, яка приймається згідно [2];

$\Delta t_{сг}$ – допустима за санітарно-гігієнічним вимогам різниця температур між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огороджувальної конструкції, °С за таблицею 3 [13] ;

$\alpha_{в1}$ – коефіцієнт тепловіддачі внутрішньої поверхні конструкції, Вт/(м^2·ºС) згідно з [13].

Для розглянутої будівлі (розділ 4.4) значення $\Delta t_{сг}$ наступні: стіни зовнішні і внутрішні – $\Delta t_{сг} = 4°C$, покриття та перекриття горища – $\Delta t_{сг} = 3°C$, перекриття над підвалом – $\Delta t_{сг} = 2°C$.

Згідно з [13] опір теплопередачі термічно однорідної непрозорої огороджувальної конструкції розраховується згідно:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{i=1}^{n} R_i + \frac{1}{\alpha_З} = \frac{1}{\alpha_B} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_З}, \qquad (4.7)$$

де $\alpha_в$, $\alpha_з$ – коефіцієнти тепловіддачі внутрішньої і зовнішньої поверхні огороджувальної конструкції, м^2×^{o}С /Вт за [13];

– для зовнішніх стін, перекриттів горищ і холодного підвалу - $\alpha_в$ = 8,7 Вт/(м^2×^{o}С);

–для вікон, балконних дверей - $\alpha_в$ = 8,0 Вт/(м^2×^{o}С);

–для зовнішніх стін, покриттів, вікон - αз = 23 Вт/(м^2×^{o}С);

–для перекриттів горищ і холодного підвалу - αз = 12 Вт/(м^2×^{o}С).

R_i – термічний опір і - го шару конструкції, (м^2×^{o}С)/Вт;

λ_{ip} - теплопровідність і - го шару конструкції, в розрахункових умовах експлуатації, Вт/(м×^{o}С).

При цьому вважається, що щільність теплового потоку q_1 (Вт / м^2) постійна по всій поверхні конструкції. Коли в складі конструкції з'являються неоднорідні включення, щільність теплового потоку в місцях цих включень змінюється q_2 (Вт/м^2), що впливає на опір теплопередачі конструкції (рис. 4.16).

Теплопровідні включення класифікують по розмірності їх проекції на поверхню конструкції і при розрахунках виділяють точкові, лінійні і плоскі елементи. Оцінювати питомі втрати теплоти через різні елементи пропонується шляхом порівняння теплового потоку, що проходить через

умовну конструкцію без теплопровідного включення і теплового потоку з теплопровідним включенням.

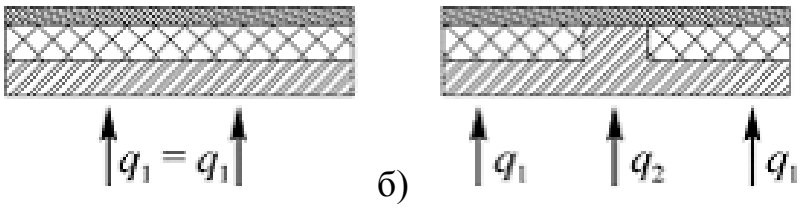


Рис. 4.16. Приклади огороджувальних конструкцій:
а - багатошарова однорідна; б - багатошарова з теплопроводним включенням

Приведений опір теплопередачі фрагмента огороджувальної конструкції будівлі $R_{\Sigma пр}$, м^2×·°С/Вт, визначається за формулою:

$$R_{\Sigma np} = \frac{1}{1/R_0^{ocp} + \Sigma l_j \psi_j + \Sigma n_k \chi_k} = \frac{1}{\Sigma a_i U_i + \Sigma l_j \psi_j + \Sigma n_k \chi_k} \qquad (4.8)$$

де: R_0^{ocp} - усереднене по площі опір теплопередачі фрагмента теплозахисної оболонки будівлі або виділеної огороджувальної конструкції (м^2× °С)/Вт;

l_j - протяжність лінійної неоднорідності *j*-го виду, яка припадає на 1 м^2 фрагмента теплозахисної оболонки будівлі або виділеної огороджувальної конструкції, м/м^2;

ψ_j - питомі втрати теплоти через лінійну неоднорідність *j*-го виду, Вт/(м×°С);

n_k - кількість точкових неоднородностей *k*-го виду, що припадають на 1 м^2 фрагмента теплозахисної оболонки будівлі або виділеної огороджувальної конструкції, шт./м^2;

χ_k - питомі втрати теплоти через точкову неоднорідність *k*-го виду, Вт/°С;

a_i - площа плоского елемента конструкції *i*-го виду, яка припадає на 1 м^2 фрагмента теплозахисної оболонки будівлі або виділеної огороджувальної конструкції, м^2/м^2;

U_i - коефіцієнт теплопередачі однорідної *i*-ої частини фрагмента теплозахисної оболонки будівлі (питомі втрати теплоти через плоский елемент *i*-го виду), Вт/(м^2× °С).

Всі будівельні матеріали являють собою капілярно-пористі тіла, де структурні елементи твердої речовини поділяють повітряний простір на більш-менш ізольовані частини. Чим менше ці ізольовані частини повітря, тим менше перенесення тепла за рахунок конвективних потоків і тим менше теплопровідність. Теплопровідність, в свою чергу, залежить від вологості матеріалу температури його застосування. Всі будівельні матеріали мають капіляри і пори, які містять вологу. Будівельні матеріали містять пори різних типів і форми, що ілюструється на рис. 4.17, діаметром від 3мм до 10 мм. Вода може існувати в порах в трьох станах: твердому (лід), рідкому (вода) і газоподібному (пара). Волога може мігрувати різними способами, такими як дифузія пара, переміщення рідини і фазовими змінами внаслідок випаровування-конденсації і замерзання-плавлення.

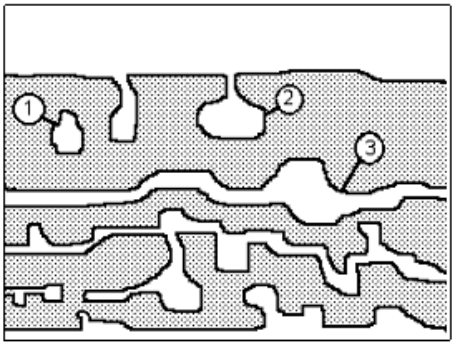


Рис. 4.17. Різні типи і конфігурації пор будівельних матеріалів:
1 - закриті пори; 2 - тупікові пори; 3 - протяжні пори - канали

При експлуатації будівель в зимовий період необхідно знати вологість, яку матимуть огороджувальні конструкції. Сорбційне зволоження є одним з основних вологісних показників будівельних матеріалів, яке характеризується ізотермами сорбції та десорбції водяної пари будівельними матеріалами. Методи визначення цих ізотерм були розроблені в фізичної хімії та потім перенесені для дослідження властивостей будівельних матеріалів.

Розрахунок приведеного опору теплопередачі фрагмента теплозахисної оболонки будівлі або будь-якої окремої захисної конструкції заснований на поданні обраного фрагмента у вигляді набору незалежних елементів, кожен з яких впливає на теплові втрати через фрагмент. Питомі втрати теплоти, обумовлені кожним елементом, знаходяться на основі порівняння потоку теплоти через вузол, що містить елемент, і через той же вузол, але без досліджуваного елемента. З огляду на те, що конструкція стіни може мати безліч шарів і складну геометрію їх розподілу, поперечний переріз такої стіни буде відрізнятися уздовж всієї протяжності стіни. Передбачається розбиття таких конструкцій на кілька простих елементів, де геометрія буде набагато простіша. Місця на стиках декількох різних матеріалів, криволінійні стики слід розбивати на прості елементи і розраховувати кожен з них.

4.3.2. Моделювання теплозахисних властивостей стінової конструкції, виготовленої методом 3D-друку

Для моделювання теплозахисних властивостей стінової конструкції, виготовленої методом 3D-друку, було прийнято фрагмент згідно схеми на рис. 4.18. Моделювання виконувалось в програмному комплексі ELCUT 6.3.1.2049 (некомерційна версія), який дозволяє отримувати ізополя розподілу температур та теплових потоків термічно неоднорідної конструкції.

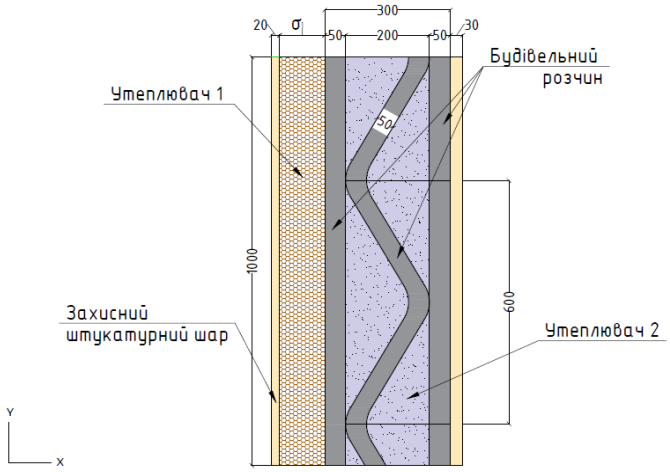


Рис. 4.18. Розташування шарів зовнішньої огороджувальної конструкції

Згідно ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель» [13]: розрахункова температура зовнішнього повітря складає -19 °С; розрахункове значення температури повітря житлового приміщення складає +20 °С.

Для моделювання було прийнято 3 варіанти огороджувальної конструкції забезпечення нормативних теплозахисних властивостей за технологією 3D-друку та четвертий варіант – традиційна конструкція цегляної стіни товщиною 380 мм. Склад та характеристики прийнятих варіантів приведені в табл. 4.4.

В результаті розрахунку моделей за прийнятими варіантами були отримані схеми розподілу температури в конструкції (рис. 4.19 – рис. 4.22). Окрім цього для кожного варіанту розрахунковим шляхом було визначено опір теплопередачі, середню густину теплового потоку та величину максимального теплового потоку. Для орієнтовної оцінки економічної ефективності для кожного зі змодельованих варіантів визначена собівартість теплоізоляційного матеріалу. Отримані результати приведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.4

Варіанти огороджувальних конструкцій, прийняті для моделювання теплозахисних властивостей

Варіант 1	1. Захисний штукатурний шар: ρ_0=1800кг/м^3, λ=0,58Вт/(м·К), C_0=0,84кДж/(кг·К); 2. Розчин будівельний конструкційний: ρ_0=1700кг/м^3, λ=0,52Вт/(м·К), C_0=0,84кДж/(кг·К); 3. Целюлозний утеплювач: ρ_0=35кг/м^3, λ=0,039Вт/(м·К), C_0=0,84кДж/(кг·К); 4. Солом'яні теплоізоляційні блоки: ρ_0=250 кг/м^3, λ=0,12 Вт/(м·К), C_0=2,3 кДж/(кг·К), σ=350мм.
Варіант 2	1. Захисний штукатурний шар: ρ_0=1800 кг/м^3, λ=0,58 Вт/(м·К), C_0=0,84кДж/(кг·К); 2. Розчин будівельний конструкційний: ρ_0=1700кг/м^3, λ=0,52Вт/(м·К), C_0=0,84кДж/(кг·К); 3. Повітряний прошарокρ_0=1,2041 кг/м^3, λ=0,026 Вт/(м·К), C_0=1 кДж/(кг·К). Характеристики повітря взяті для t = 20 °С [59]; 4. Солом'яні теплоізоляційні блоки: ρ_0=250 кг/м^3, λ=0,12 Вт/(м·К), C_0=2,3 кДж/(кг·К), σ=350мм.
Варіант 3	1. Захисний штукатурний шар: ρ_0=1800 кг/м^3, λ=0,58 Вт/(м·К), C_0=0,84 кДж/(кг·К); 2. Розчин будівельний конструкційний: ρ_0=1700кг/м^3, λ=0,52Вт/(м·К), C_0=0,84кДж/(кг·К); 3. Повітряний прошарокρ_0=1,2041 кг/м^3, λ=0,026 Вт/(м·К), C_0=1 кДж/(кг·К). Характеристики повітря взяті для t = 20 °С [59]; 4. Плити теплоізоляційні очеретяні: ρ_0=300кг/м^3, λ=0,06Вт/(м·К), С=2,3кДж/(кг·К), σ=350мм.
Варіант 4 (цегляна стіна товщиною 380 мм)	1. Захисний штукатурний шар: ρ_0=1800 кг/м^3, λ=0,58 Вт/(м·К), C_0=0,84 кДж/(кг·К), σ=20мм; 2. Цегла керамічна порожниста на цементно-піщаному розчині : ρ_0=1400кг/м^3, λ=0,47Вт/(м·К), C_0=0,14 кДж/(кг·К), σ=380мм; 3. Солом'яні теплоізоляційні блоки: ρ_0=250 кг/м^3, λ=0,12 Вт/(м·К), C_0=2,3 кДж/(кг·К), σ=350мм. 4. Захисний штукатурний шар: ρ_0=1800 кг/м^3, λ=0,58 Вт/(м·К), C_0=0,84 кДж/(кг·К), σ=50мм.

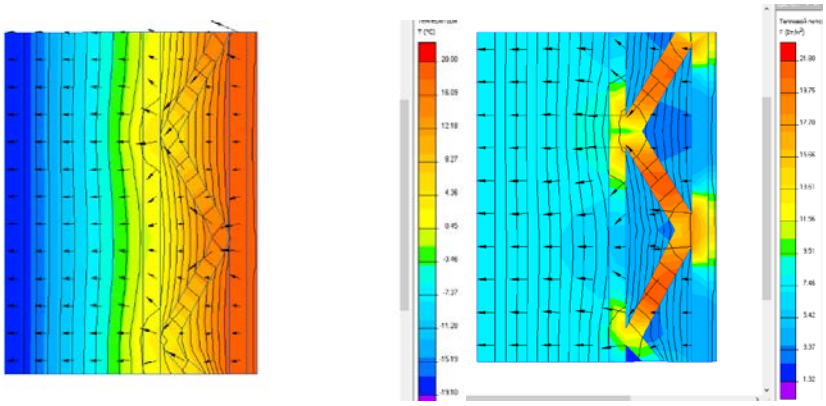


Рис. 4.19. Схема розподілу температур та теплових потоків серед шарів конструкції №1

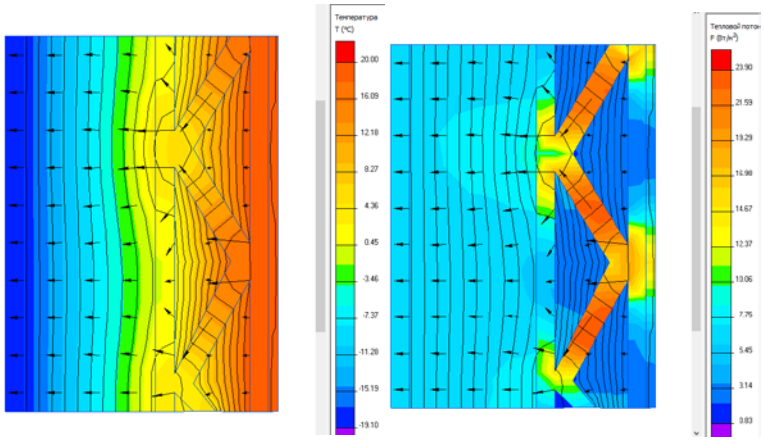


Рис. 4.20. Схема розподілу температур та теплових потоків серед шарів конструкції №2

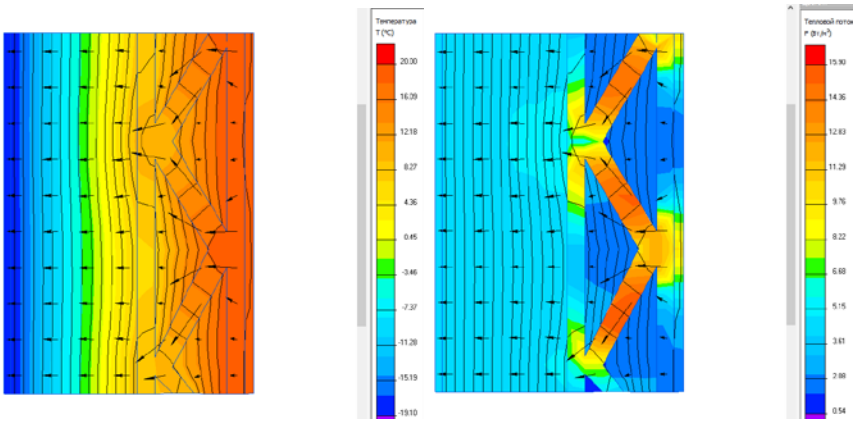


Рис. 4.21. Схема розподілу температур та теплових потоків серед шарів конструкції №3

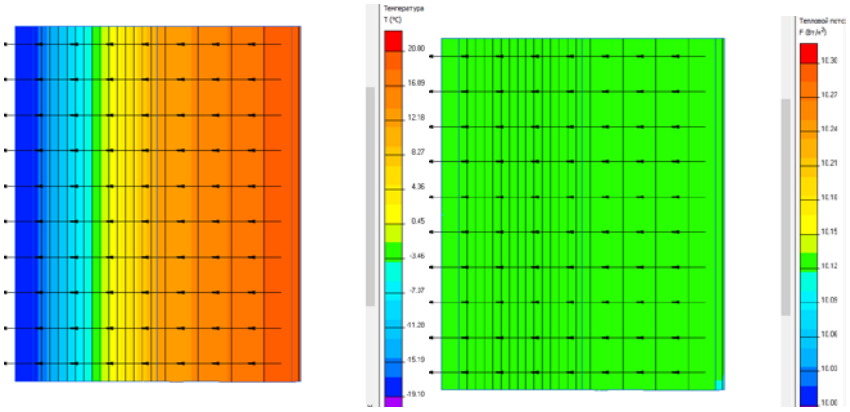


Рис. 4.22. Схема розподілу температур та теплових потоків серед шарів конструкції №4

Таблиця 4.5.

Порівняння характеристик теплоізоляційних матеріалів

Варіант	Характеристики			
	Опір теплопередачі $R_{\Sigma пр}$, $м^2К/Вт$	Середня густина теплового потоку q, $Вт/м^2$	Максимальний тепловий потік F, $Вт/м^2$	Собівартість теплоізоляційного матеріалу, $грн/м^3$
1	5,35	7,5161	21,8	700 - солом’яні блоки 560 - целюлозний утеплювач
2	5,71	7,0237	23,9	700 - солом’яні блоки
3	8,58	4,6339	15,9	2400 - плити очеретяні
4	4	10,118	10,118	700 - солом’яні блоки

Результати аналізу стінових конструкцій показали, що целюлозний утеплювач у пустотах не виявив значного впливу на приведений опір теплопередачі конструкції. З огляду на це більш оптимальним варіантом є

конструкція з пустотами без теплоізоляційного матеріалу. Щодо зовнішнього утеплення – очеретяні плити за рівнем теплоізоляційних властивостей на 33% краще ніж солом'яні блоки. Обидва матеріали відповідають вимогам енергоефективності та екологічності.

Теплотехнічні характеристики стінових конструкцій за методом 3D-друку перевищують традиційні цегляні стіни.

4.4. Моделювання напружено-деформованого стану несучих конструкцій малоповерхової будівлі за технологією 3D - друку

Для проведення моделювання прийнята двоповерхова будівля, що зводиться за технологією 3D - друку. Фасади, плани першого та другого поверхів будівлі приведено на рис. 4.23, рис. 4.24.

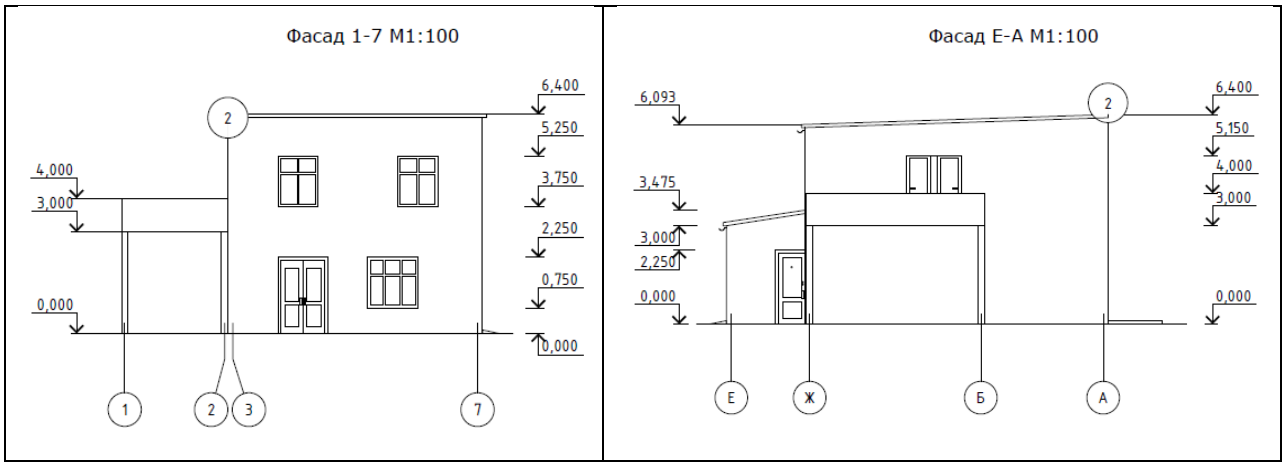


Рис. 4.23. Фасади будівлі.

Стінові конструкції прийняті такими, що виготовляються методом 3D-друку, з конструктивною схемою, проаналізованою в розділі 4.3. Плити перекриття і покриття, балки, колони, перемички виконуються монолітними за традиційною технологією будівництва. Для моделювання конструктивних елементів будівлі прийняті наступні параметри: стіни – 4-х кутова пластина (зовнішні – h=5 см, внутрішні – h=3 см; плити – 3-х кутова пластина h=15 см;

балки – брус h=15 см, b=30 см; колони – h=30 см, b=30 см; перемички h=18 см, b=30 см та h=18 см, b=17,5 см. Характеристики бетону прийняті згідно отриманих результатів експериментальних досліджень (розділ 2.2).

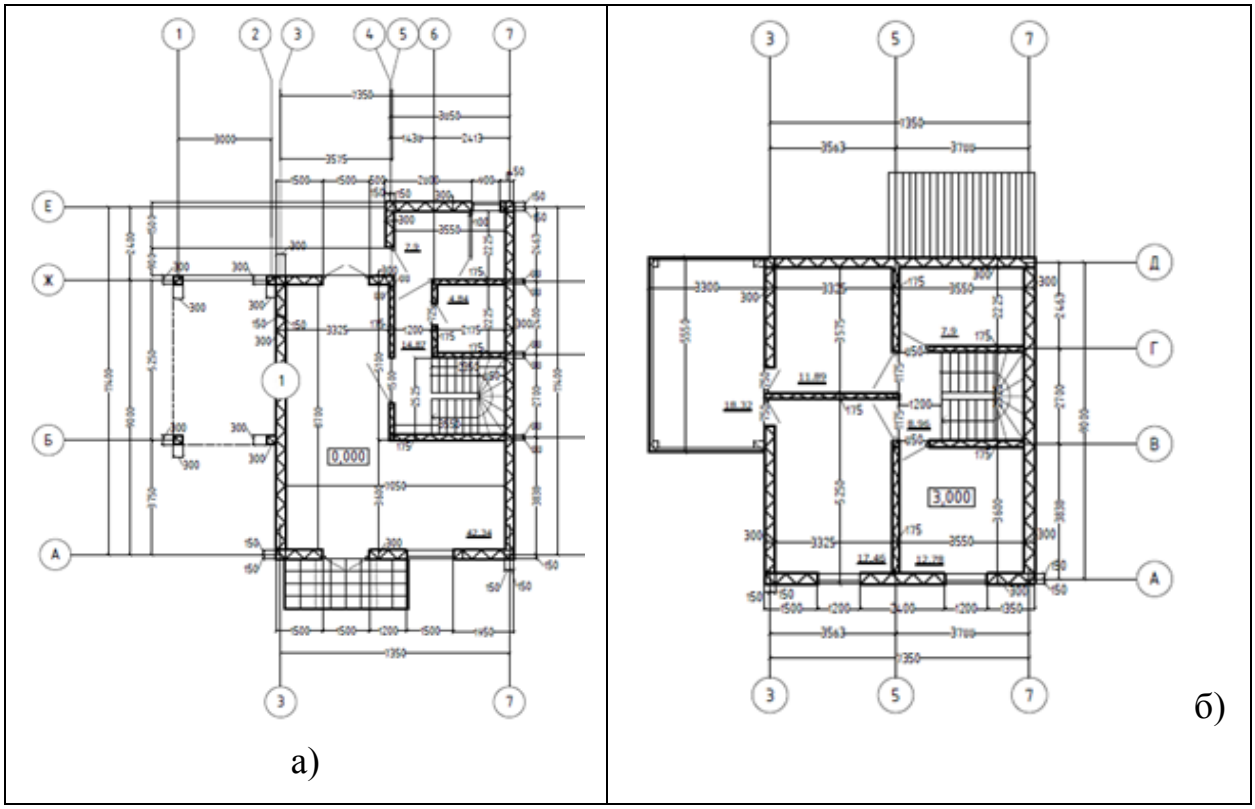


Рис. 4.24. Плани поверхів будівлі: а) першого, б) другого.

Тривимірна скінченноелементна модель будівлі приведена на рис. 4.25.

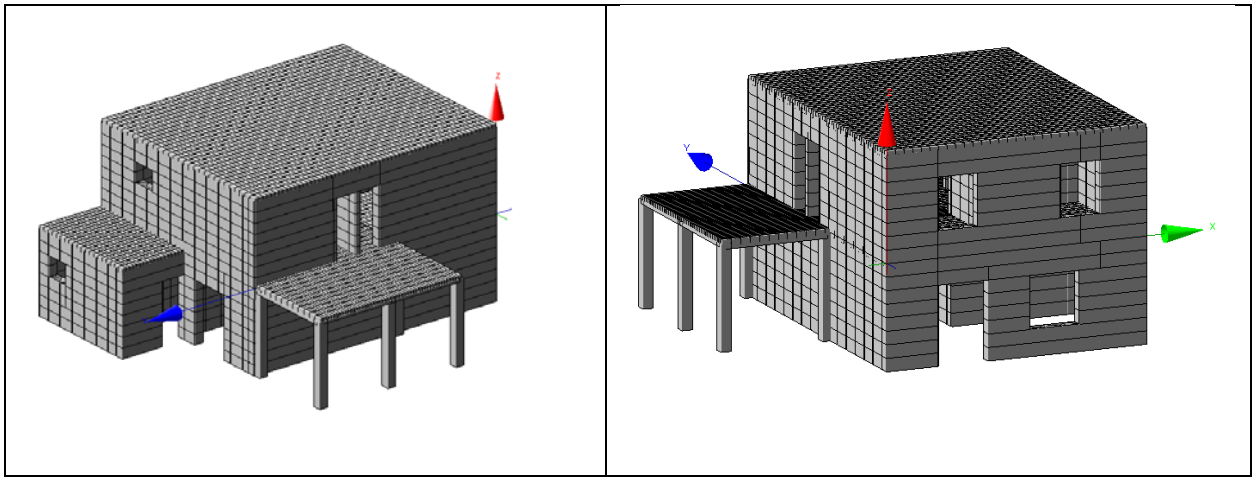


Рис. 4.25. Візуалізація тривимірно скінченноелементної моделі будівлі.

При розбитті областей на скінченні елементи були дотримані основні правила:

1) застосовувалися скінченні елементи правильної форми – прямокутні, трикутні;

2) розміри сторін скінченних елементів дорівнюють 1/8..1/30 розмірів областей, що розбиваються (з метою отримання більшої інженерної точності);

3) для моделювати взаємодію балок з плитою перекриття, стрижні, що моделюють балки, розбиті на окремі стрижні з таким самим кроком, що і плита.

Сітка скінчених елементів всієї будівлі приведена на рис. 4.26.

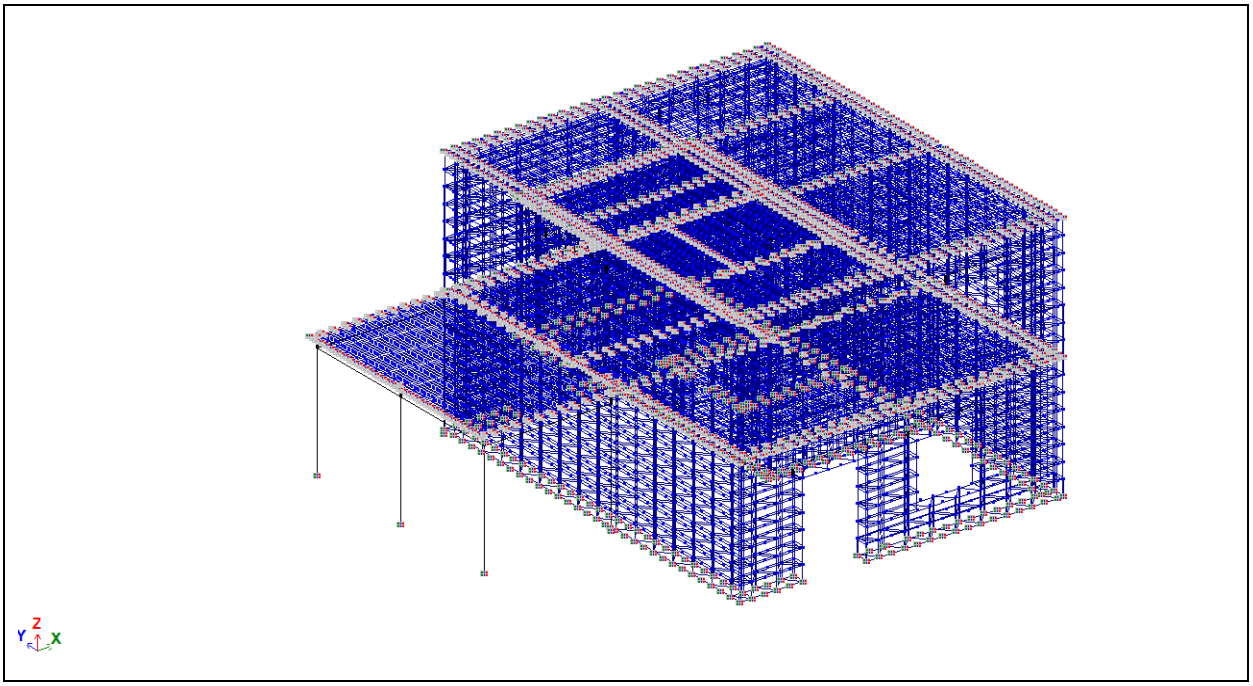


Рис. 4.26. Сітка скінченних елементів моделі

Для спрощення побудови моделі висоту одного поверху було розбито з шагом по вертикалі 375 мм (рис. 4.27).

Навантаження на конструкції будівлі визначалися відповідно до вимог ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження та впливи» [11]. Модель будівлі була розрахована на наступні навантаження:

Навантаження №1 – власна ваги конструкцій (постійне навантаження, задавалось автоматично засобами ПК Ліра-Сапр).

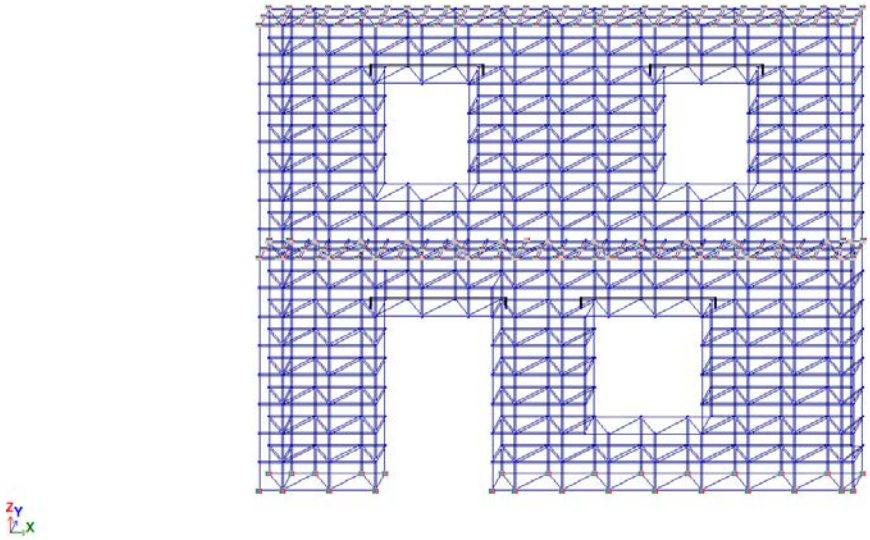


Рис. 4.27. Фрагмент скінченноелементної моделі стіни

Навантаження №2 – власна вага підлоги та підготовки (постійне навантаження, 1,045 кН/м^2).

Навантаження №3 – корисне навантаження на перекриття (довготривале навантаження, 1,575 кН/м^2).

Навантаження №4 – власна вага утеплювача покрівлі (постійне навантаження, 0,9 кН/м^2).

Навантаження №6 – снігове навантаження (довготривале навантаження, 1,277 кН/м2).

Навантаження №7 та №8 – вітрове навантаження (короткочасне навантаження, для надвітряного боку: поверх 1: W_m=0.711 кН/м^2; поверх 2: W_m=0.949 кН/м^2; для підвітряного боку: поверх 1: W_m=0.534 кН/м^2; поверх 2: W_m=0.711 кН/м^2.

В результаті статичного розрахунку були отримані величини переміщень та зусилля в елементах будівлі. Лінійні переміщення від найнесприятливішого РСН вздовж осей X, Y, Z представлені на рис. 4.28,

4.29, 4.30. Величини максимального лінійного переміщення вузлів від найнесприятливішого РСН приведені у таблиці 4.6.

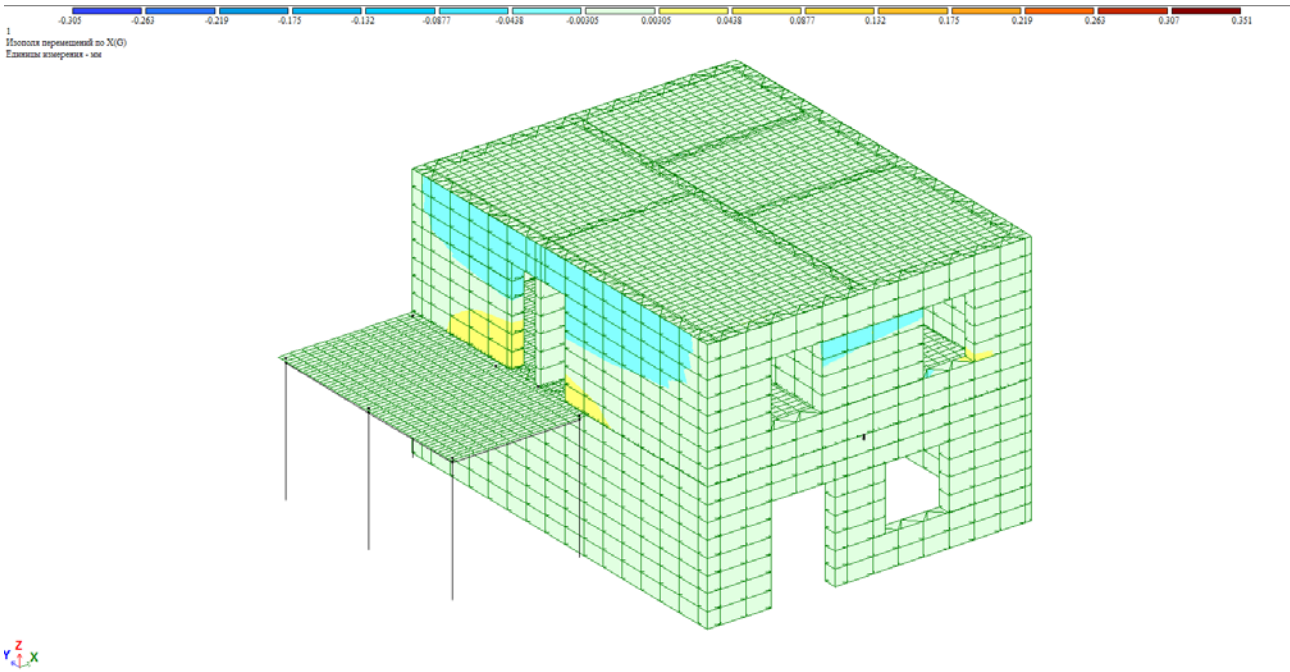


Рис. 4.28. Лінійні переміщення від найнесприятливішого РСН по осі X

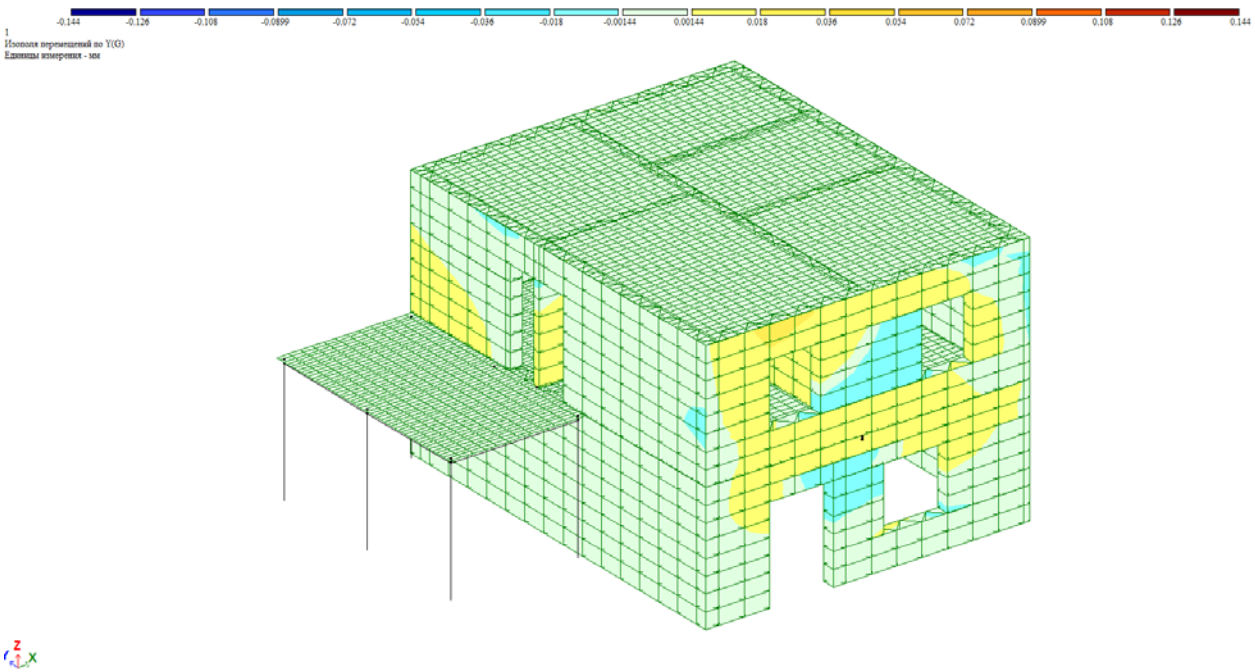


Рис. 4.29. Лінійні переміщення від найнесприятливішого РСН по осі Y

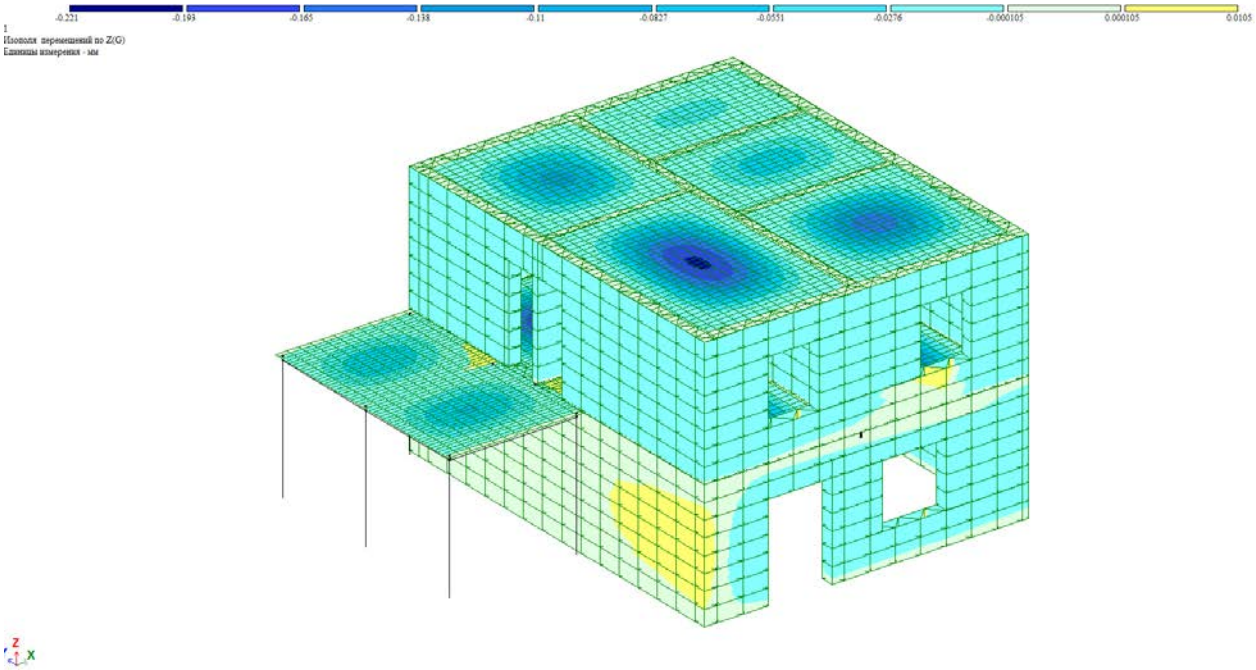


Рис. 4.30. Лінійні переміщення від найнесприятливішого РСН по осі Z

Таблиця 4.6.

Величини максимального лінійного переміщення від найнесприятливішого РСН вздовж осей глобальної системи координат, мм

Елемент, №	Ось X	Ось Y	Ось Z
8355	0,588	0	0
754	0,082	-0,144	-0,121
6122,6148	0	0	-0,221

Проаналізувавши характер лінійних переміщень елементів схеми від розрахункового сполучення навантажень можна зробити висновок, що найбільші переміщення виникають у вузлах, які знаходься у площині плит перекриття та покриття.

Мозаїка напружень в елементах будівлі від найнесприятливішого розрахункового сполучення навантажень приведена на рис. рис. 4.31, 4.32, 2.33 та в табл. 4.7.

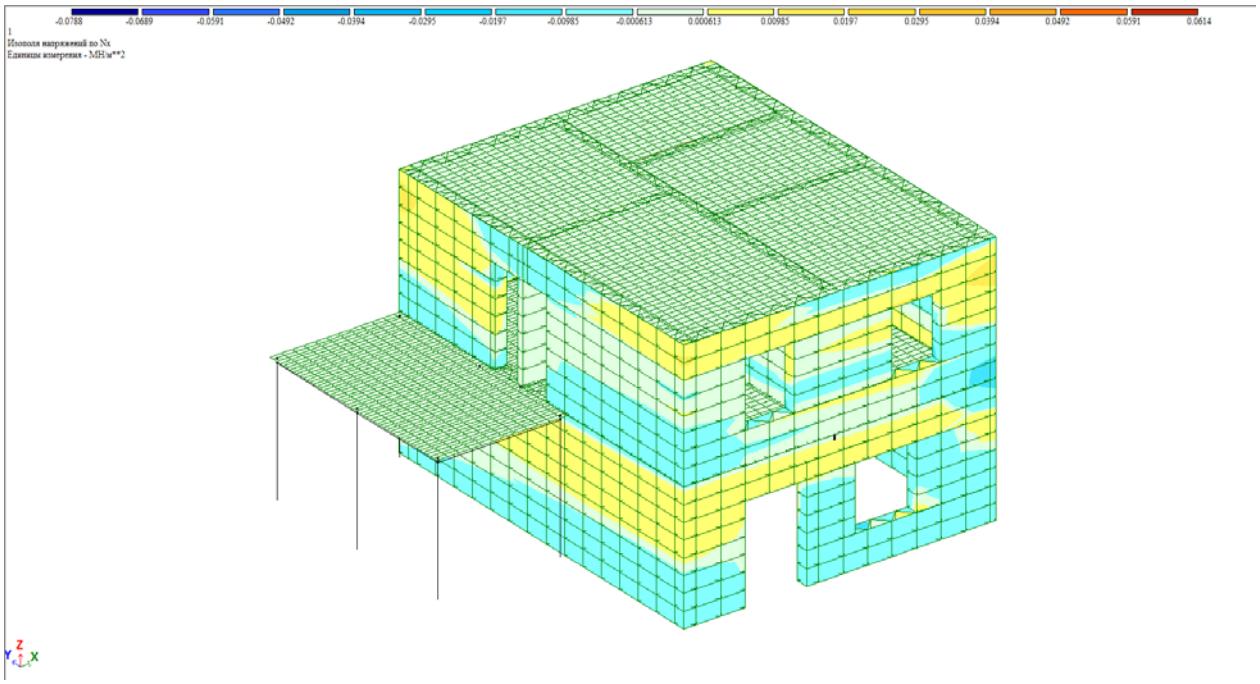


Рис. 4.31. Мозаїка нормальних напружень вздовж осі X

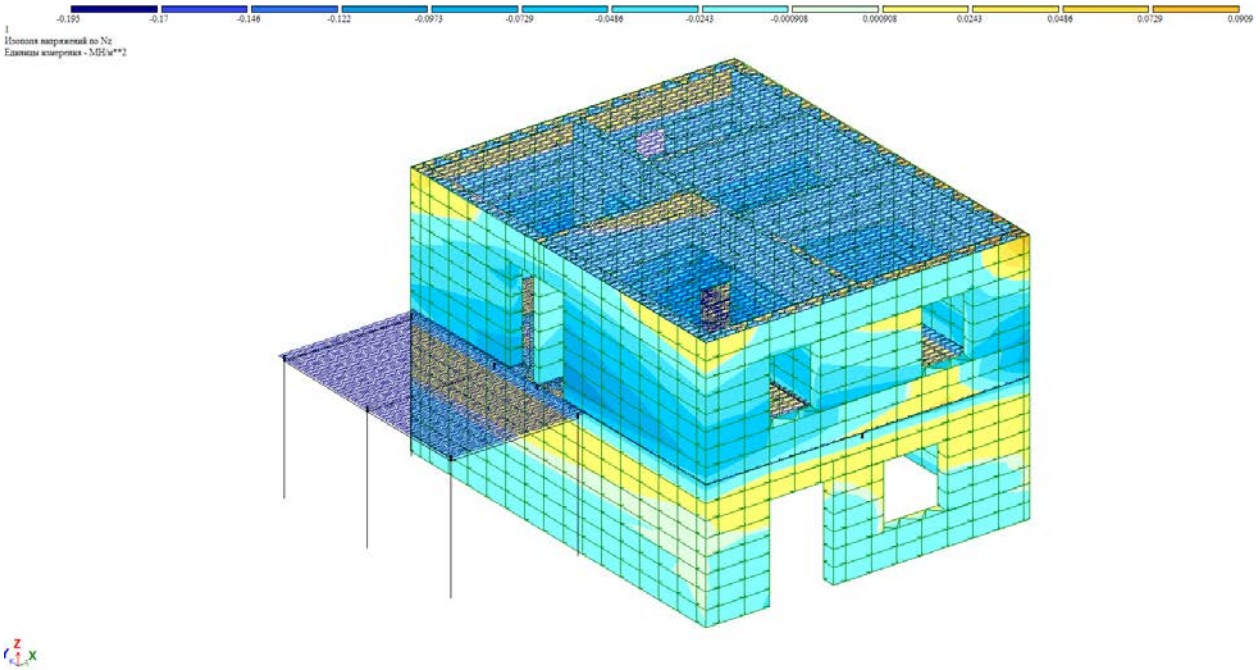


Рис. 4.32. Мозаїка нормальних напружень вздовж осі Z

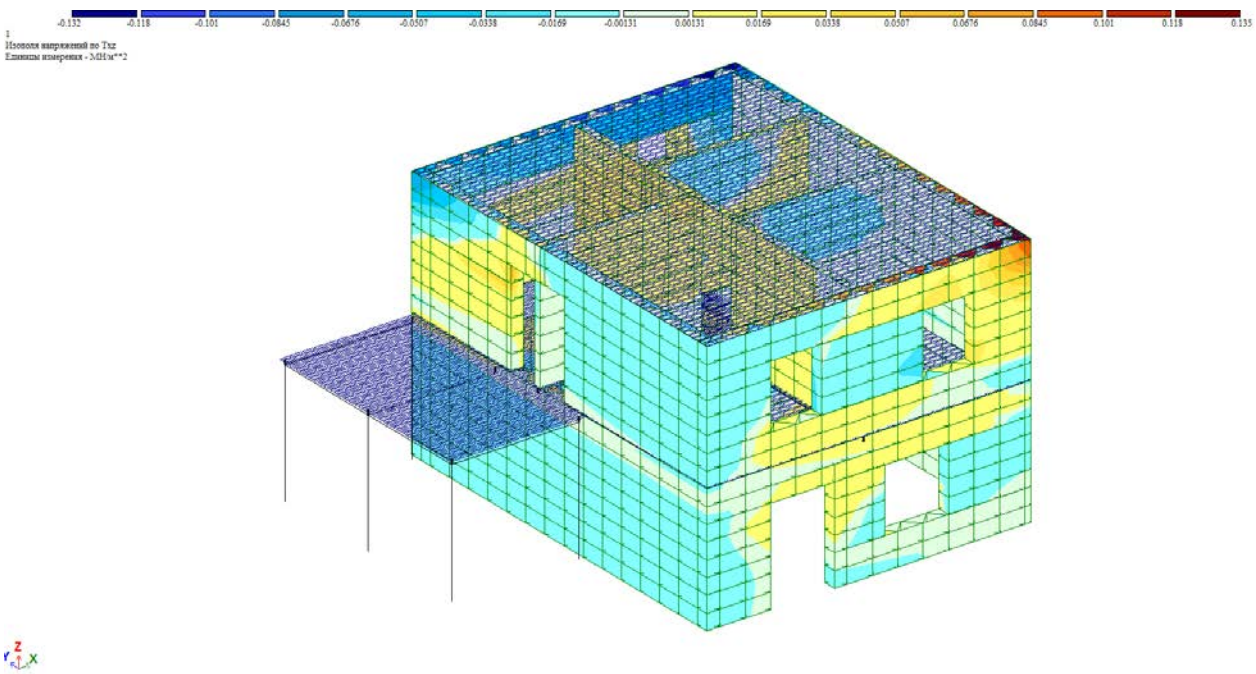


Рис. 4.33. Мозаїка дотичних напружень в площині X0Z

Таблиця 4.7.

Величини максимальних нормальних та дотичних напружень від найнесприятливішого РСН вздовж осей місцевої системи координат, МПа

Елемент, №	N_X	N_Z	τ_{XZ}
6221	0.175	0.025	0.043
1818	-0.011	-0.218	-0.070
1820	-0.155	-0.212	-0.171

Проаналізувавши мозаїку зусиль від найнесприятливішого розрахункового сполучення навантажень, які виникають в елементах, можна зробити висновок, що найбільші нормальні та дотичні напруження виникають у верхніх та нижніх поясах внутрішньої зигзагоподібної перемички внутрішніх несучих стін. Максимальна величина нормальних напружень становить 0,218 МПа, що значно менше за величину експериментально визначеної міцності бетону на стиск.

Гранично допустима величина горизонтальних переміщень складає f_u=h/500=6000/500 = 12 мм (h – висота від верху фундаменту до покриття). Максимальне розрахункове значення переміщень 0.588мм в будівлі виникло вздовж осі У.

Гранично допустима величина вертикальних переміщень складає f_u=l/200=5400/200 = 27 мм (l – довжина елемента перекриття між опорами). Максимальний горизонтальний прогин за результатами розрахунку склав 0,221мм.

Таким чином, згідно з отриманими результатами прийняте конструктивне рішення будівлі за технологією 3D-друку відповідає вимогам щодо несучої здатності та експлуатаційної придатності.

Характер деформування елементів будівлі свідчить про те, що під впливом дотичних напружень стінка перекошується: за укороченим діагоналям вона стискається, а по подовженим - витягується. Відбувається спучування стінки, утворення хвиль. Перешкоджати цьому явищу можна за допомогою установки по вертикалі ребер жорсткості або спеціальних закладних деталей, які будуть стягувати зовнішні шари стін між собою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Демиденко А.К. Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации : спец. ISSN 2304-6295. / Демиденко А.К.., 2017. – 63 с.

2. В чём уникальность 3D-принтера APIS COR [Електронний ресурс] // Construction 3D printing. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: http://apis-cor.com/3d-printer – назва домашньої сторінки інтернет.

3. Полипропиленовое фиброволокно, или как сделать бетон крепче. [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: http://polymerstroyplus.ru/cement/fibra-cement.html – назва домашньої сторінки інтернет.

4. Прочность стеклянных нитей [Електронний ресурс] // Технология синтетических пластических масс - [с.123]. – 1954. – Режим доступу до ресурсу: http://chem21.info/info/660117/– назва домашньої сторінки інтернет.

5. Шипелев И. Л. Возможности и преимущества метода строительной 3D печати / Шипелев И. Л.. // 010829@pnu.edu.ruТОГУ, г. Хабаровск, Россия. – 2016.

6. ГОСТ 8735-88. Межгосударственный стандарт. Песок для строительных работ. Методы испытаний. - М.: Госстрой СССР, 1989.

7. ДСТУ Б В.2.7-71-98 (ГОСТ 8269.0-97). Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. - К.: Державний комітет будівництва, архітектури і житлової політики України, 1999. – 47с.

8. ДСТУ Б В.2.7. – 214:2009. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. - К.: Мінрегіонбуд України, 2010 – 43с.

9. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Бетоны. Методы определения средней плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости. – К.: Госстрой Украины, 2008.

10. Стрелец-Стрелецкий Е.Б. ЛИРА 9.4. Руководство пользователя. Основы. Учебное пособие. / Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Боговис В.Е., Гензерский Ю.В. – Киев: Издательство «ФАКТ», 2008. – 164 с.

11. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. НАВАНТАЖЕННЯ І ВПЛИВИ; 1 січня 2007. — Київ МІНБУД УКРАЇНИ: Норми проектування, 2006. — 75с.

12. Фокин Строительная теплотехника, М.: Стройиздат, 1980. - 66 с.

13. ДБН В.2.6-31:2006. Теплова ізоляція будівель К.: 2006.

14. Базовые основы 3D печати [Електронний ресурс] // «Смарт-Принт» Все о 3D принтерах и 3D печати в Украине и в мире. – 2016. – Режим доступу до ресурсу: www.xn--3-htbdlzkhdq6g.com.ua/blog.

15. M. Kurman. Fabricated: The New World of 3D Printing Hod Lipson / M.: Kurman. – 320 с. – (Computers).

16. Новые достижения 3D-печати в аэрокосмонавтике. [Електронний ресурс] // © MAKE-3D.RU. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: www.make-3d.ru/news/novye-dostizheniya-3d-pechati-v-aerokosmonavtike.

5. ВПРОВАДЖЕННЯ В ПРАКТИКУ БУДІВЦТВА УКРАЇНИ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ 3Д - ДРУКУ

5.1. Технологічна база і конструктивні елементи будівель і споруд, що виготовляються за технологією 3Д друку

На сьогодні в Дніпропетровській області в с. Братське, Дніпровського району знаходиться виробниче приміщення, в якому налагоджений випуск бетонних виробів за допомогою 3D друку (рис. 5.1, а).

В лабораторії кафедри залізобетонних та кам'яних конструкцій Придніпровської державної академії будівництва та архітектури знаходиться сучасний лабораторний змішувач німецької фірми «АЙРІХ», ємністю 50 л, що надає змогу підбирати склади бетонних сумішей для 3D - принту будівельних виробів (рис. 5.1, б).



а)



б)

Рис. 5.1. Технологічне обладнання для 3D друку будівельних виробів:
а) виробничий цех з обладнанням для 3D друку бетонних виробів;
б) лабораторний змішувач фірми «Айріх».

Технологічно процес виготовлення бетонних виробів пов’язаний з пошаровим укладанням в необхідному напрямку бетонної суміші через сопло бетоноукладача за допомогою комп'ютерної програми на мові G-коду.

В теперішній час за допомогою 3D друку виготовляються наступні вироби і конструкції:

секції огороджень (рис. 5.2);

димові канали (рис. 5.3, а);

каналізаційні люки (рис. 5.3, б);

різноманітні кільця, квадрати, прямокутники для обрамлення дерев, кущів, декоративного оздоблення (рис. 5.4, а);

інші різноманітні малі декоративні форми (рис. 5.4, б);

туалети (рис. 5.5).



а)



б)

Рис. 5.2. Загальний вигляд секцій огороджень:
а) в цеху виробництва; б) на об’єкті будівництва в селищі Слобожанське Дніпровського району, Дніпропетровської області



а)



б)

Рис. 5.3. Загальний вигляд: а) димових каналів, б) каналізаційних люків.



а)



б)

Рис. 5.4. Загальний вигляд: а) кілець, квадратів, прямокутників для обрамлення дерев, кущів, декоративного оздоблення,
б) малих декоративних форм



Рис. 5.5. Загальний вигляд туалету

На сьогодні створені наукові [1…22] та технологічні передумови для експериментального будівництва малоповерхових будівель методом 3Д друку.

5.2. Проекти для зведення малоповерхових житлових будинків за технологією 3D-друку

В 2020 році в ДВНЗ ПДАБА проходив відкритий студентський конкурс енергоефективних індивідуальних будинків «Енергія+», які можуть зводитися за технологією 3Д друку. Представляємо кращі проекти, що заслуговують на увагу і можуть розглядатися як прототипи експериментального будівництва за технологією 3Д друку.

Проект студентів Клопко А., Письменкової Ю.Ю., Скворцової О.



Рис. 5.1. Візуалізація будівлі

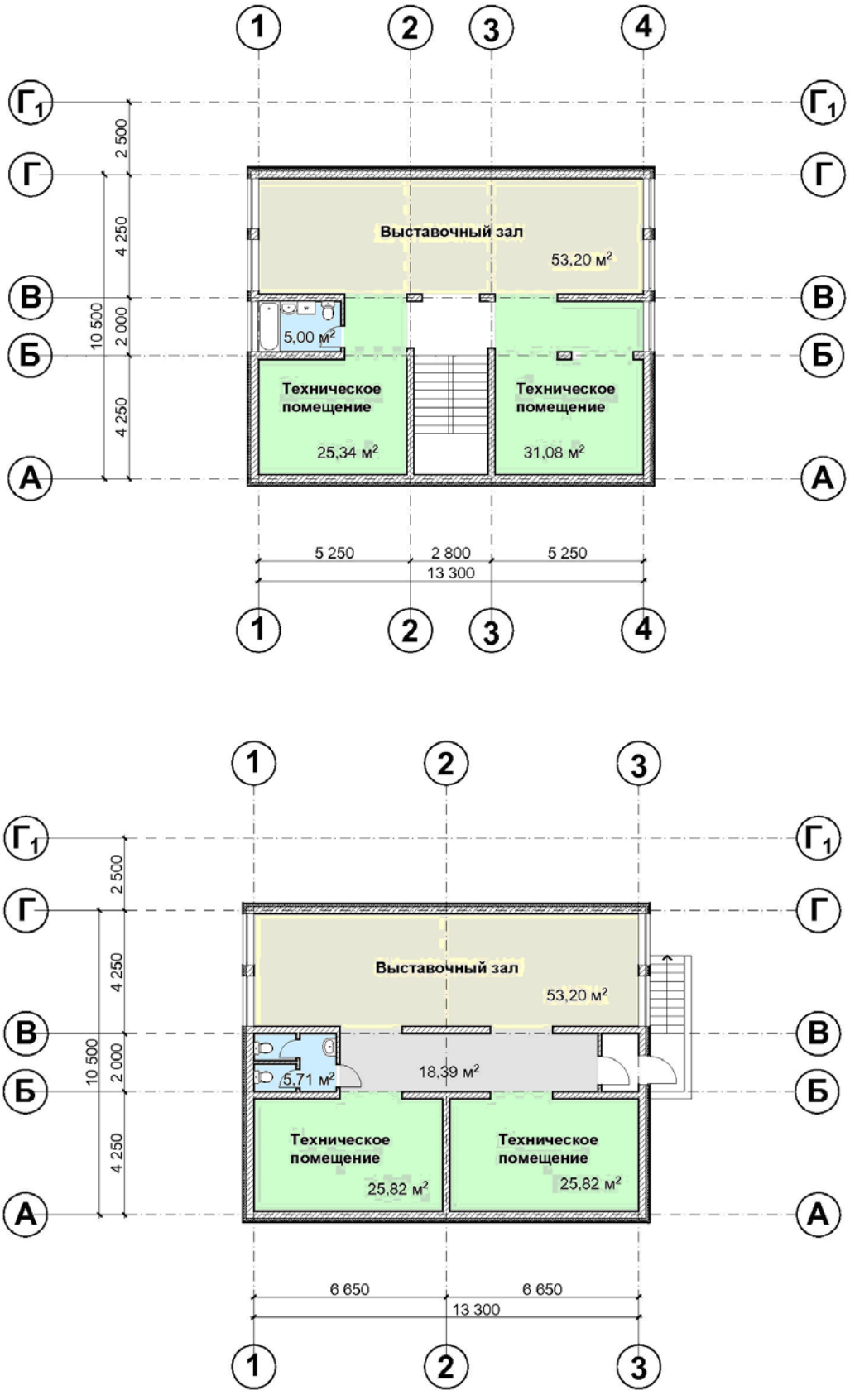


Рис. 5.2. Варіанти планувань цокольного поверху

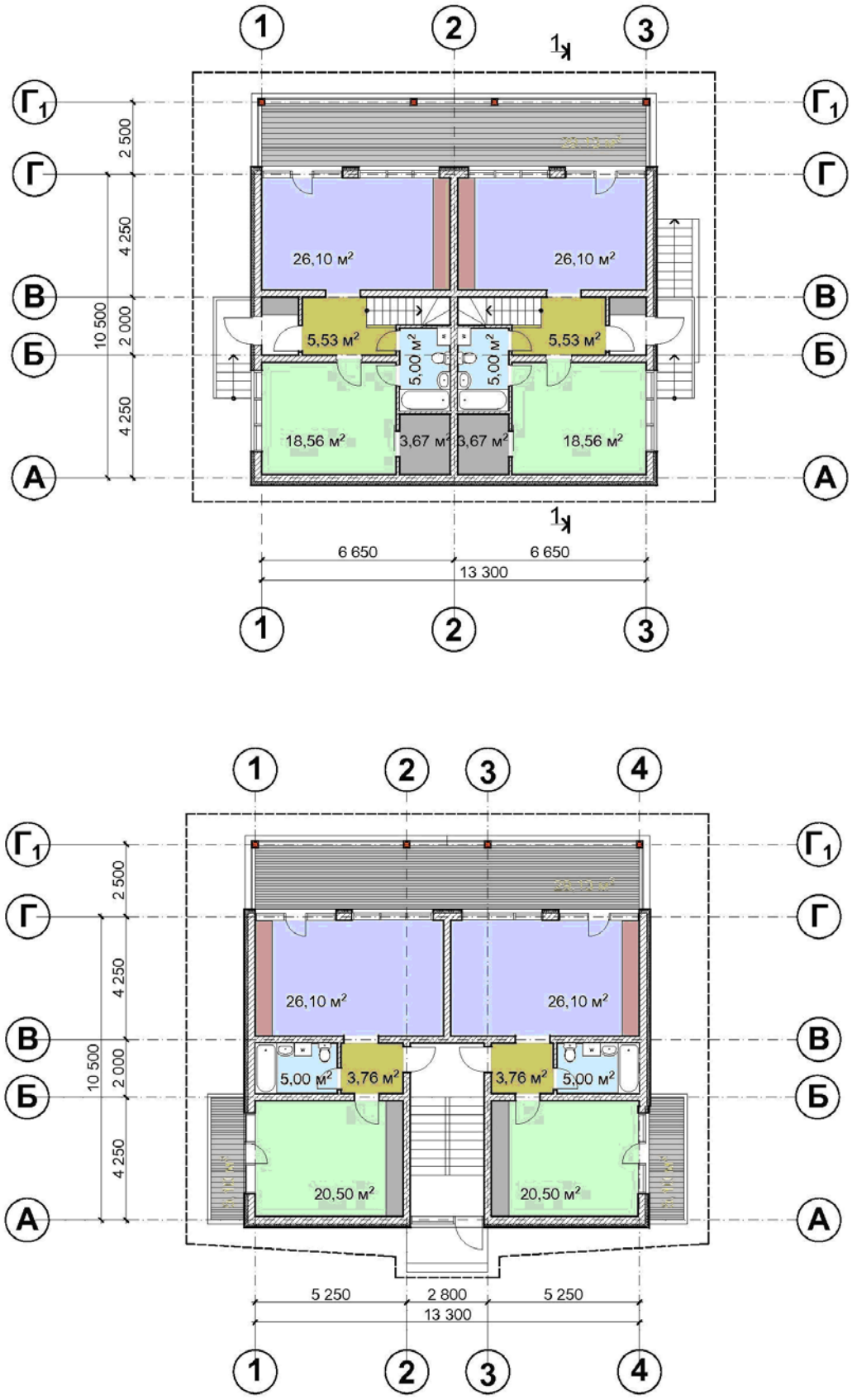


Рис. 5.3. Варіанти планувань першого поверху

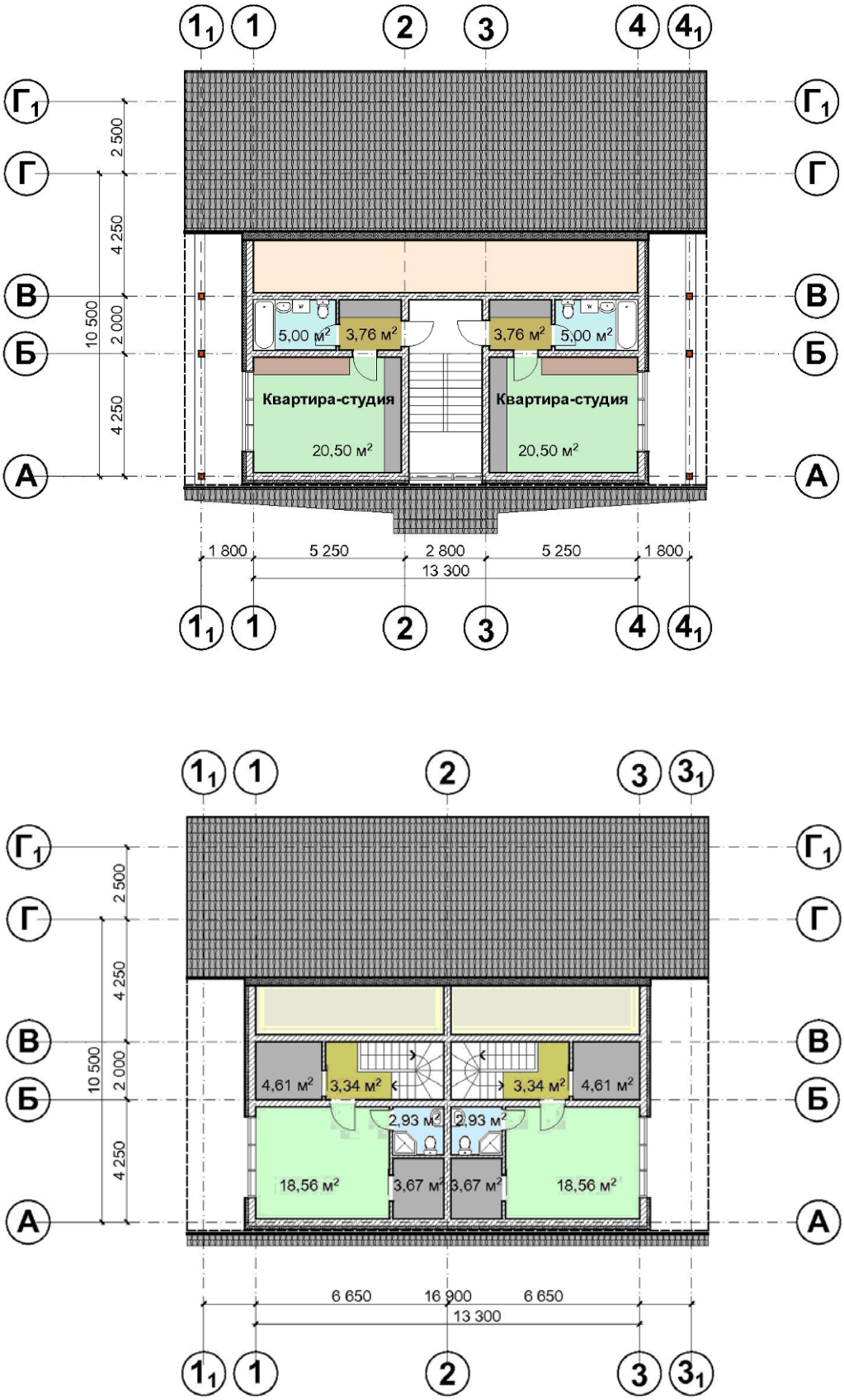


Рис. 5.4. Варіанти планувань другого поверху

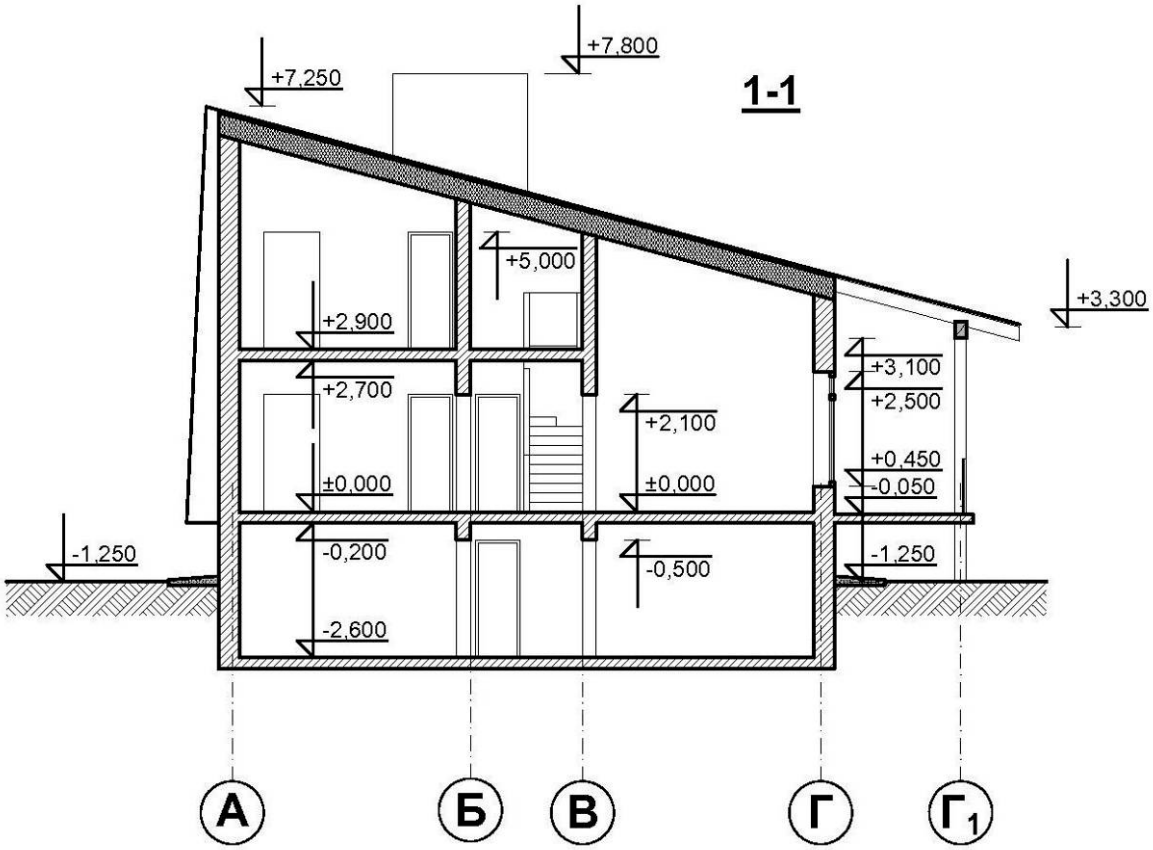


Рис. 5.5. Розріз

Проект студентів Білець Н., Кириченко Є., Мамалот О., М'якенької М., Шоломинського Д

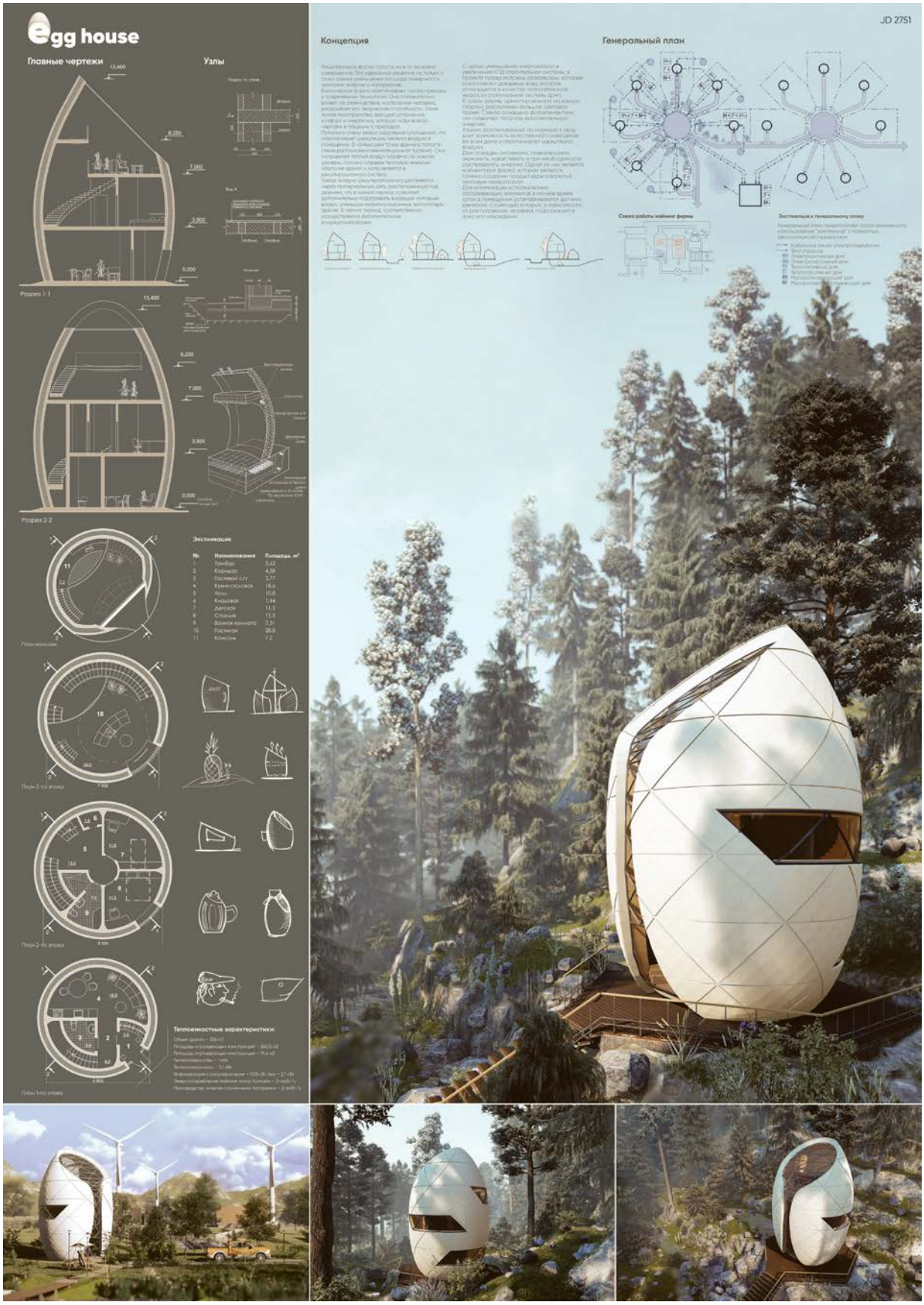


Рис. 5.6. Загальний вигляд, розрізи, плани поверхів



Рис. 5.7. Інтер’єри будинку

Проект студентів Гальченко Г., Казанцевої Г., Четверик Д., Люльченко А.

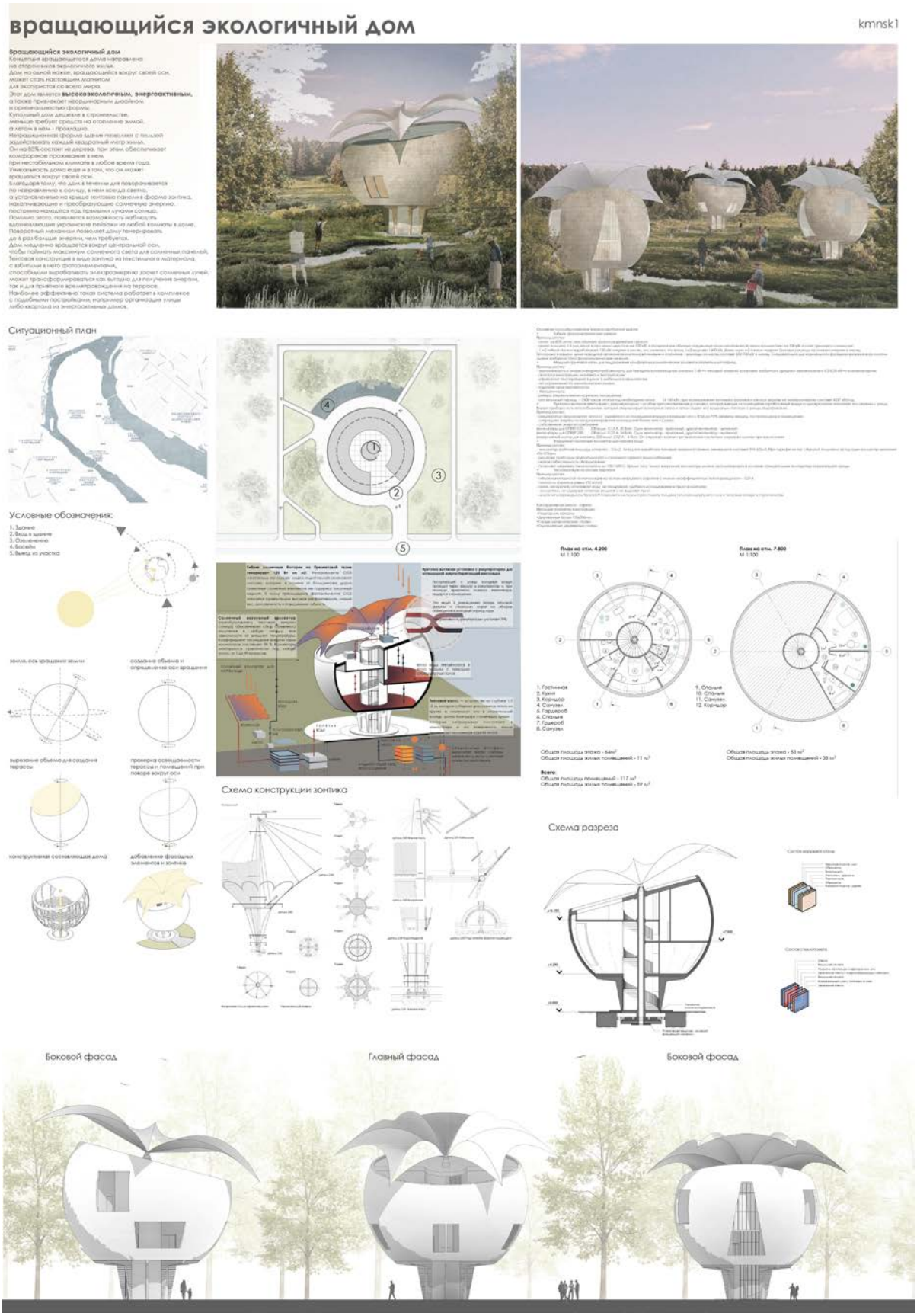


Рис. 5.8. Будинок, що обертається

Проект студента Дьяконова Д.



Рис. 5.9. Концепція енергоефективності, плани, розріз будівлі

Енергоефективність по-українські

Пропоную поглянути на національні традиції будування й утеплення житлових будинків

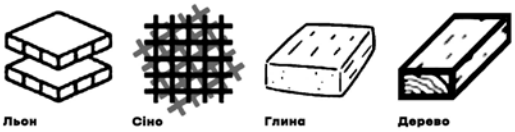
Основа концепту полягає у відновленні національного стилю та використанні етнічних матеріалів, які в свою чергу в комплексі забезпечують енергоефективність житла

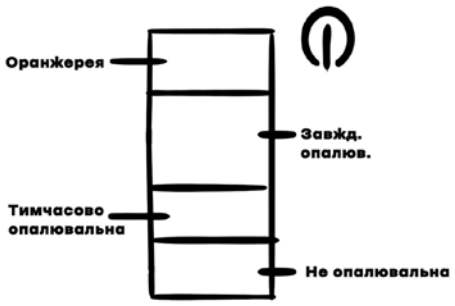
Такі матеріали як льон, сіно,глина та дерево - дуже характерні для українського побуту

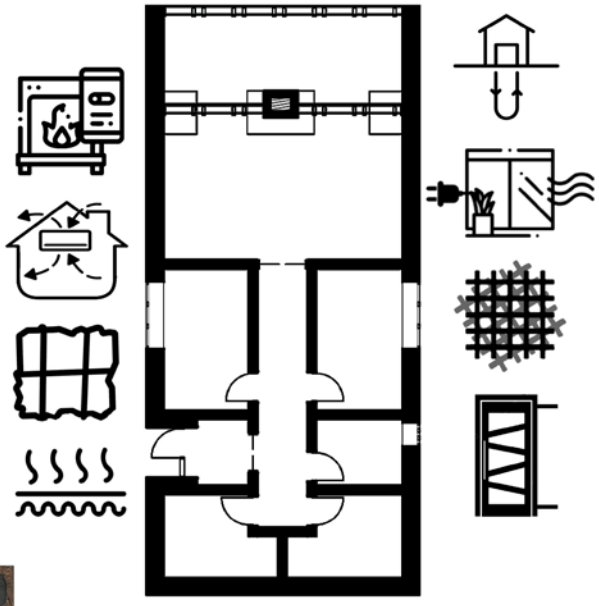
Екологічність, можливість повторної переробки та відновлення цих ресурсів - робить ці матеріали найбільш придатними для екологічних та енергоефективних будинків

Одночасне використання традиційних матеріалів з сучасними технологіями надає змогу перевести дім з пасивного стану в активний

Використання традиційних матеріалів











Центром будинку буде камін, який топиться з боку оранжереї, а тепло віддає в будинок. Також камін матиме функцію стіни Тромба. Між оранжиреєю та вітальнею розміщуються великі теплойомкі об'єми, облицьовані матеріалом KRION®. Ці маси нагріваються за рахунок сонячного світла й будуть теплонакопичувачами.

В основному приміщенні підлога буде темного кольору. Завдяки цьому в кімнаті, що має великі вікна й немалу площину, тепло буде дуже гарно акумулюватись та віддаватись впродовж довгого часу.

Між приміщеннями розсувні перегородки для зонування теплових мас.

11-01-99-16

Рис. 5.10. Інтер’єр будинку

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Savytskyi M. V. 3D-printing of build objects / M. V. Savytskyi, S. V. Shatov, O. A. Ozhyshchenko // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури : зб. наук. праць. – 2016. – № 3. – С. 18–26.

2. Шатов С.В., Савицький Н. В., Карпушин С. А. Обобщение инновационных технологий 3D-печати строительных объектов для разработки стартапов / Строительство. Материаловедение Машиностроение. Вып. 99. Д.: ГВУЗ «ПГАСА», 2017, с. 194-200.

3. Шатов С. В. Обобщение инновационных технологий 3D-печати строительных объектов для разработки стартапов / С. В. Шатов, Н. В. Савицкий, С. А. Карпушин // Строительство, материаловедение, машиностроение : сб. науч. тр. / Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры. – Днепр, 2017. – Вып. 99. – С. 194–200. – (Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития).

4. Materials for 3D construction printing / M. Savytskyi, O. Konoplanik, S. Unčik, S. Dukat, A. Savytskyi // Sustainable hausing and human settlement : monograph / SHEE "Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture" ; Slovak University of Technology in Bratislava. – Dnipro ; Bratislava, 2018. – P. 208–214.

5. Інноваційні технології в будівництві для реалізації новітніх стартапів / С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. Ю. Конопляник, Є. О. Євсєєв // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2018. – № 1. – С. 10–18.

6. Шатов С.В., Савицький М.В., Марченко І.О. Удосконалення обладнання 3D-друку об’єктів // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2019, №6.- С. 90-101.

7. Воробьев В. В. Формообразование «Лунной базы» / В. В. Воробьев, Н. В. Савицкий // VII Международная конференция «Космические

технологии: настоящее и будущее», 21-24 мая 2019 г. / ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля». – Днепр, 2019. – С. 110.

8. Шатов С. В. Використання досвіду 3D-друку будівельних об’єктів для проекту «Місячна база» / С. В. Шатов, М. В. Савицький, С. В. Іванцов // VII Международная конференция «Космические технологии: настоящее и будущее», 21-24 мая 2019 г. / ДП «КБ «Південне» ім. М. К. Янгеля». – Днепр, 2019. – С. 113.

9. Визначення фізико-механічних характеристик бетонів для 3D друку будівельних конструкцій / Савицький М.В., Конопляник О.Ю., Мислицька А.О., Лясота ОВ. // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2020. – № 2. – С. 59–68.

10. Пат. 108790 Україна, МПК E04G 21/04, E04G 11/06, E04B 1/16, E04B 2/02, B29C 47/00, B29L 31/10. Головка для 3D-друку будівельних об'єктів / С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. А. Ожищенко, О. І. Голубченко, Є. О. Євсєєв, Є. О. Панченко, І. А. Дудка ; власник Шатов С. В., Савицький М. В., Ожищенко О. А. – № 201601987 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 25.07.2016, Бюл. № 14.

11. Пат. 109807 Україна, МПК E04G 21/04. Обладнання для 3D-друку будівельних об'єктів / С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. А. Ожищенко, О. І. Голубченко, Є. О. Євсєєв, Є. О. Панченко, І. А. Дудка ; власник Шатов С. В., Савицький М. В., Ожищенко О. А. – № 201601942 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17.

12. Пат. 112205 Україна, МПК B29C 67/00, E04G 21/04, B33Y 30/00, B29K 509/06, B29L 31/10. Екструдер 3D-друку будівельних об'єктів / С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. А. Ожищенко, Є. О. Євсєєв, Є. О. Панченко, І. А. Дудка ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201605379 ; заявл. 18.05.2016 ; опубл. 12.12.2016, Бюл. № 23.

13. Пат. 115596 Україна, МПК E04G 21/04. Головка 3D-друку будівельних об'єктів / С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. А. Ожищенко,

Є. О. Євсєєв, Є. О. Панченко, І. А. Дудка ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201610003 ; заявл. 30.09.2016 ; опубл. 25.04.2017, Бюл. № 8.

14. Пат. 116549 Україна, МПК E04G 21/04, B64C 27/20. Пристрій для 3D-друку будівельних об'єктів / С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. А. Ожищенко, Є. О. Євсєєв, Є. О. Панченко, І. А. Дудка ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201612419 ; заявл. 06.12.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 10.

15. Пат. 117773 Україна, МПК B64C 37/00. Пристрій для розробки лікувальних грязей / С. В. Шатов, М. В. Савицький, С. В. Піцик ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201700105 ; заявл. 03.01.2017 ; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13.

16. Пат. 123106 Україна, МПК E04G 21/04. Головка 3D-друку будівелних виробів / С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. Ю. Конопляник, Є. О. Євсєєв, Є. О. Панченко, Д. І. Бєліцька ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201708541 ; заявл. 21.08.2017 ; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3.

17. Пат. 123108 Україна, МПК B29C 64/209, B33Y 30/00, E04G 21/04. Головка 3D-друку будівельних конструкцій / С. В. Шатов, М. В. Савицький, О. Ю. Конопляник, Є. О. Євсєєв, Є. О. Панченко, Д. І. Бєліцька ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201708551 ; заявл. 21.08.2017 ; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3.

18. Пат. 125267 Україна, МПК B29C 64/209, B33Y 30/00, E04G 21/04. Обладнання для 3D-друку будівельних об'єктів / М. В. Савицький, С. В. Шатов, С. Унчік, С. Дукат ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201709608 ; заявл. 02.10.2017 ; опубл. 10.05.2018, Бюл. № 9.

19. Пат. 126077 Україна, МПК B29C 64/20, B33Y 30/00, E04G 21/04 . Пристрій для 3D-друку будівельних об'єктів / М. В. Савицький, С. В. Шатов, С. Унчік, С. Дукат ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201711244 ; заявл. 17.11.2017 ; опубл. 11.06.2018, Бюл. № 11.

20. Пат. 137598 Україна, МПК E04G 21/04, E04G 21/20 . Головка 3D-друку будівельних виробів / С. В. Шатов, М. В. Савицький, І. О. Марченко, О. І. Голубченко ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201904512 ; заявл. 25.04.2019 ; опубл. 25.10.2019, Бюл. № 20.

21. Пат. 137599 Україна, МПК E04G 21/04, E04G 21/20 . Головка 3D-друку будівельних об'єктів / С. В. Шатов, М. В. Савицький, І. О. Марченко, О. І. Голубченко ; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201904513 ; заявл. 25.04.2019 ; опубл. 25.10.2019, Бюл. № 20.

22. Пат. 138633 Україна, МПК E04G 21/04 . Головка 3D-друку будівельних конструкцій / С. В. Шатов, М. В. Савицький, І. О. Марченко, О. І. Голубченко; власник Придніпр. держ. акад. буд-ва та архітектури. – № 201904522 ; заявл. 25.04.2019 ; опубл. 10.12.2019, Бюл. № 23.

Наукове видання

Адегов Олександр
Айріх Штефан
Бабенко Марина
Бардах Олександр
Бондаренко Ольга
Бордун Марина
Бринзін Євген
Голубченко Олександр
Денисенко Олександр
Дукат Станіслав
Євсєєва Галина
Зінкевич Оксана
Іванцов Сергій
Коваль Олена
Конопляник Олександр
Леушин Максим
Лясота Олександр
Ляховецька – Токарєва Марина
Махінько Микола
Нікіфорова Тетяна
Папірник Руслан
Перегінець Іван
Савицький Андрій
Савицький Микола
Савицький Олександр
Соловйова Єлизавета
Спиридоненков Віталій
Титюк Анатолій
Унчік Станіслав
Халаф Ібрагім Зайдан
Чернець Вячеслав
Шатов Сергій,
Шляхов Костянтин
Шевченко Тетяна
Шехоркіна Світлана
Юрченко Євген

АРХІТЕКТУРНО-КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНА СИСТЕМА 3Д-ДРУКУ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ

Колективна монографія

За загальною редакцією доктора технічних наук, професора Миколи Савицького

Редактори: Савицький М., Шехоркіна С., Бордун М., Коваль О., Юрченко Є.

Підп. до друку 26.11.2019, відп. до рішення Вченої ради ДВНЗ ПДАБА (Протокол № 4 від 26 листопада 2019 р.). Формат А4. Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 30. Тираж 300 прим.
Зам. №1971

Віддруковано в ФОП Удовиченко О. М.
Дронецьке Шосе, 15, кв. 531, м. Дніпро, 49080, тел.. (056) 785-22-31
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
ДК № 3660 від 28.12.2009