

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ТА БЕТОННИХ СПОРУД ТА ВИРОБІВ**

Монографія

Харків
ХНАДУ
2025

Затверджена на Вченій раді Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Протокол № 80/25/6.17 від 26 листопада 2025 р.

Рецензенти: **Шабанова Г.М.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології кераміки вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
Кожушко В.П. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського Харківського національного автомобільно-дорожнього університету;
Алейнікова А.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології та організації будівельного виробництва Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

Колектив авторів:

Бугаєвський С.О., доктор технічних наук, професор, професор кафедри мостів, конструкцій і будівельної механіки ім. В.О. Російського, декан дорожньо-будівельного факультету;
Гапонова Л.В., кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедрою комп'ютерної графіки;
Пустовойтова О.М., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної графіки;
Атинян А.О., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної графіки

У 24 Удосконалення технології та конструкцій для залізобетонних та бетонних споруд та виробів: монографія / С.О. Бугаєвський, Л.В. Гапонова, О.М. Пустовойтова, А.О. Атинян. – Харків: ХНАДУ, 2025. – 184 с.

ISBN

Монографія присвячена актуальним питанням підвищення ефективності технологій та удосконалення конструктивних рішень у сфері виробництва і експлуатації залізобетонних та бетонних споруд. Актуальність роботи зумовлена зростанням вимог до довговічності, надійності, вогнестійкості та енергоефективності сучасних будівельних об'єктів, що потребує системного підходу до розроблення нових методів проєктування та удосконалення технологій виготовлення бетонних виробів. Монографія є ґрунтовним науковим дослідженням, яке має високу теоретичну й практичну цінність, відповідає сучасним вимогам до наукових видань, відзначається системністю, новизною та орієнтацією на реальні потреби будівельної галузі. Вона становить інтерес для науковців, інженерів-практиків, викладачів та студентів і без сумніву сприятиме подальшому розвитку будівельної науки та практики.

УДК 691.624.01

ISBN

© Бугаєвський С.О., Гапонова Л.В.,
Пустовойтова О.М., Атинян А.О., 2025
© ХНАДУ, 2025

ВСТУП

Монографія присвячена актуальним питанням підвищення ефективності технологій та удосконалення конструктивних рішень у сфері виробництва і експлуатації залізобетонних та бетонних споруд. Актуальність роботи зумовлена зростанням вимог до довговічності, надійності, вогнестійкості та енергоефективності сучасних будівельних об'єктів, що потребує системного підходу до розроблення нових методів проектування та удосконалення технологій виготовлення бетонних виробів.

Автори комплексно підійшли до аналізу сучасного стану і перспектив розвитку технологій у галузі бетонних і залізобетонних конструкцій. Запропонована технологія улаштування полегшених залізобетонних конструкцій може бути використана при зведенні монолітних одно- і багатоповерхових цивільних та промислових будівель, що мають стіни, перекриття або інші елементи криволінійної форми.

Побудова методології формування внутрішньої геометрії є своєчасною й необхідною для практики будівництва проблемою, її вирішення дозволить підвищити ступінь надійності подібних систем, їх довговічність, а також за рахунок раціоналізації їхніх конструктивних параметрів реалізувати мінімізацію витрат матеріалів. Такі можливості розглянуто на прикладі будівництва складної архітектурної форми для багатоцільового використання у вигляді петлі Мебіуса.

У монографії послідовно розкрито проблематику підвищення довговічності бетонів, наведено результати досліджень щодо впливу мінеральних та хімічних добавок на формування структури матеріалу, обґрунтовано доцільність використання новітніх методів ущільнення та догляду за бетоном. Властивості композитного склопластикового матеріалу, призначеного для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій дозволяють оцінити стійкість матеріалу до агресивних факторів, що є ключовим для визначення його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. Використання композитного

матеріалу для підсилення конструкцій є цілком доцільним, має великий потенціал у забезпеченні надійності та тривалого терміну служби залізобетонних елементів.

Актуальність тематики підтверджується тим, що під час експлуатації споруд залізобетон зазнає комплексного впливу агресивних середовищ, навантажень та кліматичних факторів. У зв'язку з цим системний підхід, запропонований у монографії, дозволяє комплексно оцінити фактори, що визначають довговічність та працездатність бетонних виробів.

Наведені у роботі експериментальні та чисельні дослідження відзначаються високим рівнем методичної опрацьованості та можуть бути використані як база для подальших наукових пошуків у сфері підвищення вогнестійкості та енергоефективності конструкцій.

Розділ 1.

УДОСКНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕТОНУВАННЯ СКЛАДНИХ АРХІТЕКТУРНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Технологія монолітного будівництва за допомогою укладання бетонної суміші торкретуванням широко застосовується в усьому світі. Будинки, побудовані таким способом, відрізняються незвичайним дизайном і мають ряд переваг, порівняно з традиційною технологією будівництва.

Найбільш раціональними практично без обмежень щодо застосування є просторові конструкції у вигляді сферичних куполів, які представляють собою опуклу пологу або підйомну оболонку на круглому, еліптичному і полігональному плані.

Вони широко застосовуються для зведення із залізобетону об'єктів житлового та громадського призначення (офіси, школи, церкви, спортивні арени, театри, ангари, будинки або житлові комплекси тощо) [1, 2]. Дана технологія бетонування презентується в Україні фахівцями компанії Холбуд [3]. Технологія набризку бетону на гнучкі оболонки дозволяє отримати найрізноманітніші і незвичайні форми конструкцій (рис. 1.1).

Запропонована така технологія зведення монолітних залізобетонних конструкцій: на підготовлений легкий фундамент кріпиться оболонка з ПВХ тканини, яка надувається за допомогою напірного обладнання та створює форму майбутньої будівлі. Наступним етапом є нанесення на оболонку ізоляційного шару з пінополіуретану і армування.

Далі здійснюється торкретування бетонної суміші. На останньому етапі відбувається декорування. Оболонка може залишатися на будівлі протягом усього терміну експлуатації або зніматися з будівлі, після чого проводиться зовнішня обробка. Одним із прикладів зведення фахівцями компанії Холбуд купольних монолітних залізобетонних конструкцій є виробниче приміщення площею 1080 м² на плоскому даху функціонуючої будівлі, введене в експлуатацію в листопаді 2014 р. (рис. 1.1, а) [3].



а



б



в



г

Рис. 1.1. Приклади зведення монолітних залізобетонних конструкцій із застосуванням торкрет-обладнання:
 а – торкретування монолітної оболонки виробничої будівлі;
 б – конструкція альтанки; в, г – варіанти проекту дитячого майданчика та житлового будинку

1.1. Технології бетонування складних архітектурних конструкцій з використанням пневмоопалубки

Проведемо порівняльний аналіз способів зведення складних архітектурних конструкцій з монолітного залізобетону. Одним з конструктивних прийомів зведення тонкостінних просторових конструкцій є використання пневматичної опалубки. Всі способи застосування пневматичної опалубки можна класифікувати на підставі технології укладання бетону [4–9]:

1. Укладання бетонної суміші й елементів армування першого шару, що пружно деформуються, здійснюється на пневматичну мембрану, що лежить на горизонтальній площині і закріплена по краях у фундамент [4]. Шляхом подачі повітря під мембрану її надувають в проектне положення, а потім укладають другий шар армуючих елементів, що закріплюються за першим, і торкретують решту бетону.

2. На внутрішній поверхні надувної еластичної мембрани, що знаходиться в проектному положенні, створюють полімерне покриття з пінополіуретану із зафіксованими в ньому кронштейнами, до яких кріплять арматуру, після чого на внутрішню поверхню полімерного покриття наносять торкретбетону суміш, що закриває згадану арматуру і утворює після затвердіння несучу оболонку склепінчастої будівельної конструкції [5]. Після видалення мембрани зовнішня поверхня пінополіуретану покривається захисним покриттям.

3. Для підтримки пневматичної опалубки встановлюють плоскі арочні ферми і напіварки, зверху укладають армуючі елементи і наносять торкретбетон для утворення купольного зводу [6]. Для спрощення технології виготовлення куполів великих прольотів може бути використана підйомна опалубка [7].

4. На внутрішній поверхні надувної еластичної мембрани, що знаходиться в проектному положенні, створюють полімерне покриття з пінополіуретану із зафіксованими в ньому кронштейнами, до яких кріплять перші арматурні сітки і хомути, після чого на внутрішню поверхню полімерного покриття наносять торкретбетон, закриваючи тільки 1/3 частину довжини хомутів. До хомутів кріплять порожнисті труби, а порожнини між ними заповнюють пінополіуретаном для зменшення ваги конструкції.

Після закріплення другої арматурної сітки, її закривають торкретбетоном [8]. Якщо застосовується пневматична незнімна опалубка, то з зовнішньої сторони на неї наноситься захисне покриття [9].

Основним недоліком застосування пневматичної опалубки є неможливість зміни криволінійної форми залізобетонних будівель, що зводяться. Для цього необхідно виготовлення нової пневматичної опалубки.

1.2. Технології бетонування складних архітектурних конструкцій з використанням самонесучих каркасів або остовів

Наступним прийомом зведення тонкостінних просторових конструкцій є використання самонесучих каркасів або остовів з частковою або повною відмовою від застосування опалубки [10-16].

Відомий спосіб зведення будівлі [10], що включає установку панелей зі спіненої пластмаси з наявними на них дротяними сітками, які зшиваються одна з одною, і сітками суміжних панелей, і нанесення на зовнішню поверхню будівлі торкретбетону, а на внутрішню – штукатурного розчину.

У цьому способі панелі зі спіненої пластмаси є елементами незнімної опалубки, які посилені тільки дротяними сітками, що не забезпечує достатню несучу здатність незнімної опалубки для зведення елементів будівель криволінійної форми, при цьому остаточна несуча здатність зведених конструкцій обмежена армуванням дротяними сітками торкретбетону.

Ще відомий спосіб зведення будівлі [11], в якому на попередньо виготовлені фундаменти встановлюють арочні елементи двотаврового профілю, жорстко з'єднані вгорі. До арочних елементів приєднані арматурні стержні, що утворюють жорсткий каркас. З внутрішньої сторони каркаса закріплюється структуроутворюючий матеріал і гнучка арматурна сітка для забезпечення нанесення торкретбетону з обох сторін каркаса.

Основним несучим елементом у цій конструкції є арка, яка сприймає стискаючі зусилля і розпір від сітки. У будівлях з малими прольотами, де вимоги щодо жорсткості можуть бути знижені, застосування профільних арочних елементів призведе до перевитрати матеріалу. Крім того, значна вага арок вимагає індустриальних методів зведення з використанням кранового обладнання.

Відомий спосіб зведення будівлі криволінійної форми [12], що включає виготовлення фундаменту, установку на ньому вертикальних армуючих елементів і приєднання до них під кутом армуючих елементів другого напрямку з утворенням сітки, яка формує задану оболонку будівлі, і нанесення на сітку торкретбетону.

У цьому способі по периметру фундаменту замоноличують кінці вертикальних стержнів армування без попереднього їх викривлення,

тобто прямолінійні. Потім у центрі фундаменту встановлюють спеціальне пристосування у вигляді щогли зі стрілою, що вертикально і горизонтально повертається, за допомогою якої згинають і з'єднують армоелементи з утворенням каркасу, на який згодом набризкують торкретбетон. Сітчаста оболонка в цьому способі має малу твердість і здатна витримувати лише незначну вагу шару, що торкретується, в зв'язку з чим цей спосіб може бути використаний тільки для неопалюваних будинків.

Також відомий спосіб зведення будівлі криволінійної форми, який містить: виготовлення фундаменту, установку на ньому вертикальних армуючих елементів і приєднання до них під кутом армуючих елементів другого напрямку з утворенням сітки, яка формує задану оболонку будівлі. На частині зовнішньої поверхні жорсткої сітки укладають послідовно утеплювач і гнучку сітку, стержні якої з'єднують з армуючими елементами жорсткої сітки, максимальний діаметр стержнів якої становить 2,1–4,6 діаметра стержнів гнучкою сітки, після чого на внутрішню поверхню твердої сітки, а потім на зовнішню поверхню гнучкої сітки наносять шар торкретбетону. Шар торкретбетону, що наноситься на внутрішню поверхню твердої сітки, виконують змінної товщини, що збільшується до основи оболонки, при цьому товщина зовнішнього шару торкретбетону становить 0,3–0,7 товщини внутрішнього шару.

Недоліками даного способу є відсутність рекомендацій щодо забезпечення геометричних розмірів зведених будинків криволінійної форми (товщини нанесеного торкретбетону, рівності фінішної поверхні торкретбетону, кривизни отриманої форми будівлі після закінчення торкретування), а також відсутність спільної роботи під навантаженням зовнішнього і внутрішнього шару торкрет-бетону і жорсткої арматурної сітки.

Формування куполоподібного каркаса виконують з шарнірно з'єднаних елементів, встановлюють опалубку шляхом обшивки внутрішньої сторони каркаса за регульованими напрямними. Шар торкретбетону наносять на сторону опалубки з армуванням шару арматурної сіткою, знімають опалубку, обшивають покрівлею за регульованими напрямними зовнішню сторону каркасу з укладанням теплоізоляційного матеріалу.

Як самонесучий каркас для зведення стін будівлі пропонується каркасоутворюючий елемент, що складається з прямокутних рамок і

перемичок, виконаних з пластмаси, обшитий із зовнішньої і внутрішньої сторони гіпсокартоном або фанерою. У зв'язку з малою несучою здатністю каркаса, його заповнюють легким порізованим бетоном.

Запропоновано для зведення стін, перекриттів і плит покриття будівлі збірний металевий арматурний каркас, що складається з трьох основних елементів – об'ємної тривимірної панелі і двох типорозмірів плоскої балки-ферми. Після складання секції будівлі каркас бетонують легкою бетонною сумішшю (полістиролбетоном) без застосування опалубки.

Аналіз наведених способів зведення тонкостінних просторових конструкцій показує недостатність несучої здатності самонесучих каркасів і остовів, незабезпеченість спільної роботи зовнішніх і внутрішніх обшивок, нераціональність армування конструкції, а також відсутність рішень щодо полегшення самої конструкції.

1.3. Унікальні технології улаштування криволінійних залізобетонних конструкцій

Для зведення будівель або споруд криволінійної форми застосовують як звичайне бетонування, технології 3D-моделювання та 3D-друку так в більшості випадків і торкрет-технології [17–25].

Голландське архітектурне бюро Джанджапа Руджссарса *Universe Architecture* планує реалізувати проєкт під назвою *The Landscape House* [25]. Будівельний 3D-принтер роздруковує задані програмою об'ємні секції будівлі з суміші піску і сполучного матеріалу розміром 6×9 м практично будь-якої форми прямо на будівельному майданчику. Почати планують з житлового будинку площею 1100 м² в формі нескінченної стрічки Мебіуса (рис. 1.2).

Вченими Швейцарської вищої технічної школи Цюріха в рамках проєкту *Mesh Mould* був розроблений спосіб 3D-друку безперервних конструкцій для створення великих геометрично складних структур [17].

Дослідники займаються розробкою інноваційного процесу для роботизованого створення опалубки, а також арматури. Нова технологія покликана зробити можливим виробництво складних конструкцій прямо на будівельному майданчику (рис. 1.3).

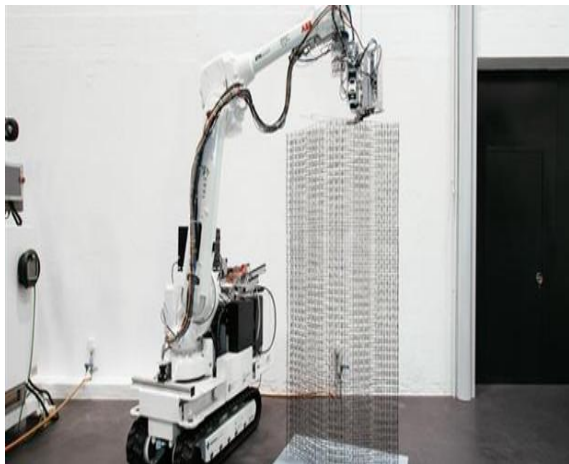


а



б

Рис. 1.2. Проєкт The Landscape House [25]:
а – загальний вигляд; б – конструкція поверху



а



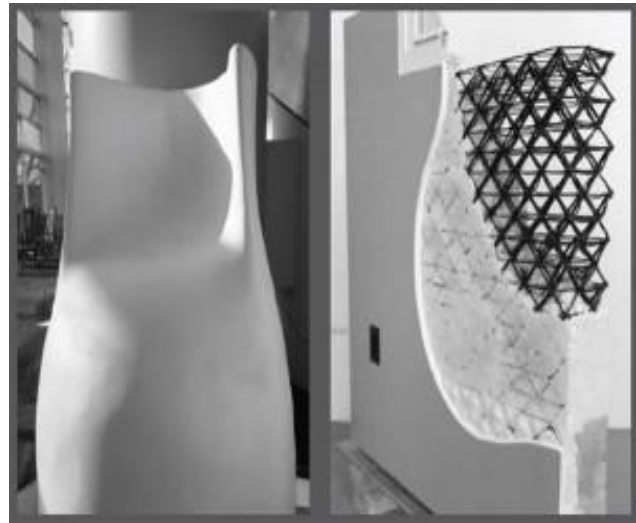
б

Рис. 1.3. Проєкт *Mesh Mould*:
а – створення сталевих арматурних каркасів [17];
б – процес укладання бетонної суміші [18]

Компанія *Branch Technology* з міста Чаттануга, штат Теннессі, США оголосила про підготовку до початку будівництва першого в місті Чаттануга 3D-друкованого будинку з використанням інноваційного методу 3D друку: *3D printing Cellular Fabrication (C-Fab)*. Конструкція готових виробів нагадує стільники і проводиться за допомогою промислового робота *Kuka KR 90*, який подає *ABS* пластик, посилений вуглецевим волокном, формуючи складні, великомасштабні структури розміром до 3 м³ [19]. Конструкції складають, по суті, тільки внутрішні опори, які в подальшому можуть бути заповнені монтажною піною або бетоном для створення елементів будівлі (рис. 1.4).



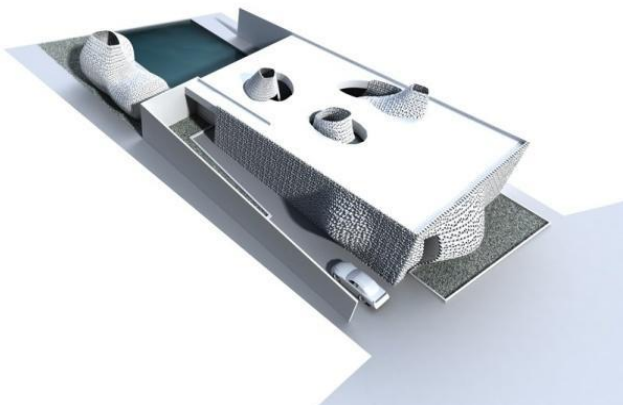
а



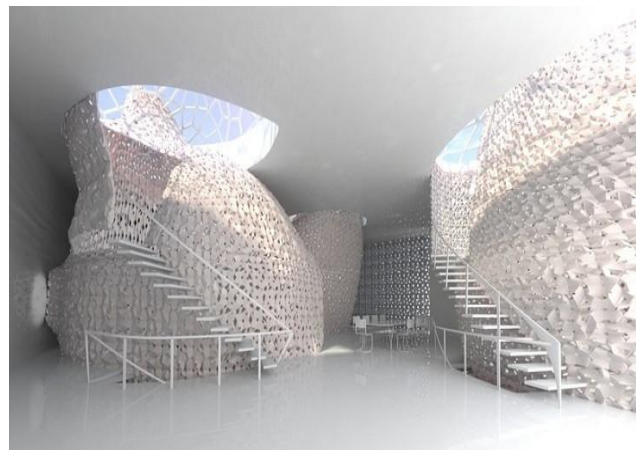
б

Рис. 1.4. Метод *3D printing C-Fab* [19]:
а – неметалевий арматурний каркас; б – фрагмент стіни

Концепція «*3D Printed House 1.0*», яку пропонує компанія *Emerging Objects* [20] має на увазі, що ні каркас будинку, ні повністю вся його внутрішня обробка не будуть виключно продуктами, виготовленими 3D-принтером. При оформленні інтер'єру і під час ведення будівельних робіт допускається використання як класичного способу виробництва, так і технології тривимірної друку декількома 3D-принтерів в зв'язці, кожен з яких відповідає за свою частину роботи (рис. 1.5).



а



б

Рис. 1.5. Проєкт *3D Printed House 1.0* [20]:
а – загальний вигляд; б – внутрішній інтер'єр

Як будівельний матеріал обраний полімерний цемент і сіль для виготовлення елементів конструкції. Зовнішній каркас житла виконують з використанням армованого цементного полімеру [20]. Всі згадані технології застосування 3D-принтерів в будівництві вимагають подальших досліджень для промислового запуску, а також потребують застосування матеріалів, які на порядок дорожче ніж традиційні рішення. Область застосування цих технологій дуже вузька і більш підходить для будівництва одиничних архітектурних споруд.

Розглянемо технології, які знаходять більш широке застосовуються в будівництві та не потребують великих інвестицій при їх впровадженні [21–24]. У Датському технологічному інституті за допомогою спеціального програмного забезпечення і роботизованих маніпуляторів випилують об'ємну зовнішню опалубку з піно полістирольних блоків для традиційного бетонування криволінійної конструкції (рис. 1.6). Для кращого відділення опалубки від забетонованої конструкції запропонована силіконова мембрана товщиною 0,5 мм [23].

Для виготовлення зігнутої стіни, наприклад у Варшавському музеї історії польських євреїв застосований остов з металевих труб [21], до якого у вигляді екрану прикріплені криволінійні листи з водостійкої фанери, посилені спеціальними арматурними сітками (рис. 1.7). Поверхня криволінійних стін після набризку двошарового торкретбетону сухим способом показана на рис. 1.8, б.

Другим можливим варіантом є застосування самонесучого металевого остова, створеного за цифровою моделлю, який повторює форму майбутньої споруди з подальшим набризком з двох сторін торкретбетону. За цією технологією у Великобританії створені конструкції акустичних оболонок, які є сценою і укриттям, при цьому, в мальовничих місцях [22].

Block Research Group, лабораторія на базі Швейцарської вищої технічної школи, продовжує експериментувати з новими будівельними системами [24]. *NEST HiLo shell roof* - черговий проєкт в пошуках альтернативи традиційним системам опалубки, трудомістким і одноразовим, якщо мова йде про складну форму. Оболонку висотою 7 м виділяють три особливості (рис. 1.9):

– крім зовнішніх ребер по периметру, весь простір під дахом під час будівельних робіт залишається вільним, немає потреби в підтримуючих опорах;

– функцію опалубки виконують відразу кілька систем. Спочатку підвішені на крані робочі монтують сітку з тросів, натягнутих між зовнішніми дерев'яними ребрами. До сітки прикріплюється полімерна плівка, яка утримає розчин. Зверху укладається арматура і розпиленням наноситься бетонна суміш (рис. 1.9, а–г);



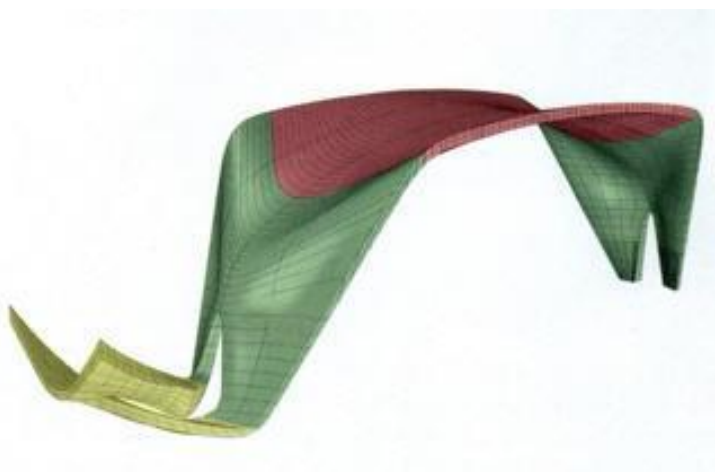
а



б



в



г

Рис. 1.6. Технологія виготовлення криволінійної конструкції:
а, б – опалубка із пінополістиролу; в – виготовлення опалубки;
г – етапи бетонування конструкції [23]



а



б



в

Рис. 1.7. Варшавський музей історії польських євреїв:
а – остов з металевих труб; б – вигнуті стіни музею; в – вигляд зовні [21]



а



б



в

Рис. 1.8. Акустичні оболонки: а – самонесучий металевий остов;
б – процес торкретування; в – вигляд оболонки [22]



а



б



в



г

Рис. 1.9. Проєкт *NEST HiLo shell roof*: а – монтаж сітки з тросів; б – закріплення полімерної плівки; в – укладання арматури; г – нанесення бетонної суміші першого шару; д – нанесення бетонної суміші другого шару; е – готова конструкція [24]

1.4. Експериментальне моделювання при бетонуванні складних архітектурних конструкцій методом мокрого торкретування

На цьому етапі досліджень було необхідним створення самонесучого остова, що складається з просторового криволінійного арматурного каркаса і вкладишів-порожниноутворювачів, що не виймаються, які утворюють жорстку конструкцію з мінімальними витратами на її виготовлення, а також розширення технологічних можливостей

застосування торкрет-бетону для безопалубочного бетонування. Завданням було створення технології зведення полегшених залізобетонних конструкцій криволінійної форми за допомогою набризку мокрим способом та застосування незнімної опалубки із вкладишів із пінополістиролу щільності 15 кг/м^3 .

У результаті набризку бетонної суміші на поверхню утворюється ущільнений шар торкрет-фібробетону, властивості якого в ряді випадків вище, ніж у бетону, що ущільнюється. Торкрет-бетон має підвищену механічну міцність при стисненні і розтягуванні, водонепроникність, краще зчеплення з поверхнею оброблюваної конструкції, швидше набирає міцність при рівних умовах догляду за бетоном.

Застосування неметалевої фібри як армуючого компоненту торкрет-бетону підвищує його здатність до пластичної деформації, тріщиностійкість, міцність при розтягуванні і згині, опір до динамічних і вогневих впливів.

Були запроєктовані чотири криволінійні оболонки, що представляють собою фрагменти циліндра, сфери, ногоїда і гіпару (рис. 1.10–1.13). Конструкції мають у плані розміри $2,2 \times 2,2 \text{ м}$ і висоту від 1,1 до 1,6 м. Товщина стінок оболонки становила 26 см, з яких 16 см відводилося на товщину вкладишів і по 5 см із зовнішньої і внутрішньої сторони – на залізобетонні обшивки.

Для ефективного зведення елементів будівлі криволінійної форми за технологією набризку мокрим способом запропонований самонесучий остов, який забезпечує створення конструкцій із довільною геометрією, а також нанесення на нього торкрет-фібробетону з подальшим набором їм необхідної міцності.

Самонесучий остов, що складається з просторового криволінійного арматурного каркаса і вкладишів формує задану кривизну елемента будівлі.

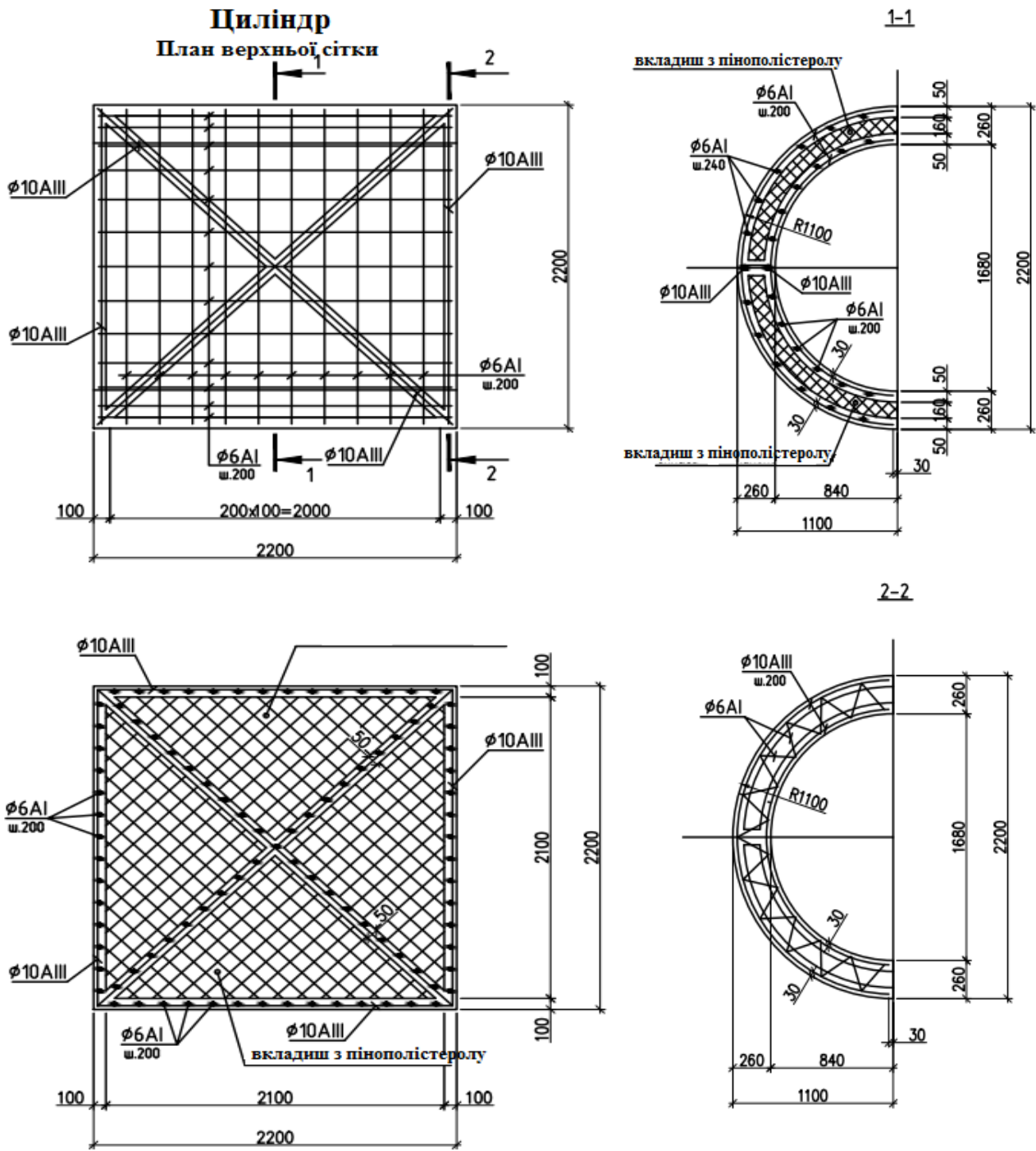


Рис. 1.10. Топологія формувачих елементів фрагмента циліндра

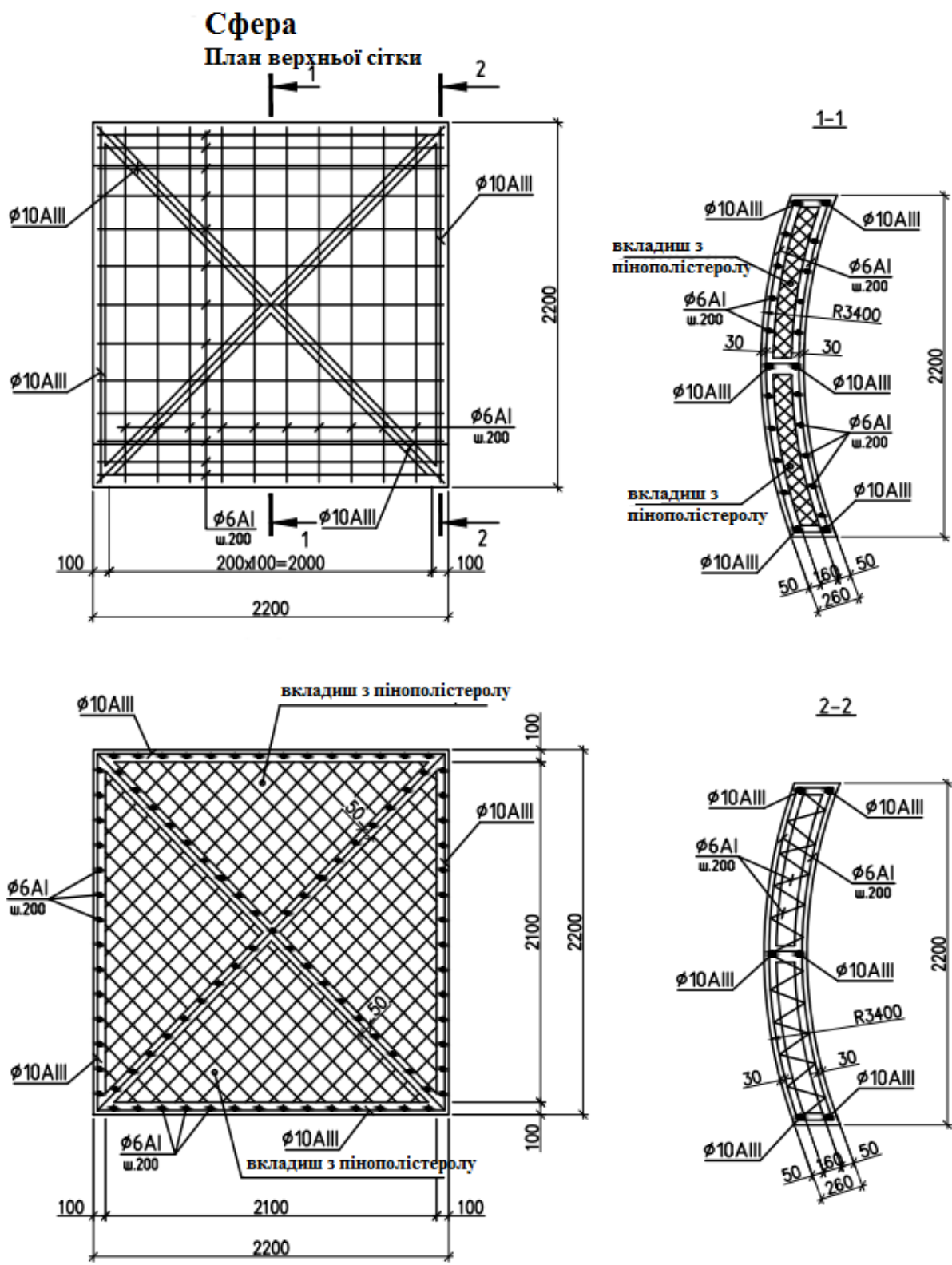


Рис. 1.11. Топологія формувальних елементів фрагмента сфери

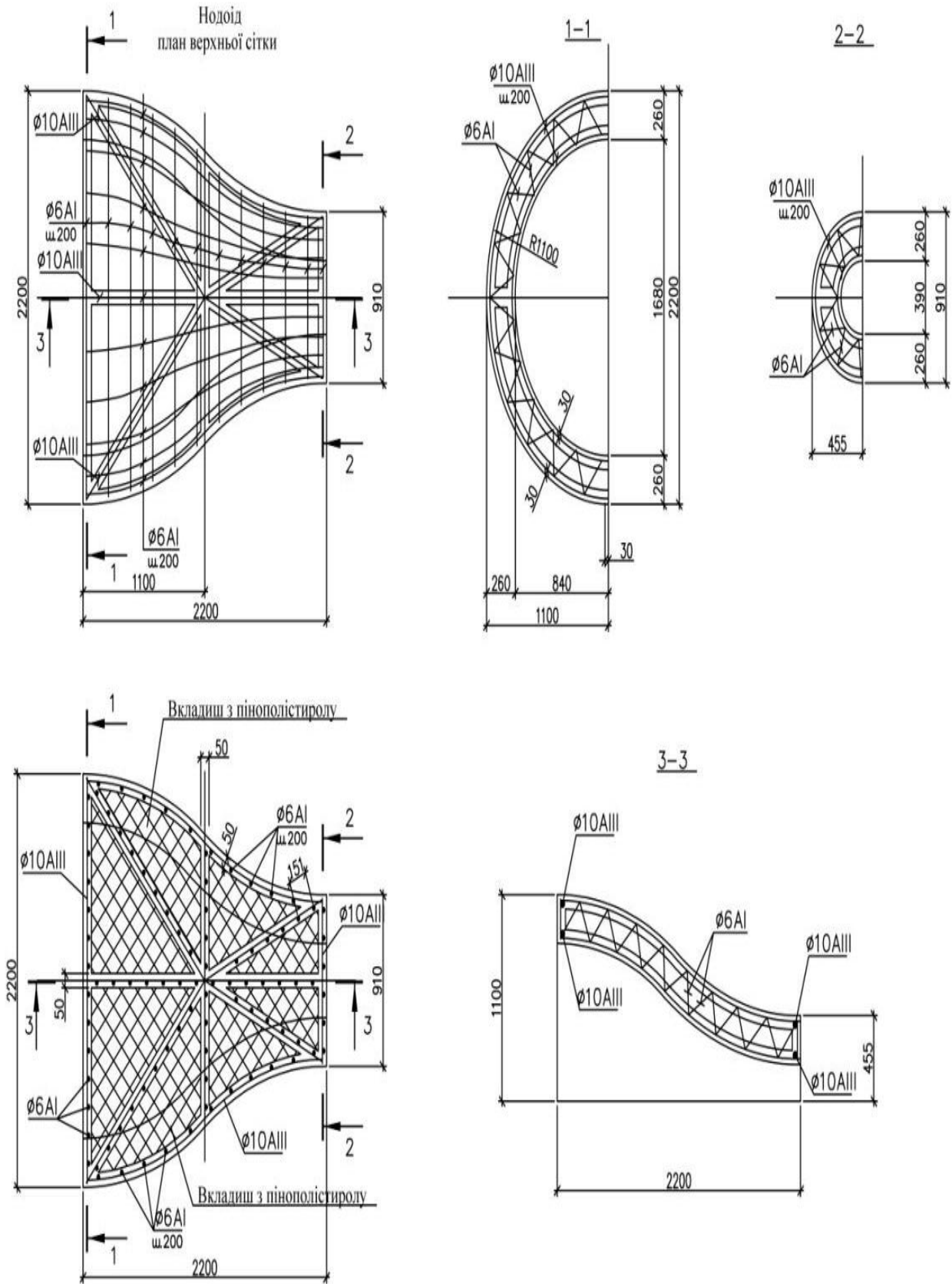


Рис. 1.12. Топологія формувальних елементів фрагмента нодоїда

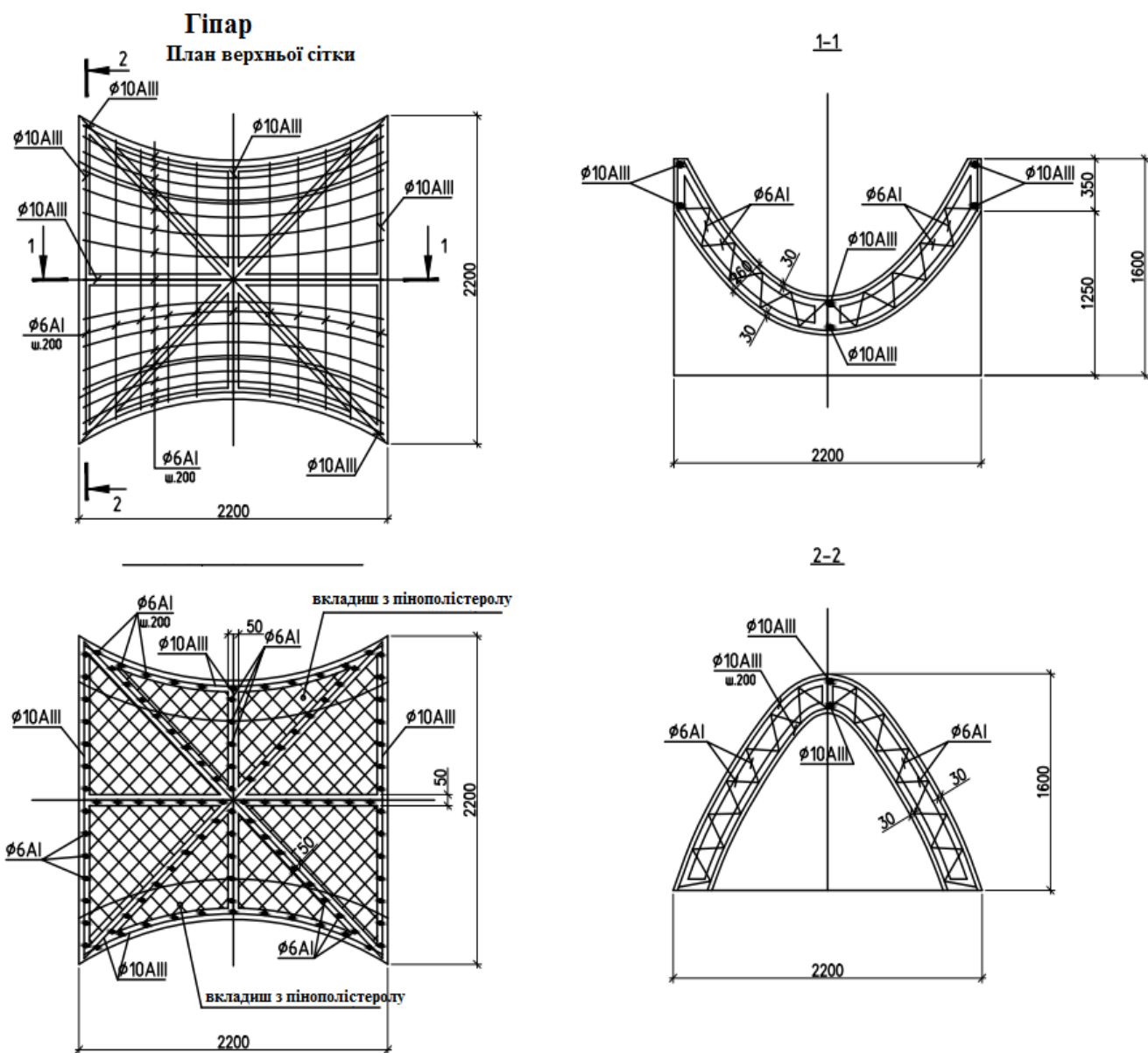


Рис. 1.13. Топологія формотворчих елементів фрагмента гіпару

Фундамент виготовляють із випусками арматури, до яких прикріплюють самонесучий остов. Остов збирається із зовнішньої і внутрішньої криволінійної арматурної сітки з квадратними або прямокутними чарунками, між якими розміщуються криволінійні (за формою остова) вкладиші з пінополістиролу або мінеральної вати, а з'єднання зовнішньої та внутрішньої сітки між собою виконується криволінійними плоскими каркасами з трикутними чарунками (рис. 1.14, 1.15).



а



б



в



г



д

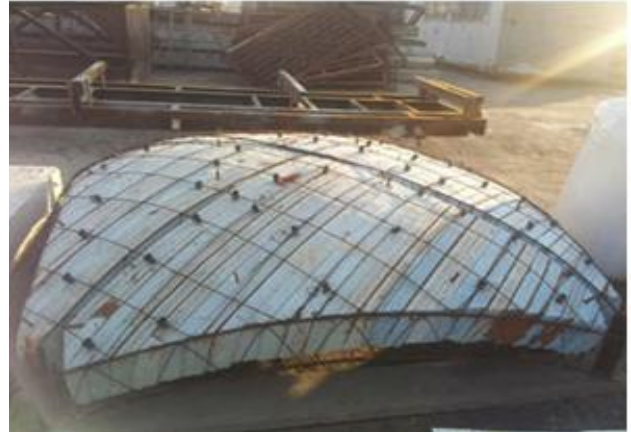


е

Рис. 1.14. Елементи самонесучого остова залізобетонних оболонок:
а–г – елементи остова для фрагмента циліндра, сфери, нодіда та гіпару;
д – верстат для розкрою листів пінополістиролу; е – процес установки
вкладишів в остов



а



б



в



г



д



е

Рис. 1.15. Самонесучі остови залізобетонних оболонок:
а–г для циліндра, сфери, нодоїда та гіпару; д – вид фрагмента
плоского каркасу; е – розташування вкладишів у самонесучому остові

Максимальний діаметр арматурних стержнів плоского каркасу ребер в 2–4 рази більше діаметра стержнів зовнішньої і внутрішньої

сітки (рис. 1.15, а–г). Криволінійні плоскі каркаси формують жорстку сітку ребер між зовнішньою і внутрішньою криволінійною арматурною сітками трикутної або прямокутної форми з розміром сторони не більше 100 см. Розміщення вкладишів забезпечує в межах само несучого остова заповнення простору між криволінійними плоскими каркасами із зазорами між вкладишами 5 см (рис. 1.14, е; 1.15).

Закріплення вкладишів всередині самонесучого остова виконується для забезпечення відстані не менше 2 см від краю вкладиша до центра ваги арматури зовнішньої і внутрішньої криволінійних арматурних сіток. До криволінійних плоских каркасів у площині внутрішньої криволінійної арматурної сітки прикріплюються смуги сітки Рабітца або просічно-витяжного листа, які разом із вкладишами формують суцільний екран для набризку торкрет-фібробетону.

Розмір просвіту чарунок просічно-витяжного листа залежить від максимальної фракції заповнювача в складі торкрет-фібробетону. Для фракцій 0–5 і 5–10 мм розмір просвіту чарунки – 7×50 або 8×49 мм. Розкрій листів пінополістиролу товщиною 5 см здійснюється на верстатах таким чином, щоб отримати в площині листа криволінійні елементи для склеювання їх в окремих вкладишах необхідної кривизни (рис. 1.14, е).

При цьому криволінійні елементи можуть бути склеєні по довжині із складових частин, що забезпечує оптимальний розкрій листа пінополістиролу і мінімізацію відходів. Наведена товщина елементів будівель криволінійної форми може становити 40–50% від конструктивної за рахунок застосування в якості вкладишів пінополістиролу, що у підсумку обумовлює мінімізацію ваги конструкцій.

Для контролю товщини набризку шару торкрет-бетону із зовнішньої і внутрішньої сторони під вкладиші вставляються обрізки арматурних стержнів на відстань близько 10 см один до одного, які служать маяками (рис. 1.15, е). Бетонна суміш спочатку набризкувалась із зовнішньої сторони в зазор між вкладишами до тих пір, поки рівень укладеної бетонної суміші не перевищить рівня вкладишів, а потім виконується бетонування верхньої і нижньої частини елемента криволінійної форми (рис. 1.16).

Для набризку мокрим способом торкрет-бетону використовувався прямотруменевий розчинобетонасос із тарілчастими клапанами і горизонтальним розташуванням циліндрів (рис. 1.16, а).



а



б



в



г



д



е

Рис. 1.16. Бетонування монолітної залізобетонної оболонки:
а – торкрет-установка; б – заповнення ребер; в – торкретування зовнішньої обшивки; г – нанесений перший шар торкрет-бетону на зовнішню сторону остова; д – зовнішній вигляд торкрет-бетону перед нанесенням фінішного шару; е – торкретування внутрішньої обшивки

Характерною особливістю застосованого малогабаритного прямоструменевого двопоршневого розчинобетононасосу є можливість ефективно працювати, перш за все, на малорухомих бетонних сумішах і широкому діапазоні будівельних сумішей.

При проведенні експериментів з обладнанням для набризку бетонної суміші використано сопло з кільцевою насадкою, яке забезпечило вирівнювання швидкостей повітряного потоку по всьому перетину і дозволило отримати факельне, концентроване подання будівельної суміші стисненим повітрям. Як видно на рис. 1.16, використання торкрет-сопла з кільцевою насадкою забезпечує процес набризку бетонної суміші практично без відскоку від поверхні.

Кривизна отриманої форми елемента будівлі після закінчення торкретування контролювалася заздалегідь виготовленими лекалами. Для забезпечення гладкої поверхні конструкції залізобетонних оболонок наносили під затирання додатковий шар торкрет-фібробетону товщиною 5–7 мм на піску, при цьому затирання робили до початку тужавлення цементу (рис. 1.17).



а



б



в



г

Рис. 1.17. Забетоновані монолітні залізобетонні оболонки: а – фрагмент циліндра; б – фрагмент сфери; в – фрагмент нодоїда; г – фрагмент гіпару

В якості дисперсної арматури використовувався ровинг базальтовий рубаний (фібра) виробництва ТОВ «Технобазальт-Інвест». Бетонування відбувалося за двостадійною технологією. Спочатку виконувався набрызк першого шару торкрет-фібробетону із зовнішньої сторони монолітних залізобетонних оболонок, а потім із внутрішньої.

Запропонована технологія бетонування мокрим торкретуванням дозволяє ущільнювати бетонну суміш без вібрації і застосовувати незнімну опалубку у вигляді вкладишів із пінополістиролу або мінеральної вати.

Ці особливості технології необхідні для отримання різних за конфігурацією елементів конструкції. На відміну від укладання звичайного і самоущільнюючого бетону в запропонованій технології здешевлюється вартість будівництва за рахунок відсутності складної, вартісної індивідуальної опалубки.

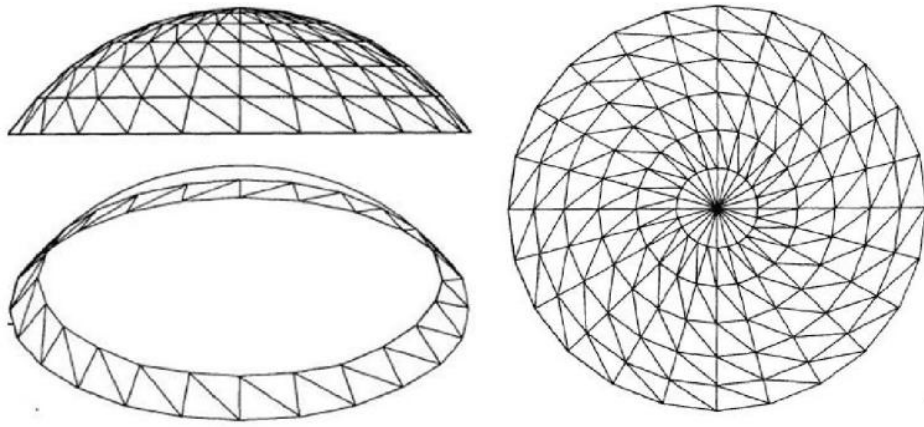
1.5. Оптимізація параметрів розкрою вкладишів для улаштування незнімної опалубки

В основу розробки поставлено завдання створення технології виготовлення вкладишів із пінополістиролу для зведення криволінійних залізобетонних конструкцій.

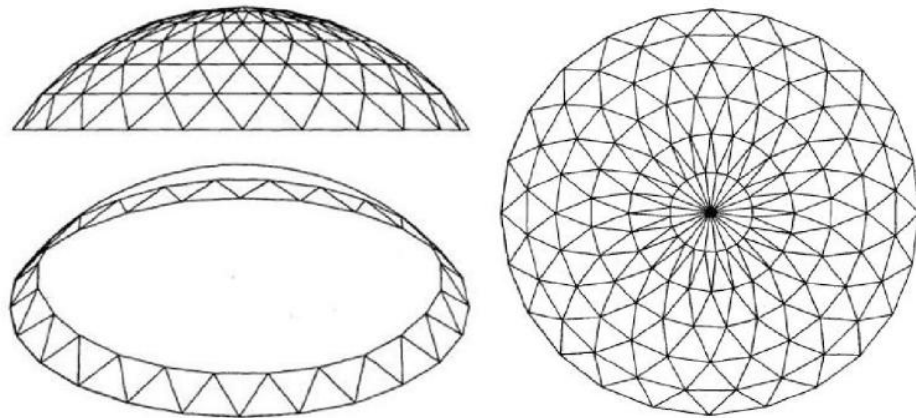
Напівсферичну оболонку можна створити із застосуванням системи «Монофант» [26–32] із різними варіантами конструкції просторового криволінійного арматурного каркаса на рис. 1.18–1.20.

Усі наведені конструкції напівсферичної оболонки вимагають виготовлення незнімної опалубки, що складається з вкладишів трикутної форми, що розміщуються в осередках самонесучого остова.

При цьому, якщо проектувати напівсферичну залізобетонну конструкцію з прямолінійним планом у вигляді трикутника, прямокутника, п'ятикутника, шестикутника і восьмикутника, можливі варіанти зведення будівель і споруд, що складаються з декількох напівсфер, які стикаються бічними гранями, що розширює діапазон архітектурних форм, що формуються (рис. 1.21).



а



б

Рис. 1.18. Спосіб формування напівсферичної поверхні сферичними кільцями: а – з ліводіагональним розподілом решітки; б – з двостороннім діагональним розподілом решітки

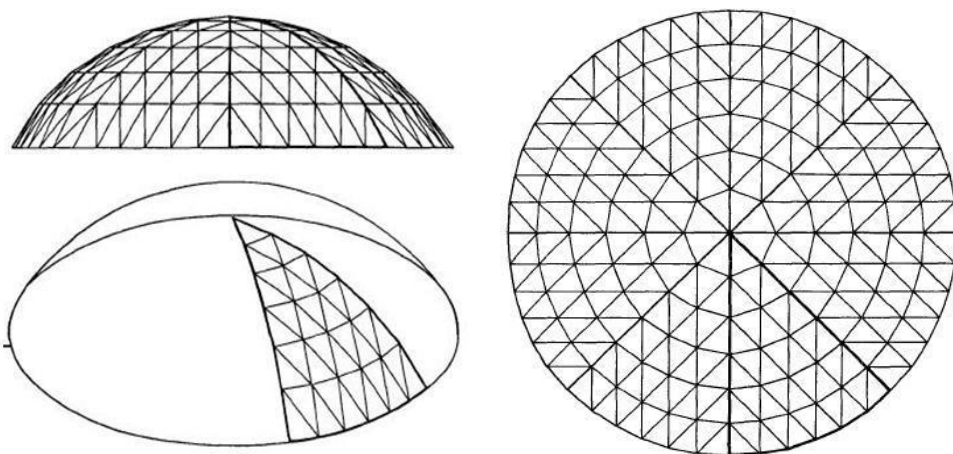


Рис. 1.19. Спосіб формування напівсферичної поверхні сферичними сегментами з паралельним розподілом решітки

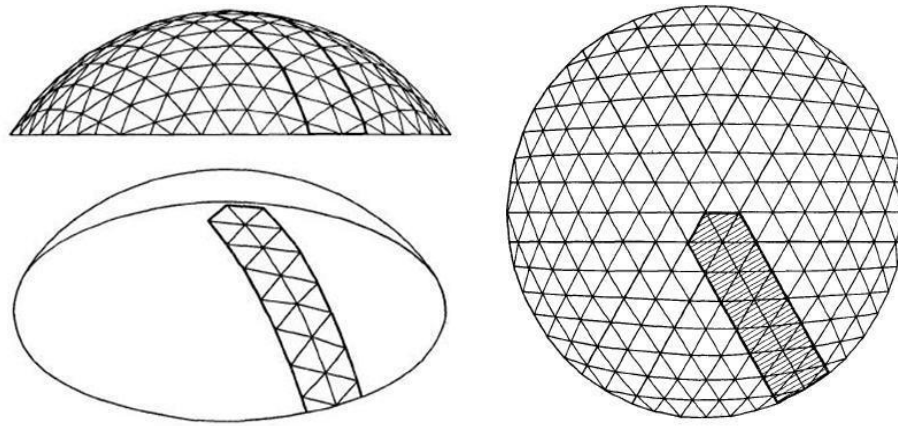


Рис. 1.20. Способи формування напівсферичної поверхні сферичними смугами з шестикутним розподілом решітки

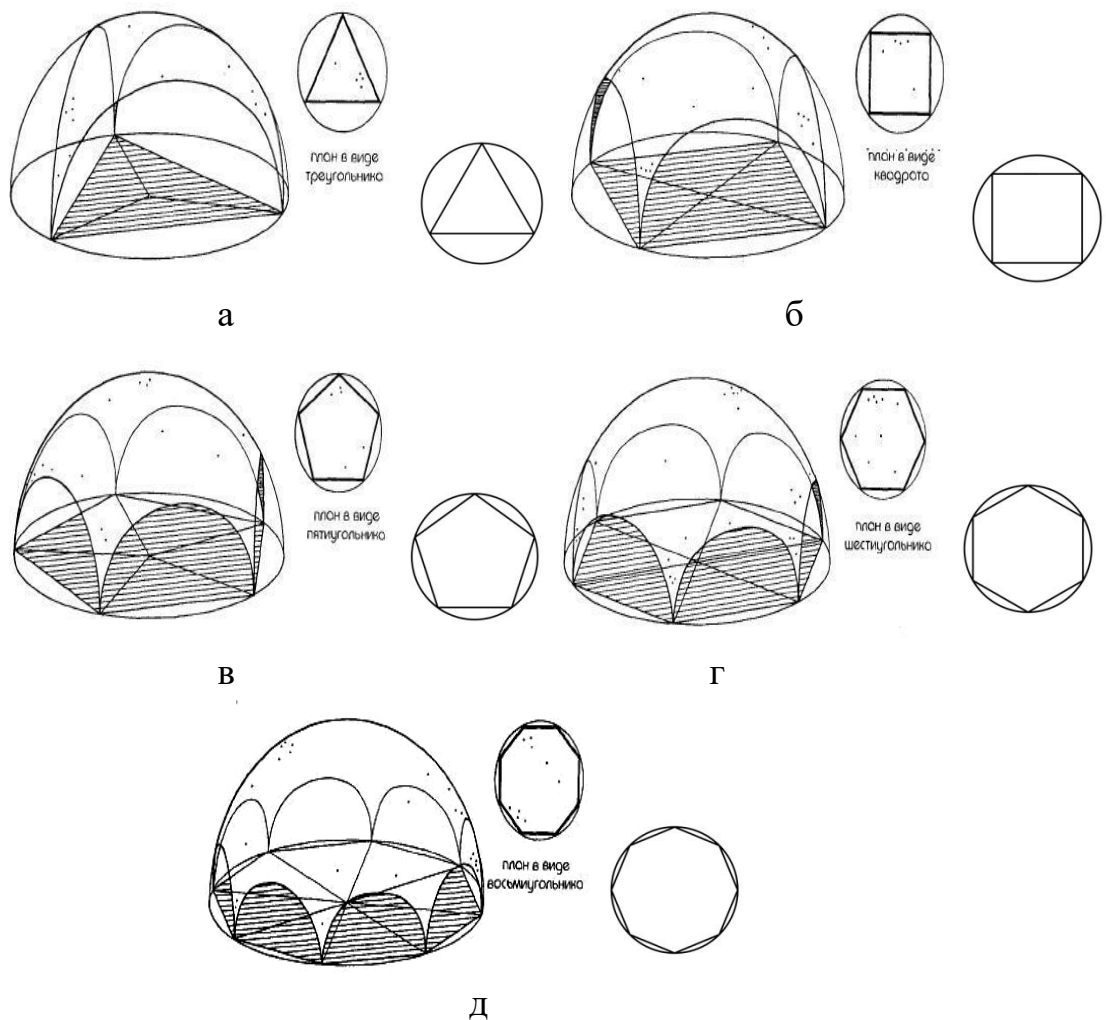


Рис. 1.21. Напівсферичні поверхні для геометрії прямолінійного плану:
 а – план у вигляді трикутника; б – план у вигляді квадрата;
 в – план у вигляді п'ятикутника; г – план у вигляді шестикутника;
 д – план у вигляді восьмикутника

Розроблена технологія виготовлення залізобетонних конструкцій криволінійної форми була випробувана при зведенні фрагмента сферичної оболонки, що має в плані розміри 2,2×2,2 м (рис. 1.11, 1.14). Для виготовлення вкладиша, який повторює криволінійну форму конструкції, нами запропонований метод його виготовлення з окремих плоских елементів, які можуть бути вирізані з прямокутного плоского листа пінополістиролу за допомогою верстата (рис. 1.14, е).

При цьому основним завданням є зменшення відходу при розкрої плоского прямокутного листа пінополістиролу і максимальне зменшення кількості елементів у сортаменті для виготовлення вкладиша трикутної форми, що є незмінною опалубкою сферичної форми.

При розбивці вкладиша по радіусу на окремі елементи товщиною від 70 мм до 200 мм визначалися геометричні характеристики, наведені в табл. 1.1. Максимальне відхилення контуру вкладиша від сферичної поверхні склало 0,22–1,82 мм. За основу була прийнята розбивка на елементи товщиною 100 мм.

Таблиця 1.1

Розміри розбивки вкладиша (по радіусу)

Довжина горизонтальної проекції при розбивці на окремі елементи, мм	Довжина хорди при розбивці на елементи, мм	Довжина дуги кола, мм	Висота сегмента кола, мм	Центральний кут, град
1015	1033,41	1039,58	48,98	21,66
200	200,13	200,18	1,82	4,17
150	150,06	150,07	1,02	3,13
100	100,02	100,02	0,46	2,08
70	70,00	70,00	0,22	1,46

Розбивка дозволила отримати сортамент із десяти елементів однакового трапецеїдального перетину, що мають шаблеподібну форму і різну довжину від 2030 до 230 мм, а також одинадцятого елемента з відмінним від інших поперечним перерізом (рис. 1.22).

Такий варіант розкрою дозволяє при виготовленні вкладиша з окремих елементів не переплутати послідовність їх складання і в разі руйнування одного з елементів замінити його на інші з більш дрібних деталей такого ж поперечного перерізу.

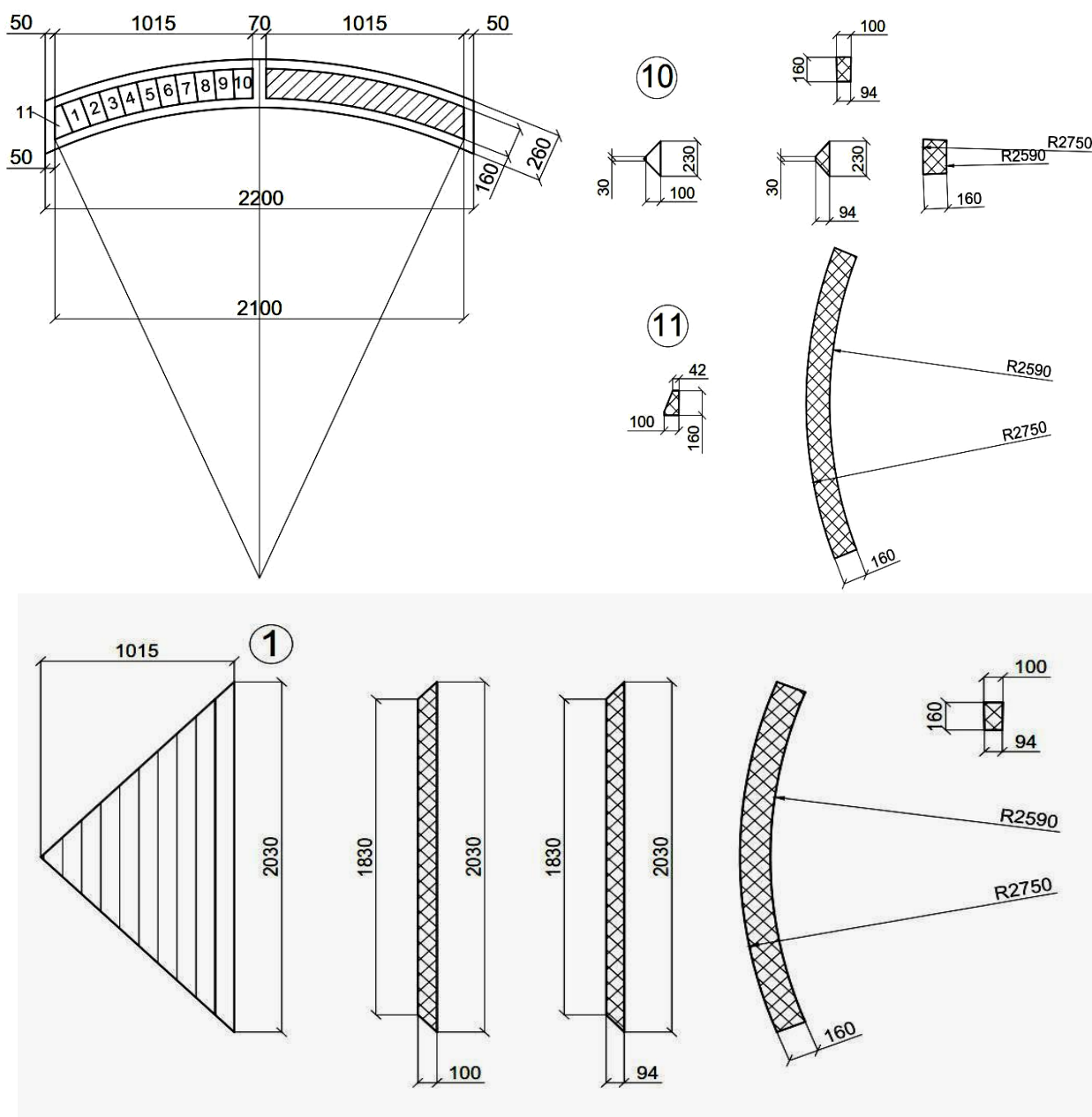


Рис. 1.22. Розкрій вкладиша по радіусу: 1–11 – номери елементів

У зв'язку з чим, розглянуто два варіанти розкрою: на чотири вкладиша і на один вкладиш. При розкрої було введено обмеження: один із розмірів у плані прямокутного листа пінополістиролу залежить від максимального розміру по довжині складового елемента вкладиша

(номер 1 і 11). Отримані результати свідчать про те, що застосування програмного забезпечення для розкрою плоского листа пінополістиролу більш раціонально при розкладці на ньому великої кількості вкладишів, а ручна розкладка може бути застосована тільки при розкрої одного вкладиша на прямокутному аркуші пінополістиролу.

Результати ручного, та із застосуванням програмного забезпечення, розкрою плоского листа пінополістиролу на окремі елементи наведено на рис. 1.23, 1.24 і в табл. 1.2.

Для порівняння був запропонований другий варіант розбивки вкладиша на складові елементи, а саме шляхом розсічення вертикальною площиною. Результати отриманого сортаменту елементів наведені на рис. 1.25.

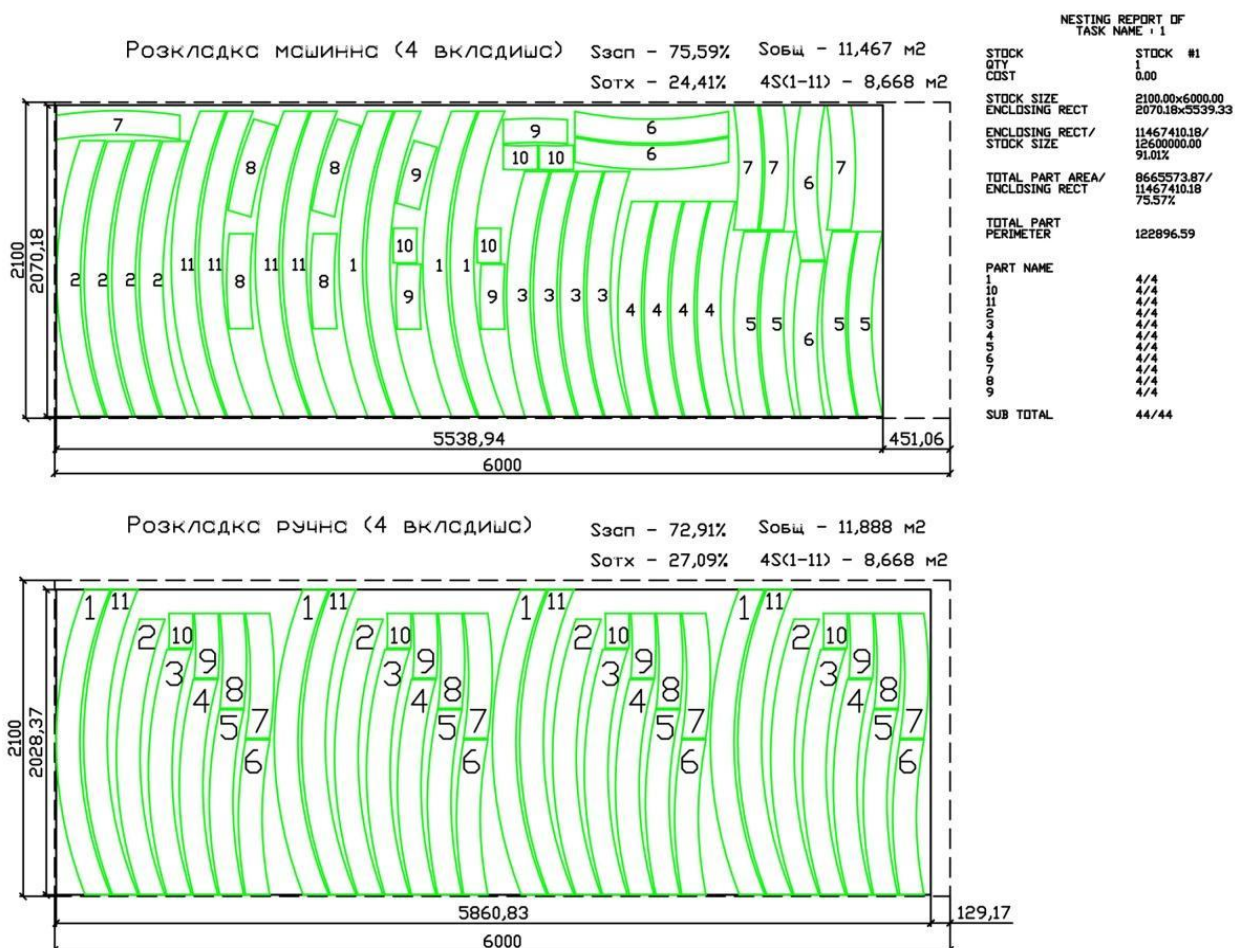


Рис. 1.23. Розкрій прямокутного листа пінополістиролу на чотири вкладиша

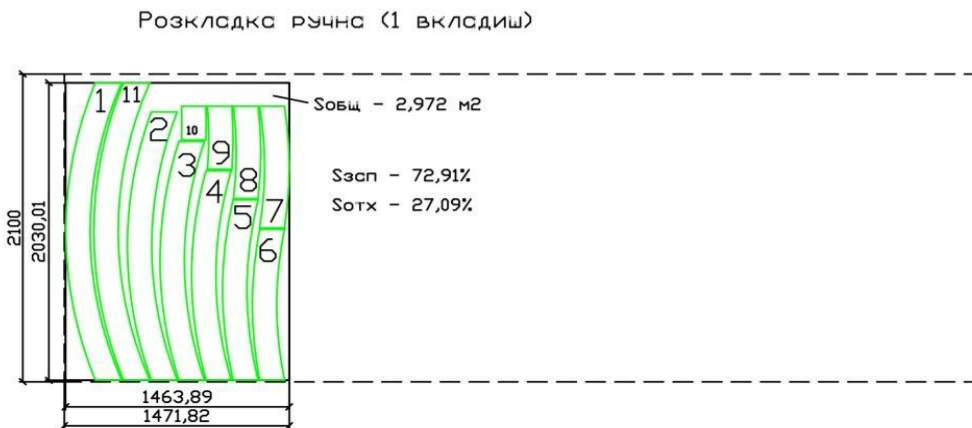
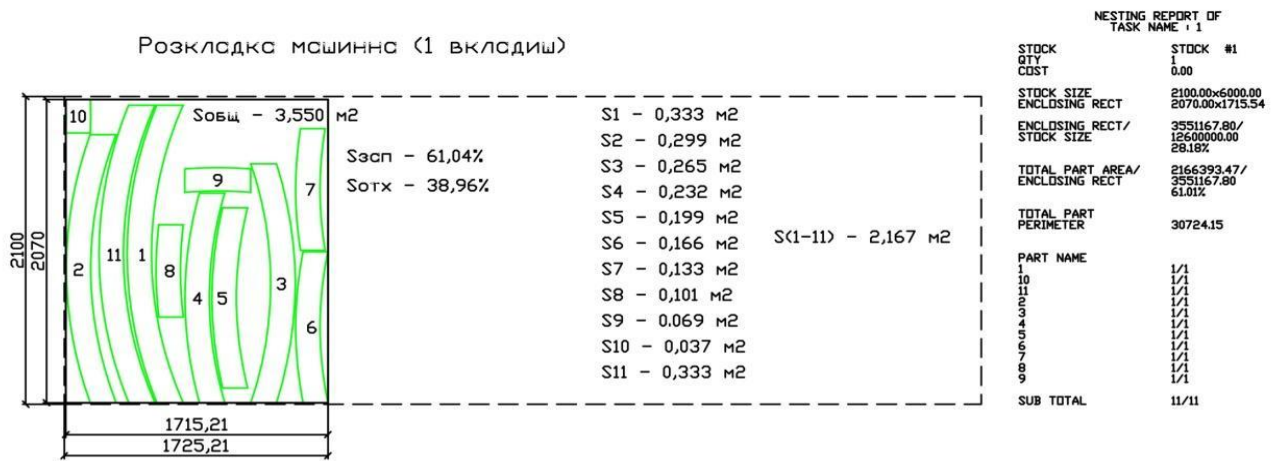


Рис. 1.24. Розкрій прямокутного листа пінополістиролу на один вкладиш

Таблиця 1.2

Результати розкрою плоского листа пінополістиролу на окремі елементи

Кількість вкладишів при розкрої	Варіант розкрою	Площа вкладишів, м ²	Площа листа, м ²	Площа заповнення, %	Площа відходів, %
чотири	машинний	8,67	11,47	75,59	24,41
чотири	ручний	8,67	11,89	72,91	27,09
один	машинний	2,17	3,55	61,04	38,96
один	ручний	2,17	2,97	72,91	27,09

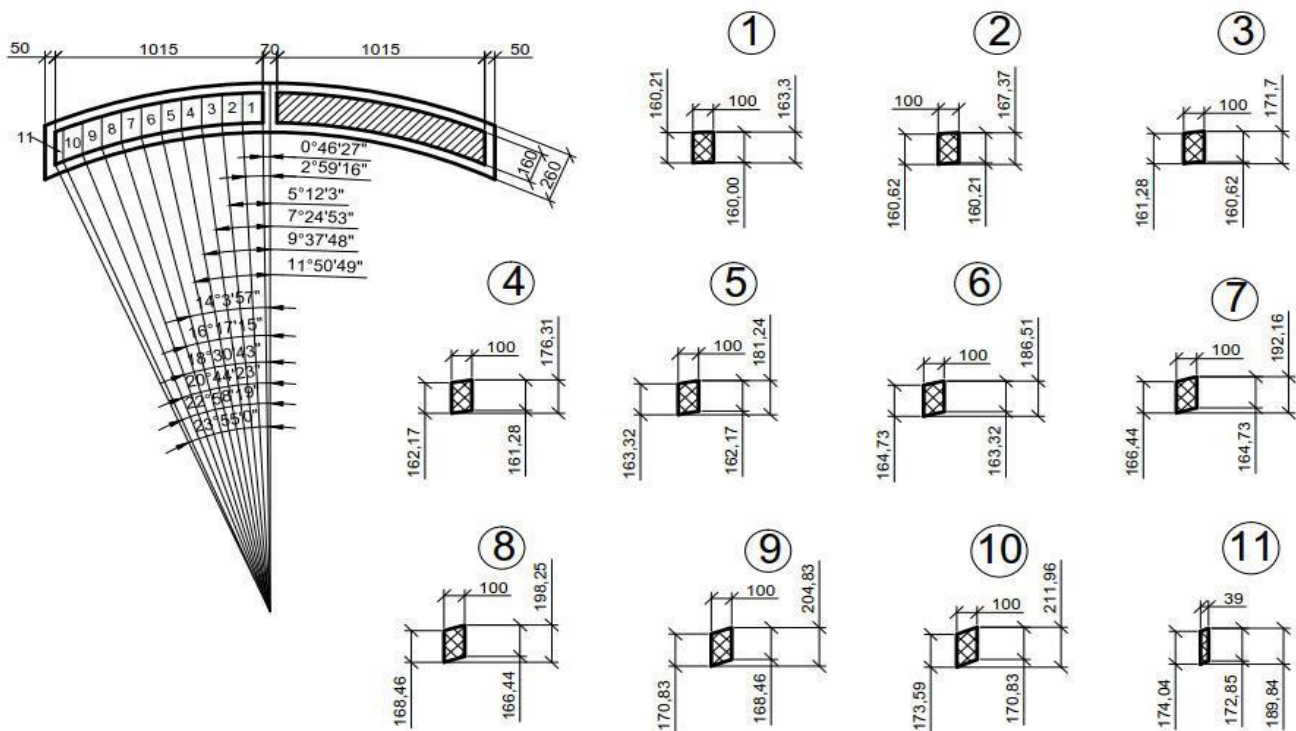


Рис. 1.25. Розкрій вкладки вертикальною площиною:
1–11 – номери елементів

З отриманого сортаменту елементів видно, що всі елементи мають різні розміри в поперечному перерізі. При складанні вкладки потрібно чітко дотримуватися послідовності розміщення складових елементів, а в разі руйнування одного з елементів буде потрібно виготовлення його дублікату, що призведе до неможливості виготовлення одного з вкладишів.

Із табл. 1.2 видно, що машинна розкладка більш вигідна при розкрої на одному прямокутному аркуші пінополістиролу декількох вкладишів, при цьому при практично однаковій площі заповнення 75,59% і 72,91% відповідно, ми отримуємо залишок листа шириною 451 мм, що дозволяє розкроїти ще кілька елементів вкладки і зменшити площу відходів до мінімуму.

Для удосконалення першого варіанта розбивки вкладки на складові елементи був запропонований варіант виготовлення відразу чотирьох вкладишів у вигляді одного цілого вкладки з подальшим його розрізанням на чотири однакові частини по діагоналі (рис. 1.26). Даний варіант дозволяє зменшити кількість типорозмірів до трьох елементів (рис. 1.27). При цьому, з двадцяти трьох елементів, на які проводиться розбивка, двадцять елементів (номер 1) є однаковими, а

елементи під номером 2 і 3 є добірними і встановлюються посередині і по краях одного цілого вкладиша.

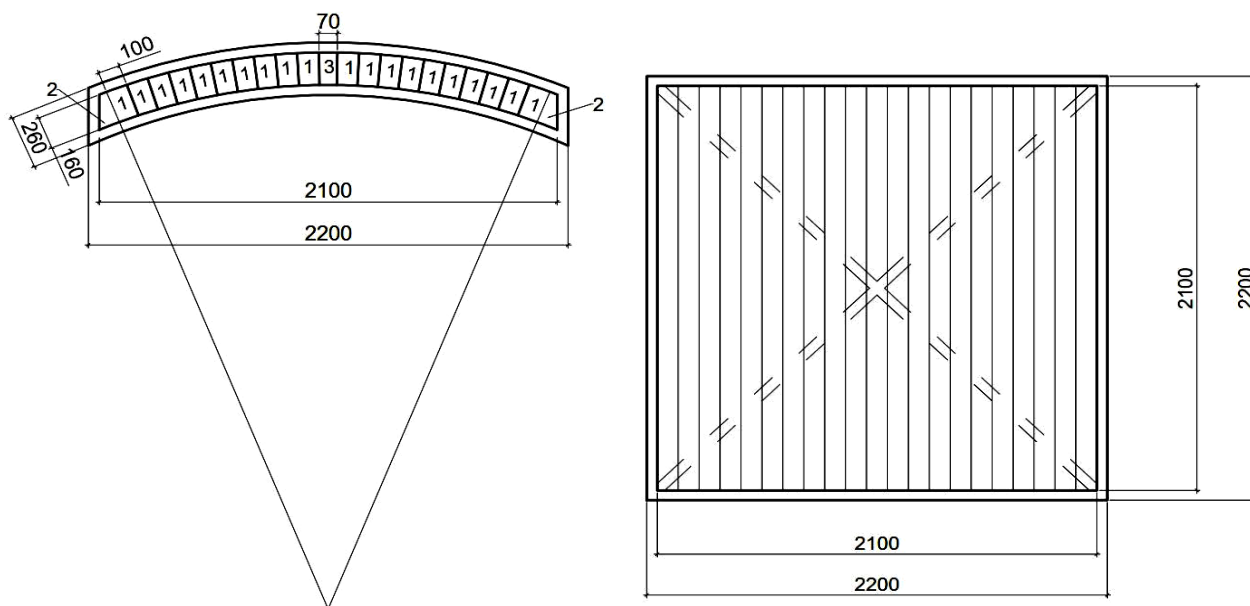


Рис. 1.26. Розкрій чотирьох вкладишів як одного цілого (сфера):
1–3 – номери елементів

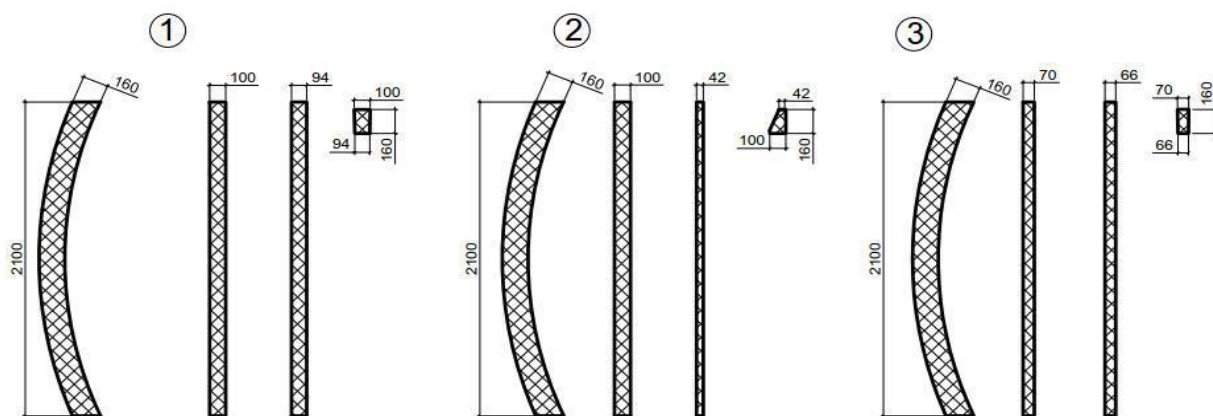
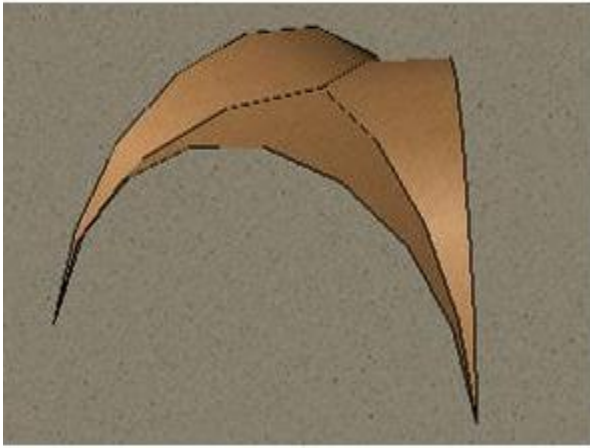
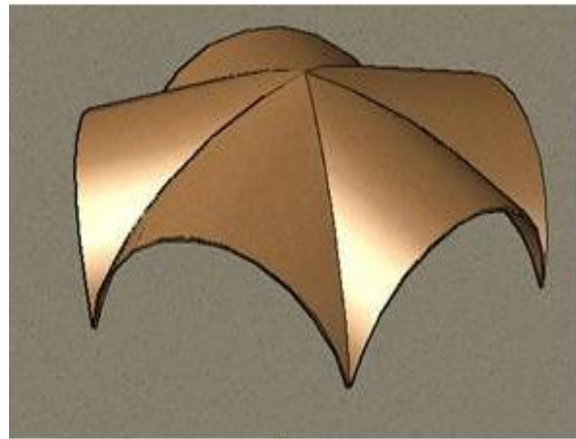


Рис. 1.27. Сортамент елементів для чотирьох вкладишів як одного цілого:
1–3 – номери елементів

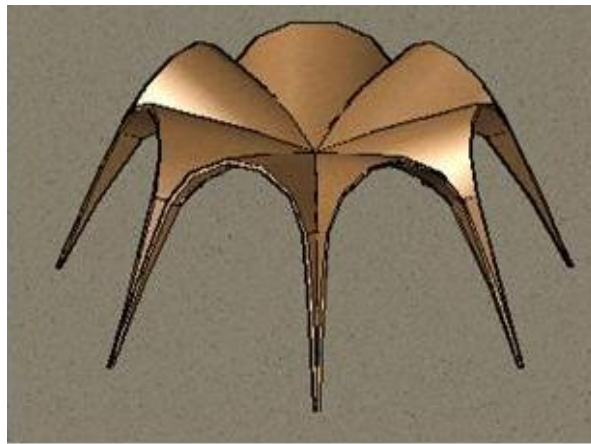
Однакова довжина і форма всіх трьох елементів спрощує розкрій прямокутного листа пінополістиролу і не вимагає застосування програмного забезпечення для оптимізації розкрою. За аналогією з напівсферами можливі варіанти зведення будівель і споруд, що складаються з декількох циліндрів, які стикуються бічними гранями (рис. 1.28).



а



б



в

Рис. 1.28. Несуча конструкція з взаємопроникних
циліндричних поверхонь:
а – три поверхні; б – п'ять поверхонь; в – сім поверхонь

При конструкції внутрішніх ребер оболонки, що проходять по діагоналі, необхідно виготовити чотири вкладиші, що мають два типи розміру (рис. 1.28).

Розбивка кожного вкладиша окремо на складові елементи січною, паралельною одній зі сторін оболонки, призведе до великої кількості типів елементів, що мають однакову форму, але відрізняються довжиною від 230 мм до 2030 мм.

При розбивці кожного вкладиша січною, паралельною або перпендикулярною більшій стороні вкладиша, отримуємо ще більше збільшення типів елементів і їх чіткий поділ для двох типів розмірів вкладиша (рис. 1.29, 1.30).

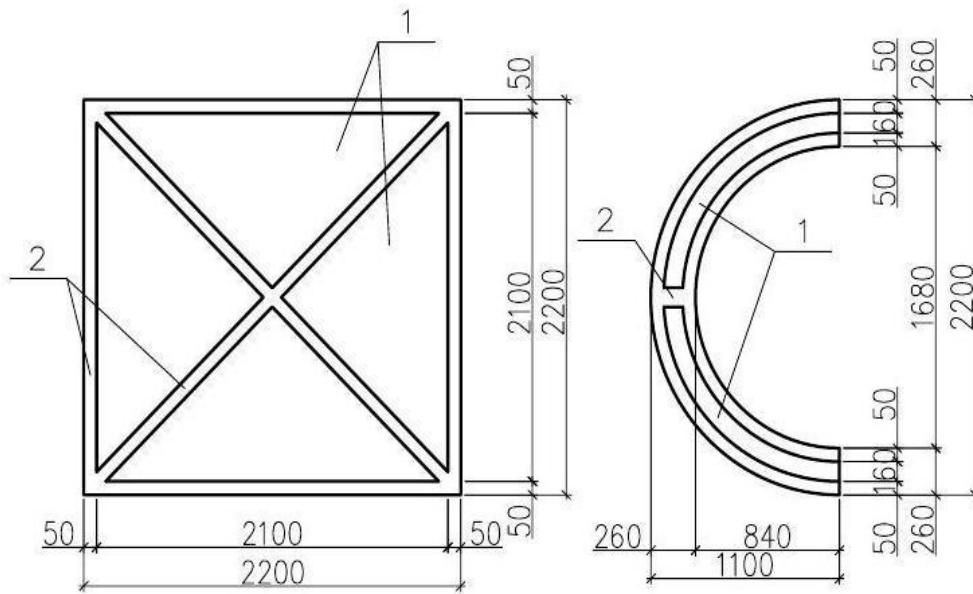


Рис. 1.28. Форма вкладишів циліндричної оболонки:
1 – вкладиш; 2 – внутрішні ребра

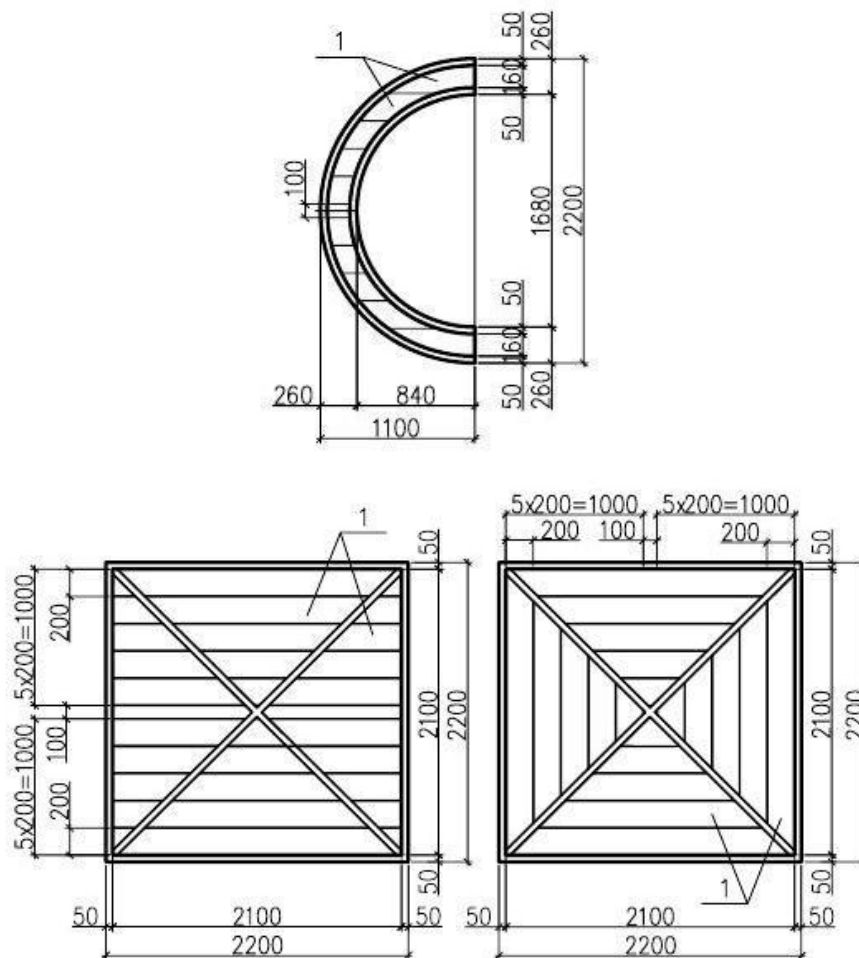


Рис. 1.29. Розкрій кожного вкладиша окремо (варіант 1):
1 – види елементів вкладиша

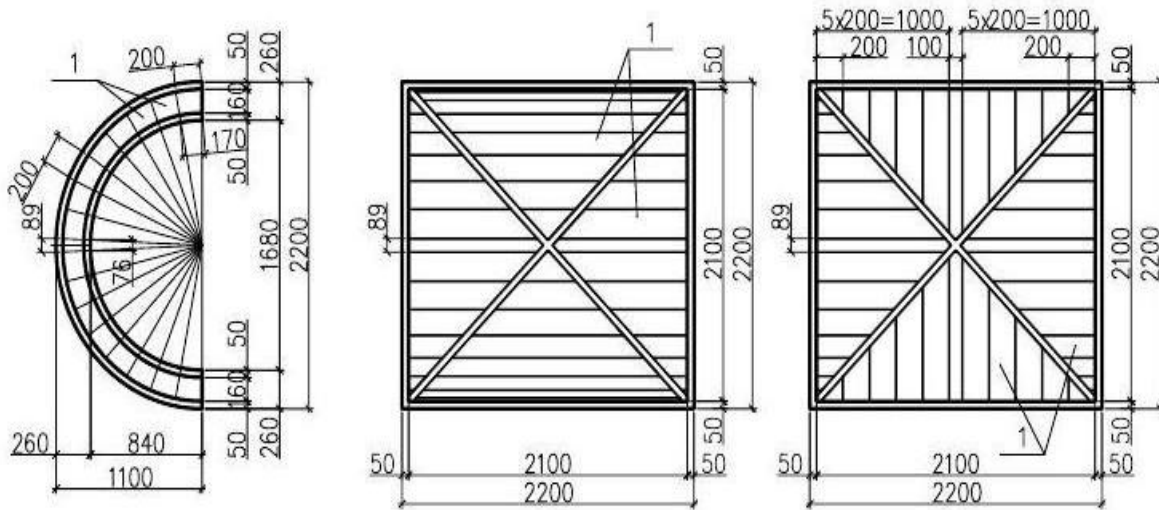


Рис. 1.30. Розкрій кожного вкладиша окремо (варіант 2):
1 – види елементів вкладиша

Для оптимізації розкрою вкладишів нами запропонований варіант виготовлення відразу чотирьох вкладишів у вигляді одного цілого вкладиша з подальшим його розрізанням на чотири частини по діагоналі (рис. 1.31, 1.32). Даний варіант розкрою дозволяє зменшити кількість типорозмірів до двох елементів.

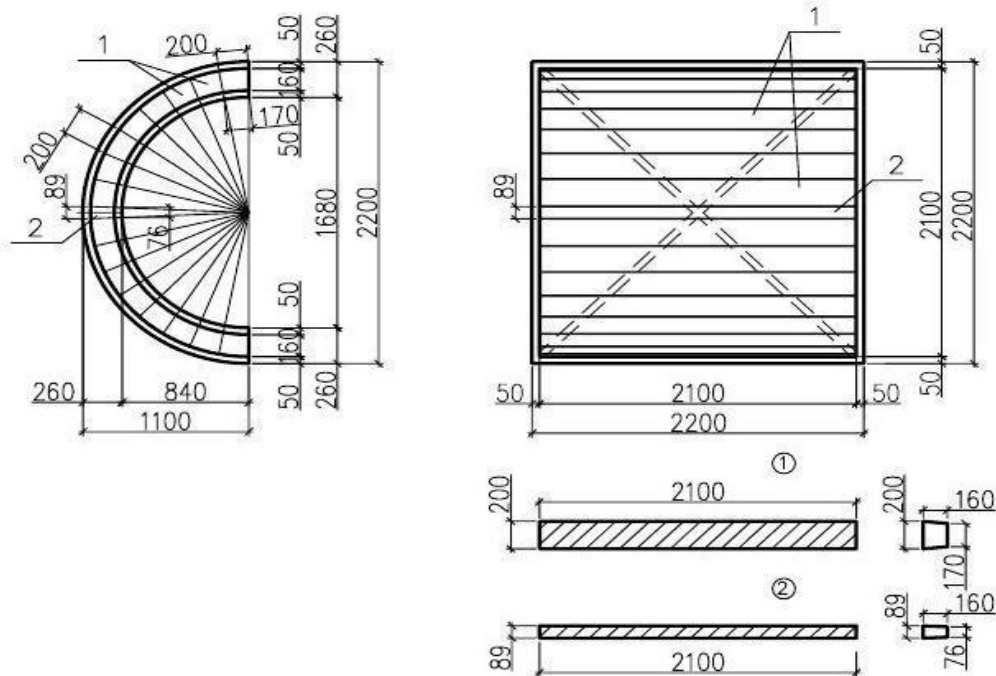


Рис. 1.31. Розкрій чотирьох вкладишів як одного цілого (уздовж циліндра):
1, 2 – номери елементів

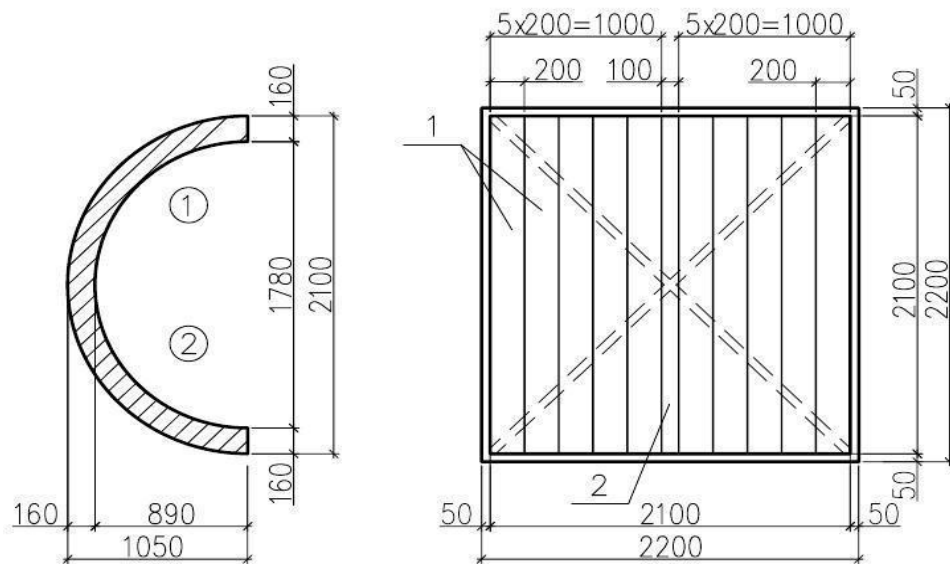


Рис. 1.32. Розкрій чотирьох вкладишів як одного цілого (поперек циліндра):
1, 2 – номери елементів

При розкрії вздовж оболонки виходять всі елементи прямо кутного обрису довжиною 2100 мм (два типи розмірів), але мають трапецієподібний поперечний переріз, що потребує додаткових операцій із розкромом з кожним окремим елементом. Недоліком остаточного складання незнімної опалубки є можливе суттєве відхилення форми отриманої конструкції від циліндричної, і додаткове застосування шаблонів для виправлення неточностей, пов'язаних з особливостями виготовлення вкладишів таким способом.

При розкрії поперек циліндричної оболонки елементи, на які розбивається незнімна опалубка, мають розмір у плані 1050×2100 мм і значну кривизну, що призводить до великого відходу матеріалів при їх виготовленні (рис. 1.33).

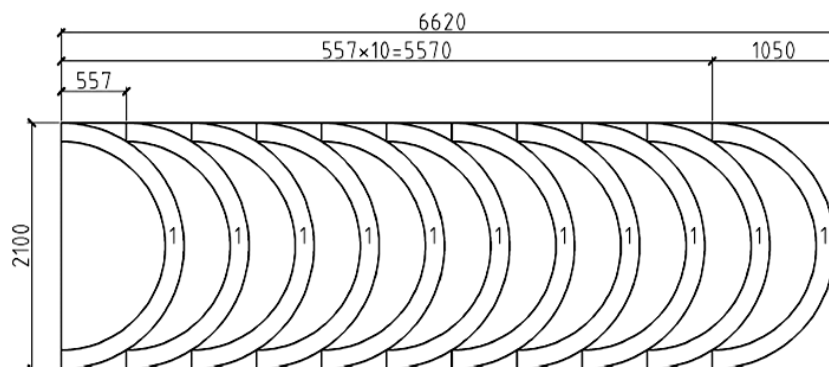


Рис. 1.33. Розкладка елементів (варіант 1): 1 – номер елемента

При остаточному складанні незнімної опалубки забезпечується точність виготовлення вкладишів циліндричної форми. Для оптимізації розкрою елементів, що мають розмір у плані 1050×2100 мм, запропонована додаткова розбивка їх на складові частини 1/2 і 1/4 від довжини дуги (рис. 1.34).

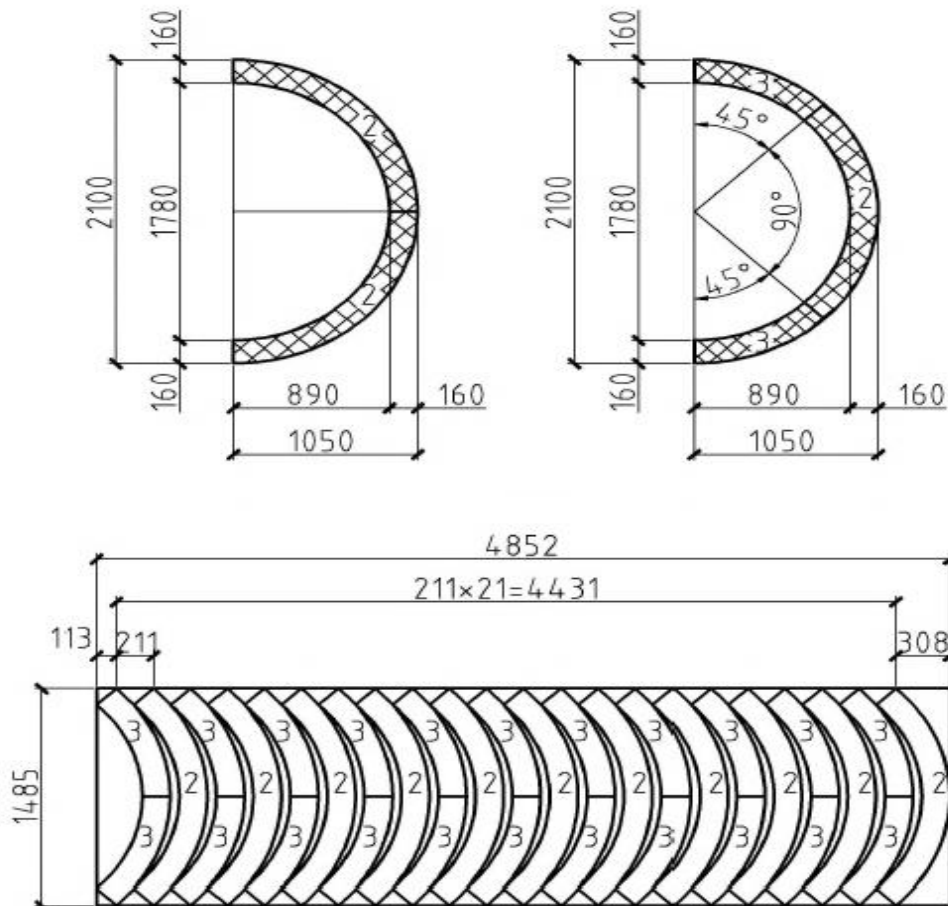


Рис. 1.34. Розкладка елементів (варіант 2):
2, 3 – номери елементів

Чергування при складанні незнімної опалубки елементів 2 + 2 і 3 + 2 + 3 буде забезпечувати не збігання стиків і цілісність отриманої конструкції з пінополістиролу.

Наступний варіант розбивки вкладишів у радіальному напрямку (рис. 1.35) дозволить ще більше знизити витрату матеріалів. Збірка вкладишів незнімної опалубки при чергуванні елементів 4 + 5 + 6, 5 + 6 + 4, 6 + 4 + 5 дозволить забезпечити збігання стиків через три ряди сегментів.

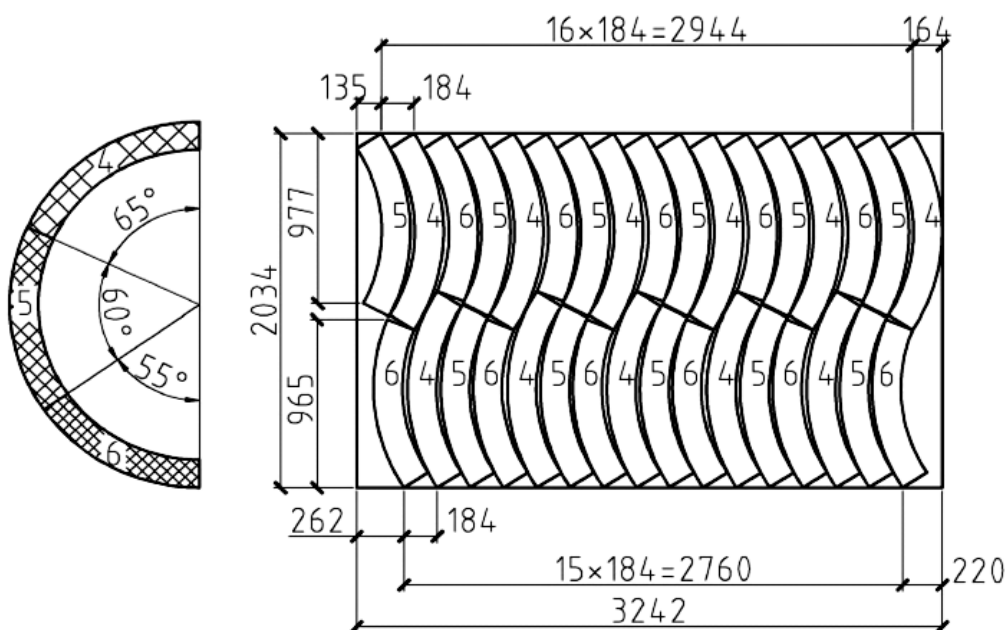


Рис. 1.35. Розкладка елементів (варіант 3):
4, 5, 6 – номери елементів

Довжина перекриття стиків може бути розрахована, виходячи з довжини хорди L :

$$L = 2R \left(\frac{\sin \alpha}{2} \right) L = 2R \left(\frac{\sin \alpha}{2} \right) \quad (1.1)$$

де R – радіус кола;
 α – центральний кут.

Другий і третій варіанти розбивки на елементи суттєво зменшують витрати матеріалу при розкрії листа пінополістиролу прямокутної форми (табл. 1.3).

Як видно з табл. 1.3, більш економічним із точки зору витрат матеріалу і за щільністю упаковки є розкрій вкладишів за третім варіантом, який представлено на рис. 1.35.

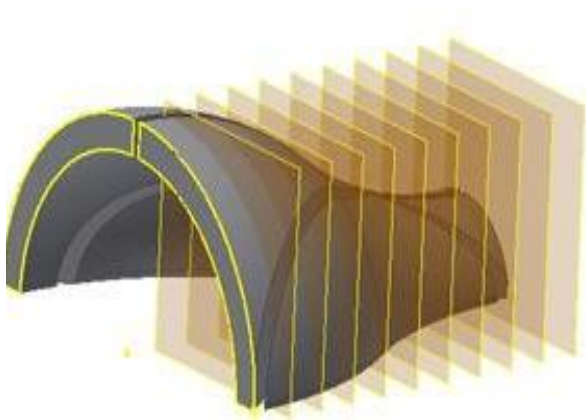
Застосуємо той самий принцип для виготовлення незнімної опалубки для наступної залізобетонної конструкції нодоїдальної оболонки (рис. 1.36).

Для оптимізації розкрою вкладишів виготовляємо відразу вісім вкладишів у вигляді одного цілого вкладиша з подальшим його розрізанням на частини (рис. 1.36, в).

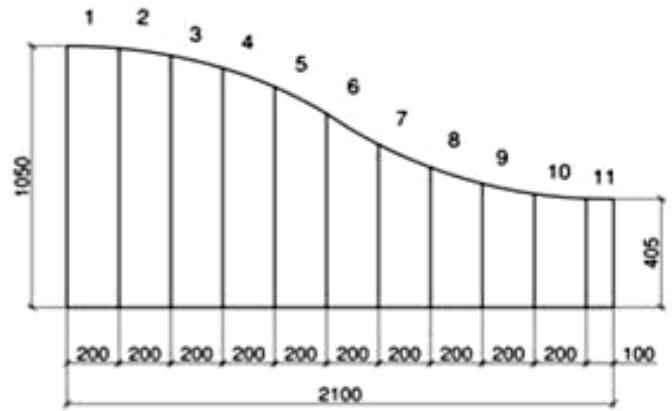
Таблиця 1.3.

Площа порожниноутворювачів і відходів при розкрої вкладишів із листа прямокутної форми

Варіант розкрою	Розміри аркуша пінополістиролу, м ²	Елемент вкладиша / кількість	Площа одного вкладиша / площа вкладишів даної позиції, м ² /м ²	Площа відходів, м ²	Щільність упаковки, %
1	$6,621 \times 2,1 = 13,9$	1/11	0,487/5,363	8,54	38,58
2	$4,855 \times 1,485 = 7,21$	2/11	0,244/2,682	1,85	74,5
		3/22	0,122/2,682		
3	$3,248 \times 2,034 = 6,605$	4/11	0,176/1,937	1,24	81,2
		5/11	0,163/1,788		
		6/11	0,149/1,639		



а



б



в

Рис. 1.36. Незнімна опалубка для виготовлення конструкції нодоїдальної оболонки: а – площини розкрою упоперек нодоїда; б – визначення кількості елементів; в – форма вкладишів; 1–11 – номери елементів

Отримані елементи для виготовлення незнімної опалубки (рис. 1.36) розіб'ємо на дві, три та чотири частини для збільшення щільності упаковки їх на прямокутному листі пінополістиролу (рис. 1.37–1.39).

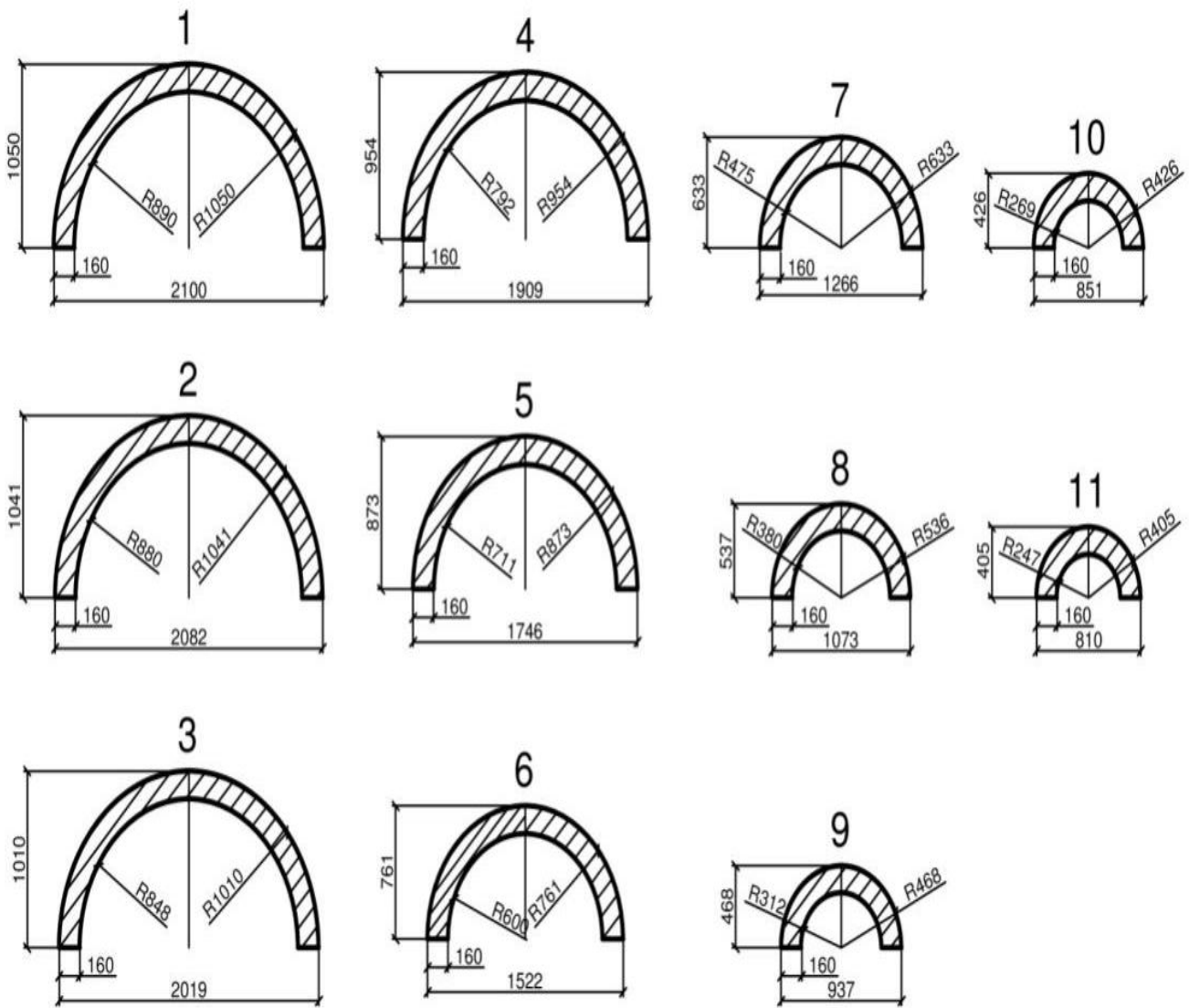


Рис. 1.37. Форма елементів для виготовлення опалубки
нодоїдальної оболонки: 1–11 номери елементів

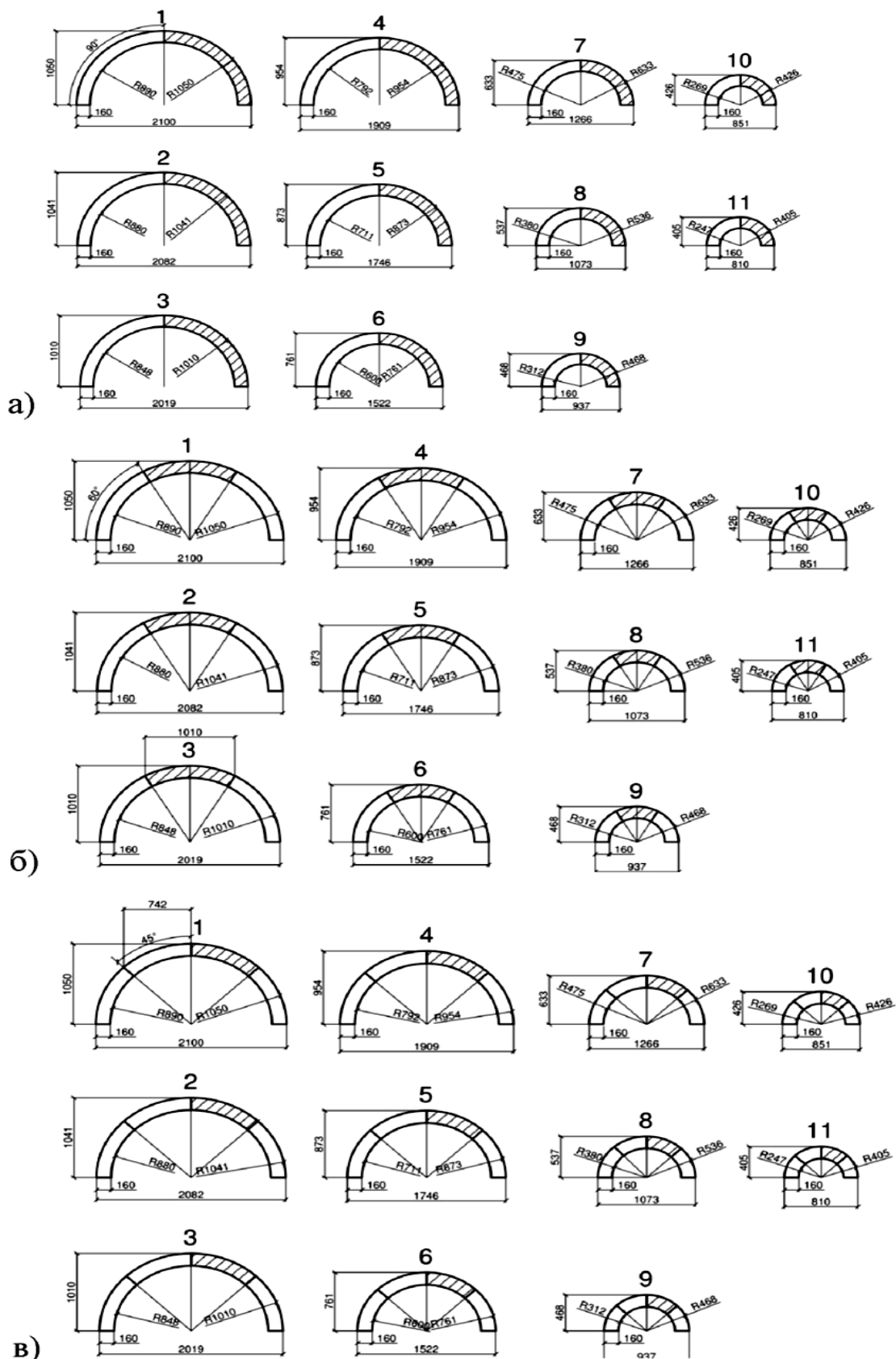


Рис. 1.38. Розбивка елементів для виготовлення опалубки:
 а-в – при розбивці елемента на дві, три та чотири частини;
 1–11 номери елементів

Максимальна довжина елементів незнімної опалубки нодоїда складає від 1493 мм до 804 мм (рис. 1.39).

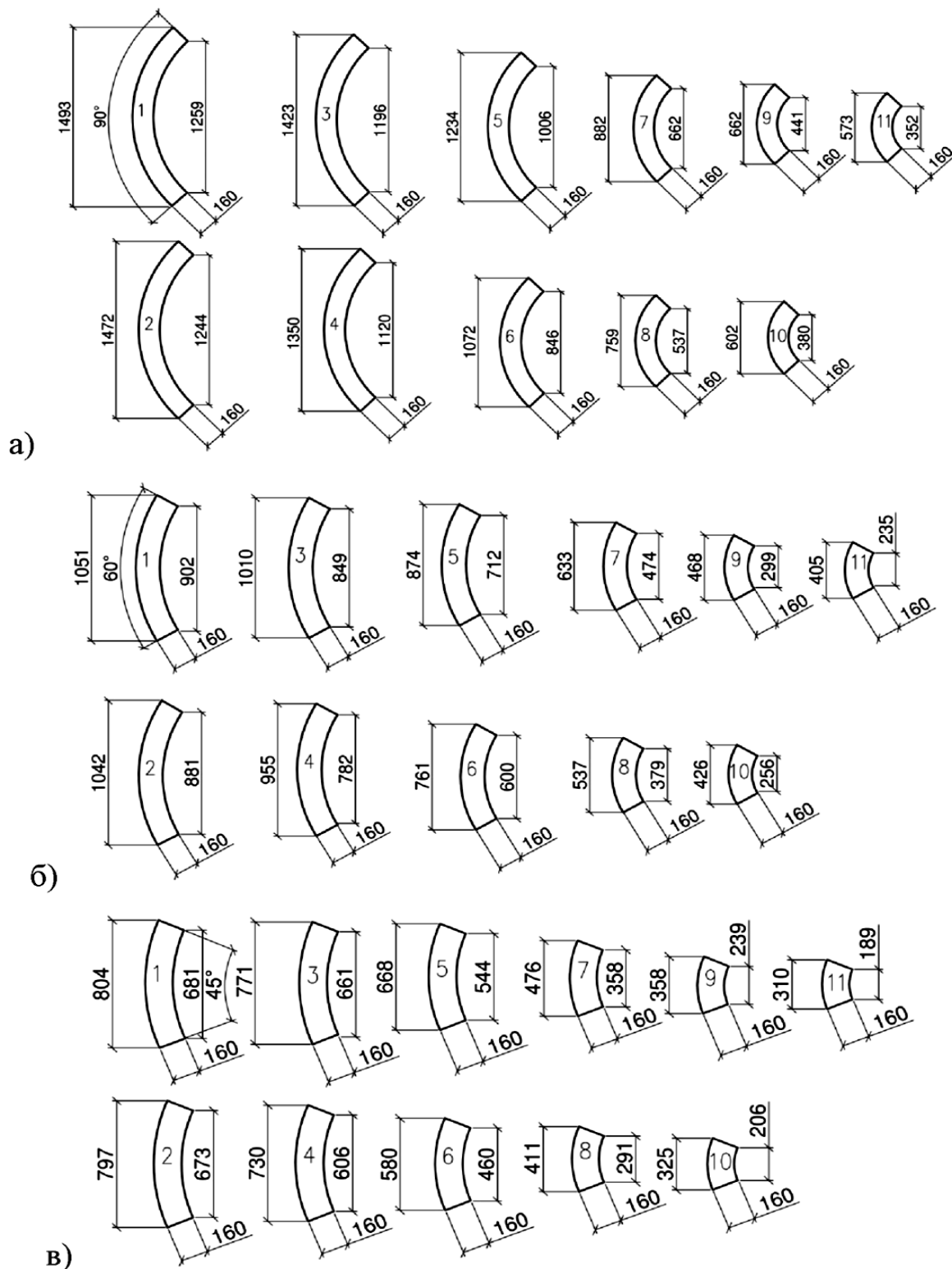


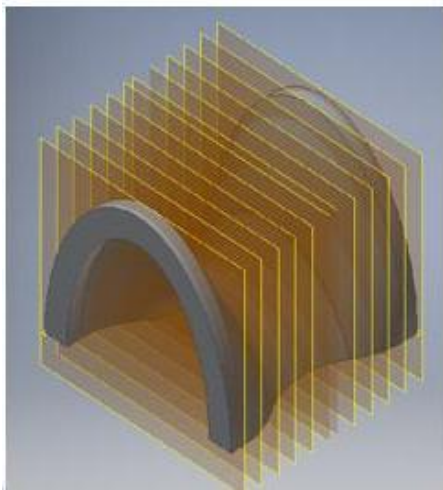
Рис. 1.39. Сортамент елементів для виготовлення незнімної опалубки нодоїдальної оболонки: а-в – при розбивці елемента на дві, три та чотири частини; 1-11 номери елементів

Таблиця 1.4.

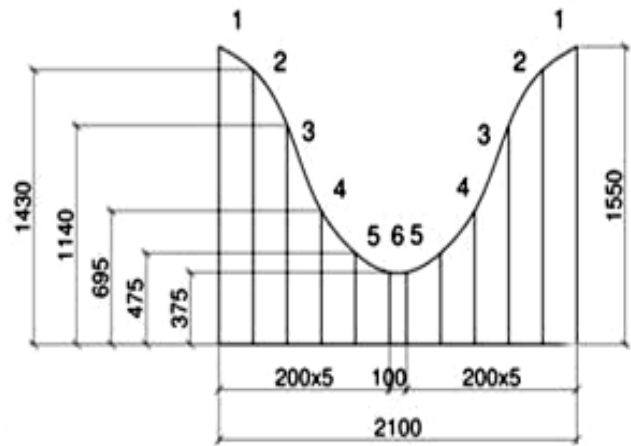
Таблиця сортаменту елементів для виготовлення
незнімної опалубки ногоїдальної оболонки

Варіант розкрою	Розміри аркуша пінополістиролу, м ²	Елемент вкладиша/ кількість	Площа одного вкладиша / площа вкладишів даної позиції, м ² /м ²	Площа відходів, м ²	Щільність упаковки, %
1	2,973 × 2,1 = 6,24	1/1	0,49/0,49	2,59	58,49
		2/1	0,49/0,49		
		3/1	0,47/0,47		
		4/1	0,44/0,44		
		5/1	0,40/0,40		
		6/1	0,34/0,34		
		7/1	0,27/0,27		
		8/1	0,23/0,23		
		9/1	0,19/0,19		
		10/1	0,17/0,17		
		11/1	0,16/0,16		
2	1,942 × 3,051 = 5,93	1/2	0,24/0,49	2,28	61,55
		2/2	0,24/0,49		
		3/2	0,23/0,47		
		4/2	0,22/0,44		
		5/2	0,20/0,40		
		6/2	0,17/0,34		
		7/2	0,13/0,27		
		8/2	0,11/0,23		
		9/2	0,09/0,19		
		10/2	0,08/0,17		
		11/2	0,08/0,16		
3	1,376 × 3,776 = 5,20	1/3	0,16/0,49	1,55	70,19
		2/3	0,16/0,49		
		3/3	0,16/0,47		
		4/3	0,15/0,44		
		5/3	0,13/0,40		
		6/3	0,11/0,34		
		7/3	0,09/0,27		
		8/3	0,08/0,23		
		9/3	0,06/0,19		
		10/3	0,06/0,17		
		11/3	0,05/0,16		
4	2,056 × 2,489 = 5,12	1/4	0,12/0,49	1,47	71,29
		2/4	0,12/0,49		
		3/4	0,12/0,47		
		4/4	0,12/0,44		
		5/4	0,10/0,40		
		6/4	0,09/0,34		
		7/4	0,07/0,27		
		8/4	0,06/0,23		
		9/4	0,05/0,19		
		10/4	0,04/0,17		
		11/4	0,04/0,16		

Застосуємо принцип виготовлення одного цілого вкладиша з подальшим його розрізанням на частини і для незнімної опалубки залізобетонної конструкції оболонки гіпару (рис. 1.41, 1.42).



а



б

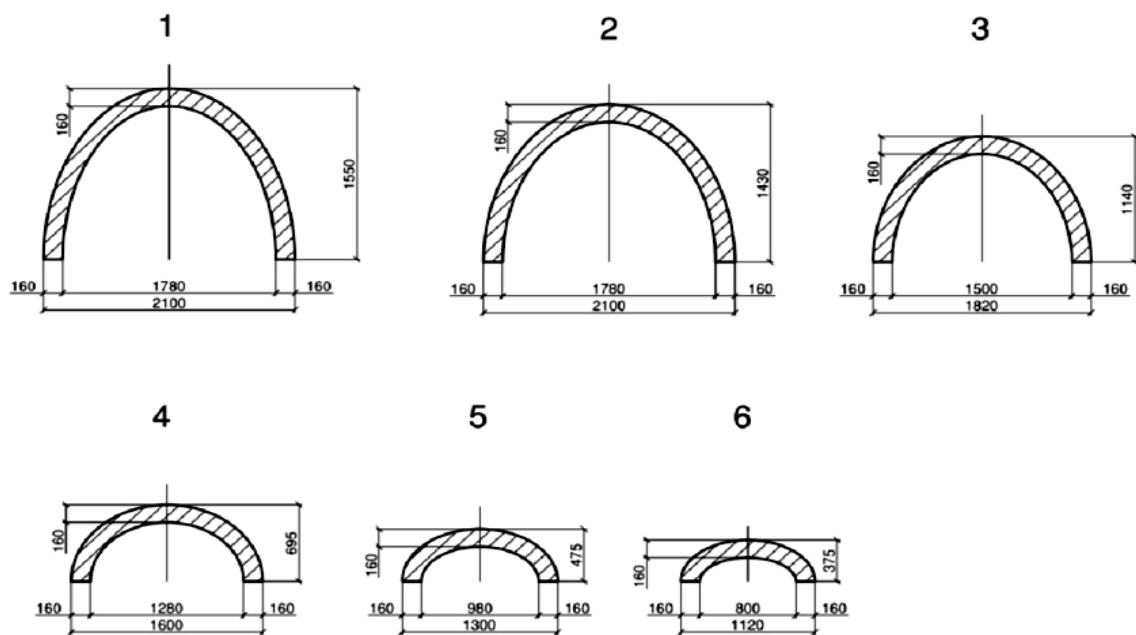


в

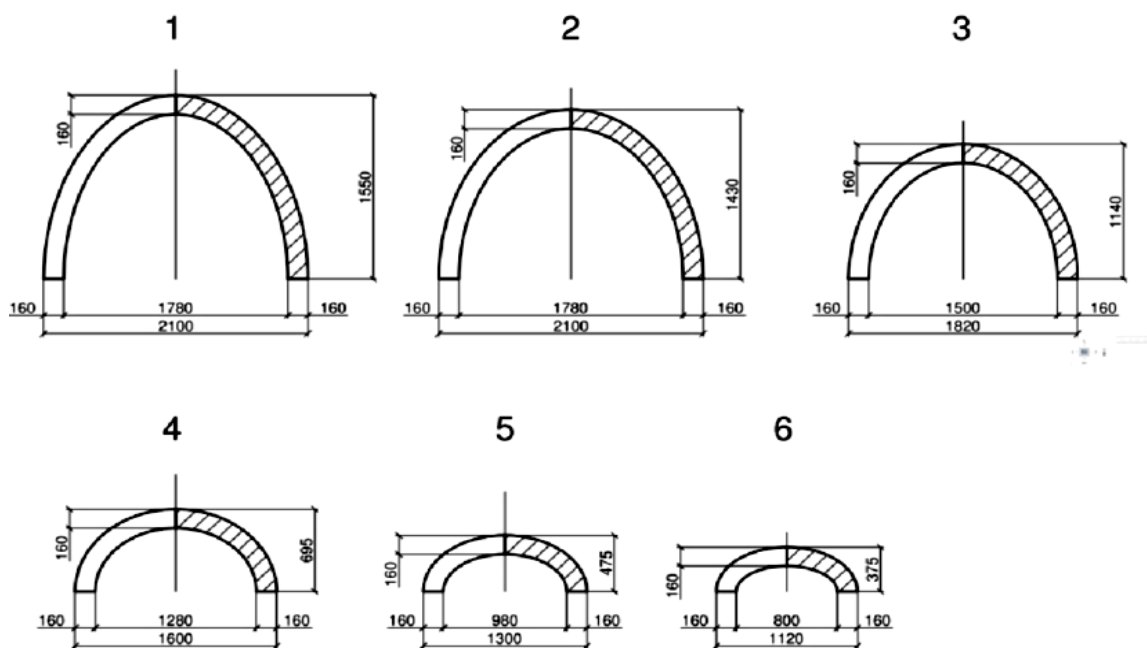
Рис. 1.41. Незнімна опалубка для виготовлення конструкції оболонки гіпару: а – площини розкрою поперек гіпару; б – визначення кількості елементів; в – форма вкладишів; 1–6 – номери елементів

Варіанти розкладки елементів незнімної опалубки гіпару на прямокутному листі пінополістиролу представлені на рис. 1.43.

Другий варіант розбивки на елементи має значно кращу щільність (табл. 1.5).



а



б

Рис. 1.42. Розбивка елементів для виготовлення опалубки:
а – на дві частини; б – на три частини; в – на чотири частини

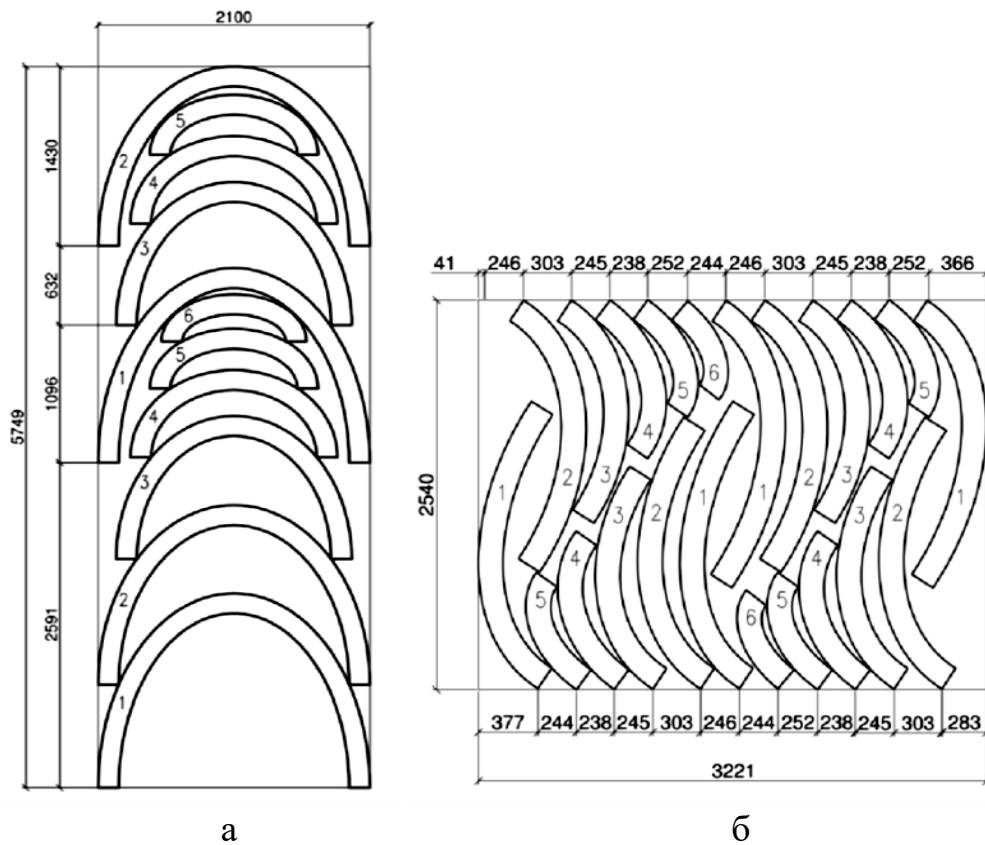


Рис. 1.43. Розкладка елементів:
а-б – варіанти розкладки; 1-6 номери елементів

Таблиця 1.5.

Таблиця сортаменту елементів для виготовлення незнімної опалубки оболонки гіпару

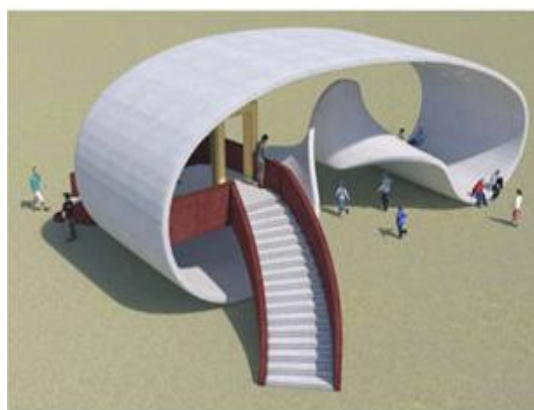
Варіант розкрою	Розміри аркуша пінополістиролу, м ²	Елемент вкладиша/ кількість	Площа одного вкладиша/ площа вкладишів даної позиції, м ² /м ²	Площа відходів, м ²	Щільність упаковки, %
1	2,1× 5,749=12,07	1/2	0,65/1,30	7,17	40,60
		2/2	0,62/1,24		
		3/2	0,50/1,00		
		4/2	0,34/0,68		
		5/2	0,24/0,48		
		6/1	0,20/0,20		
2	2,54×3,221=8,18	1/4	0,33/1,30	3,28	59,90
		2/4	0,31/1,24		
		3/4	0,25/1,00		
		4/4	0,17/0,68		
		5/4	0,12/0,48		
		6/2	0,10/0,20		

1.6. Перспективи розроблених технологій при зведенні полегшених залізобетонних конструкцій унікальних архітектурних форм

Запропонована технологія улаштування полегшених залізобетонних конструкцій може бути використана при зведенні монолітних одно- і багатопверхових цивільних та промислових будівель, що мають стіни, перекриття або інші елементи криволінійної форми (рис. 1.44).



а



б



в



г

Рис. 1.44. Варіанти об'ємно-композиційних рішень:
а–г – архітектурні форми, що зводяться без застосування опалубки

Розглянемо можливості технології улаштування полегшених залізобетонних конструкцій із застосуванням торкрет-бетону на прикладі будівництва складної архітектурної форми для багатоцільового використання у вигляді петлі Мебіуса (рис. 1.44, б).

За рахунок застосування самонесучого остову, який складається із просторової конструкції арматурного каркасу, що представляє собою зовнішні оболонки і систему плоских ребер, що з'єднують їх та

незнімної опалубки із пінополістиролу забезпечується необхідна жорсткість і несуча здатність остова для набризку торкрет-бетону (рис. 1.45, 1.46).

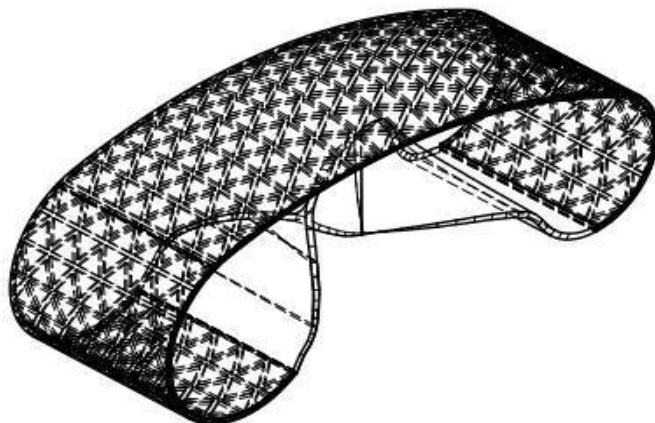


Рис. 1.45. Самонесучий остов

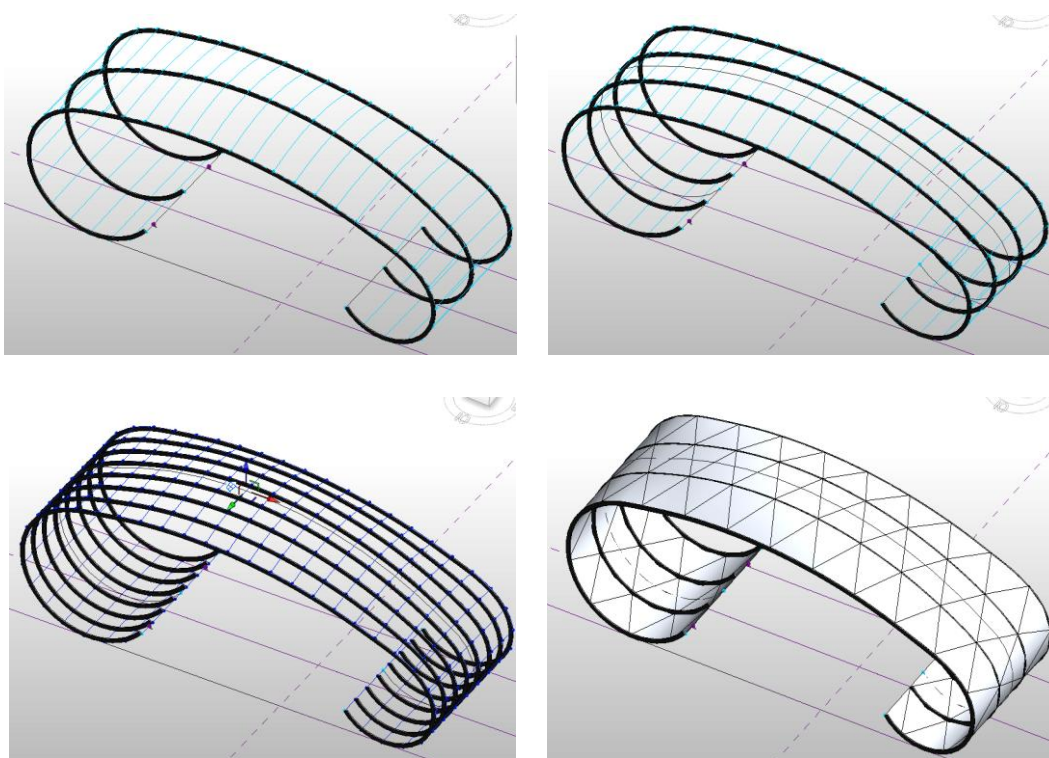


Рис. 1.46. Варіанти компоновки самонесучого остову

Одним із важливих питань, яке необхідно вирішити для виготовлення самонесучого остова, є створення внутрішньої незнімної опалубки за умови мінімізації типорозмірів вкладишів та їх раціональної розкладки. Тут доречна експлуатація засобів САПР. Зокрема,

при конструюванні складних криволінійних моделей можливі два підходи:

– застосування стандартних тривимірних об’єктів (сфера, конус, циліндр та ін.), які поєднують різними способами (додавання, об’єднання, віднімання тощо);

– застосування сукупності криволінійних і/або прямолінійних відрізків R^2 , які перетворюють у мережі або поверхні з подальшим отриманням твердотілих об’єктів R^3 .

Побудова моделі конструкції, представленої на рис. 1.47, була виконана шляхом перетворення криволінійних і прямолінійних напрямних у твердотілий об’єкт. Попередньо вся поверхня моделі була розбита на окремі елементи, що представляють сегменти характерних геометричних поверхонь: FB і CG – циліндричної, BC – циклічної, FA і GE – циліндричної і AE – гелікоїдної з поворотом на 90° .

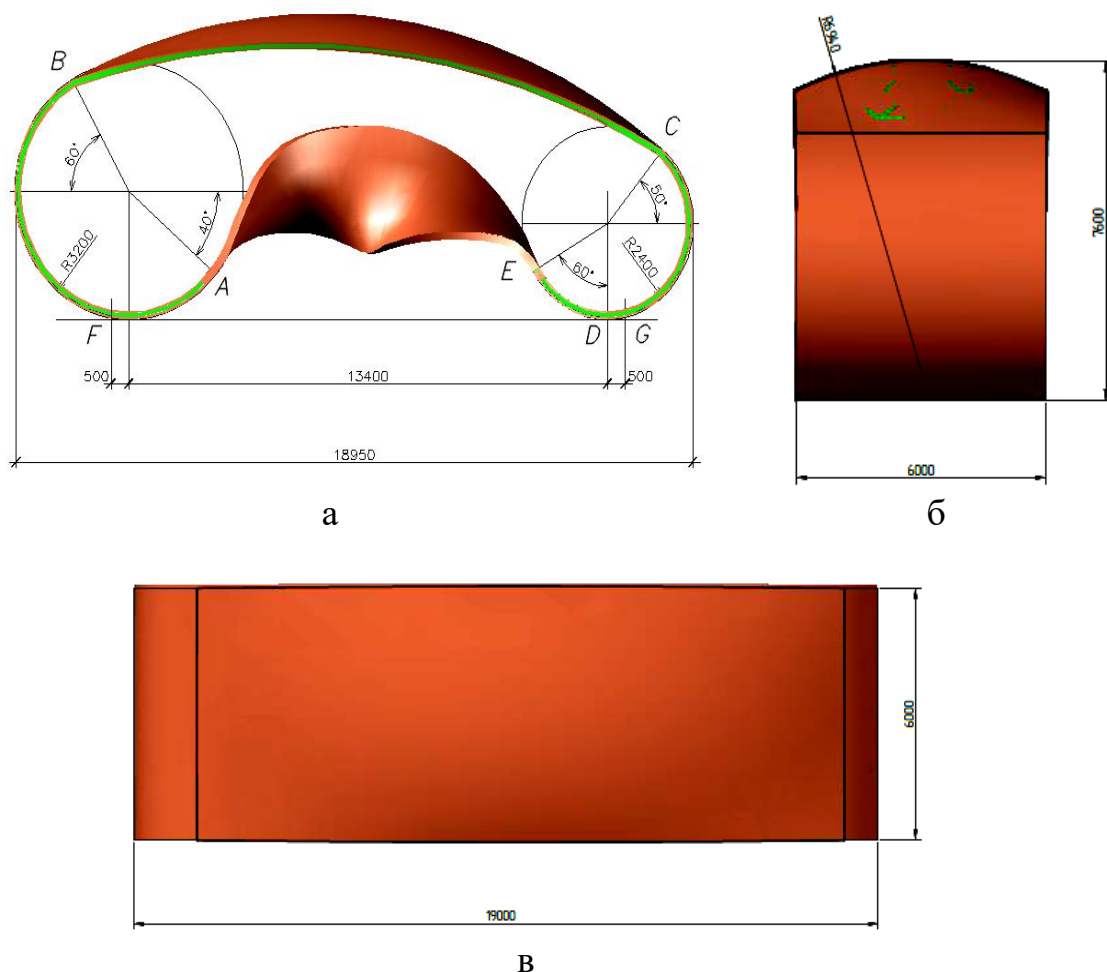


Рис. 1.47. Форма основного несучого елемента конструкції петлі Мебіуса:
 а – фасад; б – вид зверху; в – вид збоку

Конструювання фрагментів моделі робилося з урахуванням розташування утворюючих і напрямних циліндричних, циклічної і гелікоїдної поверхонь, після чого вони були всі об'єднані в одну модель. Конструкція поверхні, що моделюється, складається з трьох шарів: верхньої і нижньої полиці із залізобетону товщиною по 50 мм і шару з вкладишів із пінополістиролу товщиною 100 мм. Форма вкладишів була прийнята у вигляді тригранних призм двох типорозмірів, виходячи з умови мінімізації кількості елементів внутрішньої незнімної опалубки, а також забезпечення жорсткості конструкції (рис. 1.48).

Розкладка вкладишів проводилася з точки *F* через точки *B* і *C* в точку *G* (рис. 1.47, а) за прийнятими напрямними даних поверхонь методом розкочування. Відстань між вкладишами приймалася 150 мм для забезпечення розміщення плоских арматурних каркасів у внутрішніх ребрах конструкції (рис. 1.49).

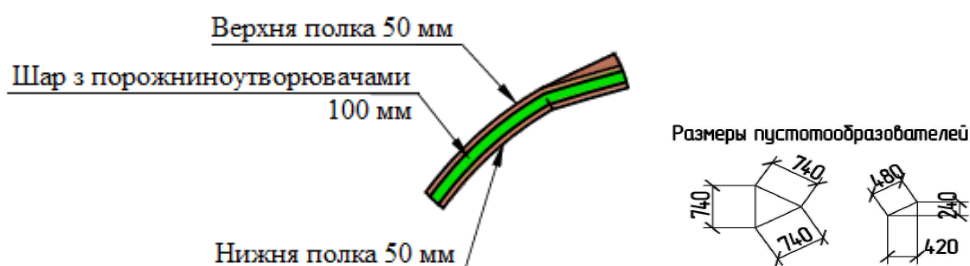


Рис. 1.48. Фрагмент конструкції і розміри вкладишів-порожниноутворювачів

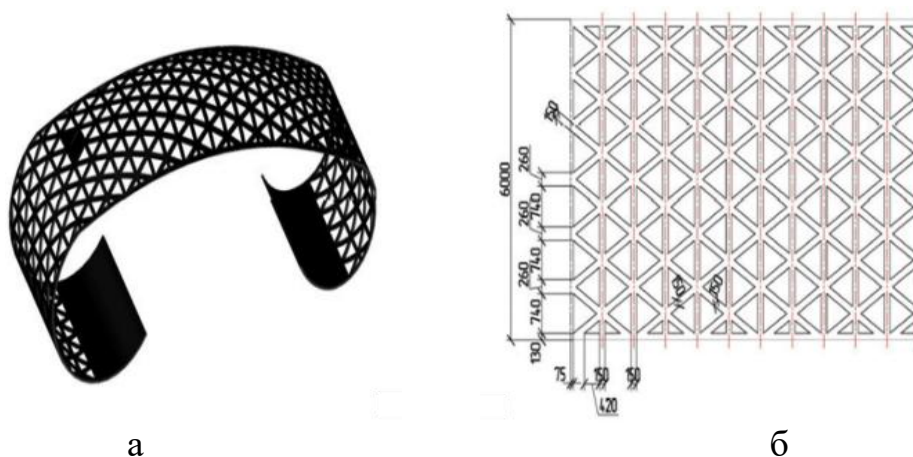


Рис. 1.49. Розкладка вкладишів і форма внутрішніх ребер конструкції:
а – полегшена частина конструкції;
б – фрагмент розкладки вкладишів

Армування плоских каркасів поперечною арматурою прийнято у вигляді сітки «зигзаг», що має форму у вигляді рядка сітки Рабітца (рис. 1.50).

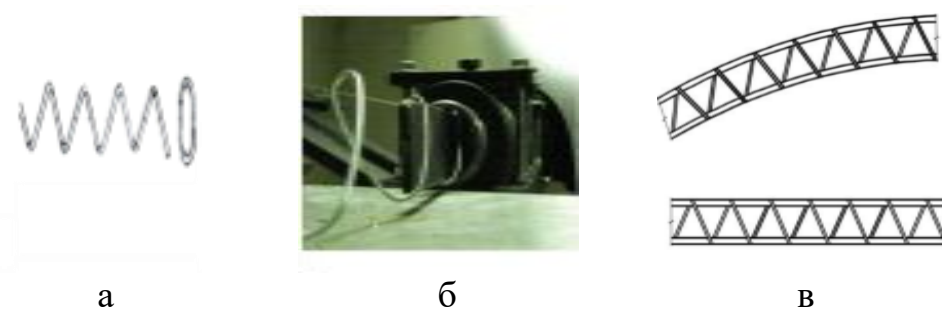


Рис. 1.50. Конструкція плоских каркасів:
 а – поперечна арматура для плоских каркасів;
 б – технологія виготовлення поперечної арматури;
 в – конструкція плоских каркасів

Поздовжні стержні плоских каркасів внутрішніх ребер разом із нерозрізними поперечними стержнями у вигляді сітки «зигзаг» спрощують виготовлення каркаса для залізобетонної конструкції, підвищують жорсткість і незмінність форми каркаса, надійність анкерування поздовжньої і поперечної арматури каркаса за рахунок нерозрізності і плавності загинів її кінців і міцність зчеплення зігнутої стержневої арматури з бетоном. Застосування нерозрізної арматури для поперечних стержнів скорочує обсяги різання її, знижує в 5–8 разів число поперечних стержнів, що одночасно зварюються, дозволяє механізувати виконання арматурних робіт і можливість навивки на стенді безперервної арматури для виготовлення плоских каркасів. Відсутність гострих кінців арматурних стержнів знижує травматизм працюючих при виготовленні плоских каркасів. Застосування заокруглень на кінцях поперечних стержнів арматурного каркаса знижує напруги усадки в бетоні і підвищує міцність похилих перерізів залізобетонних елементів за згинальними моментами і поперечною силою.

Конструкція споруди у вигляді петлі Мебіуса складається з двох елементів: верхнього у вигляді полегшеної конструкції ($F-B-C-G$) і нижнього – суцільної конструкції без вкладишів ($F-A-E-D$). Технологія зведення полегшеної конструкції споруди передбачає три варіанти складання самонесучого остова. За першим варіантом попередньо збирають три шестикутні просторові структури 1 (рис. 1.52, а), що

являють собою об'ємний елемент, який складається з плоских арматурних каркасів ребер і арматурних сіток верхньої і нижньої полиці разом з шістьма вкладками. Кріплять блоки між собою по одній із граней, при цьому між шестикутниками утворюється ромб 2, що вимагає постановки при складанні одного плоского каркасу і двох вкладишів. У кутах шестикутників стикується по шість поздовжніх стержнів від трьох плоских арматурних каркасів внутрішніх ребер. Основним недоліком цього варіанта складання є подвійна перевитрата арматури плоских каркасів у місцях стикування блоків.

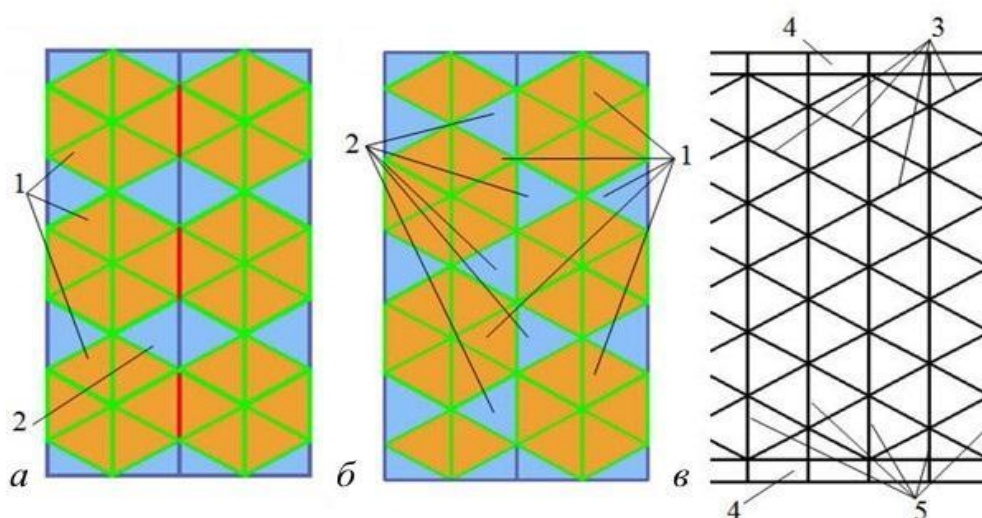


Рис. 1.52. Варіанти збірки самонесучого остова:
 а–в – перший, другий та третій варіант; 1 – шестикутний блок;
 2 – додаткові блоки; 3 – діагональні каркаси;
 4 – напрямні для збірки; 5 – просторові арматурні каркаси

За другим варіантом попередньо збирають по два і три шестикутника в блок 1 (рис. 1.52, б) і чергують їх шляхом стикування в шаховому порядку, стикуючи тільки у вузлах, уникаючи перевитрати арматури на збірку і встановлюючи додатково вкладиші, тільки в трикутники 2, що утворилися між блоками. Основним недоліком другого способу є необхідність додаткової збірки крайових ділянок у місцях установки блоків, що складаються тільки з двох шестикутників.

Обидва варіанти мають недолік, пов'язаний із необхідністю постійної перевірки геометричних параметрів всієї форми полегшеної конструкції. За остаточний варіант зведення полегшеної конструкції прийнятий третій, який являє собою збірку двох напрямних у вигляді

криволінійних балок 4 (рис. 1.52, в) прямокутного перерізу 300×200 мм з армуванням просторовим арматурним каркасом 5 по торцях петлі Мебіуса у напрямку $F-B-C-G$. Після чого встановлюються діагональні каркаси 3.

На рис. 1.53 показана просторова структура армування прямолінійними і криволінійними плоскими каркасами, порожнечі між якими заповнюються вкладишами-порожниноутворювачами. При виборі розмірів ребер просторових елементів армування для забезпечення необхідної стріли h між радіусом вигину поверхні R і довжиною ребра арматури l , враховувалася товщина захисного шару бетону

$$R = \frac{1}{2h}(l^2 + h^2) \quad R = \frac{1}{2h}(l^2 + h^2). \quad (1.2)$$

Згортання просторових структур виконується з використанням правил сферичної тригонометрії (рис. 1.53).

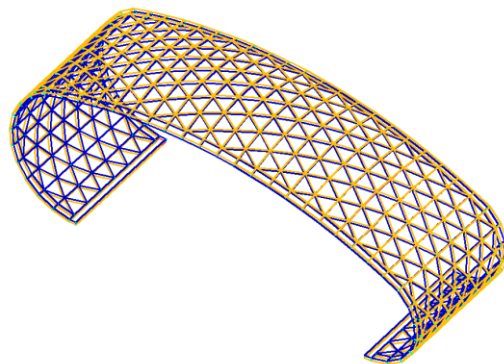


Рис. 1.53. Просторово-стержнева структура армування

Інша частина конструкції збирається у вигляді прямокутних просторових елементів розміром 1,12×6,0 м і фіксується по торцях до напрямних. Після втілення даного проєкту в життя він має вигляд, представлений на рис. 1.54.

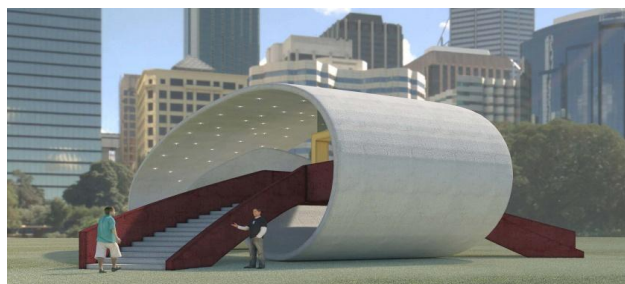


Рис. 1.54. Візуалізація просторово-стержневої структури

Висновки за розділом

1. Запропонована технологія улаштування полегшених залізобетонних конструкцій може бути використана при зведенні монолітних одно- і багатоповерхових цивільних та промислових будівель, що мають стіни, перекриття або інші елементи криволінійної форми. Такі можливості розглянуто на прикладі будівництва складної архітектурної форми для багатоцільового використання у вигляді петлі Мебіуса.

2. Розроблено варіанти компоновки самонесучого остову. Конструкція запропонованого самонесучого остова, що складається з просторового криволінійного арматурного каркаса і вкладишів-порожниноутворювачів, що не виймаються, дозволяє зводити полегшені конструкції з застосуванням торкрет-технології для безопалубочного бетонування.

3. Застосування технології зведення полегшеного монолітного залізобетонного перекриття з вкладишами пінополістиролу у порівнянні із існуючими технологіями дозволяє скоротити логістичні витрати; зменшити навантаження на фундамент; застосовувати більш широкий спектр проєктних рішень; збільшити загальну корисну площі та об'єм будівлі.

Розділ 2.

РЕАЛІЗАЦІЯ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗ ОБЕТОННИХ КОНСТРУКТИВНО-АНІЗОТРОПНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Представлена постановка та реалізація завдання раціоналізації конструктивних параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних конструкцій. В якості критерію для даної задачі приймається енергетичний принцип, згідно з яким вважається, що з усієї безлічі можливих значень параметрів системи з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх и внутрішніх зав'язків, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягає нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів.

Покриття будівель і споруд сприймають значні навантаження, які спричиняють високий рівень напружено-деформованого стану (НДС) системи. Саме тому доцільно розглядати такі види покриття, які могли б сприймати, рівномірно розподіляти й передавати навантаження на опори. Для виконання цієї мети найбільше підходять конструктивно-анізотропні залізобетонні оболонки різної Гаусової кривизни.

Проти пошук раціональних конструкцій оболонок, які сприймають зазначені види навантаження являють собою досить актуальну, але логічно незавершену проблему.

Крім того, оскільки залізобетон є доволі важким матеріалом, доцільно дослідити способи його полегшення. Одним із таких способів є замонолічування всередину конструкції вкладишів-пустотоутворювачів із пінополістиролу, які водночас формують ребра жорсткості оболонки.

Водночас, надаючи ребрам жорсткості певної геометрії (за рахунок змінювання форми вкладишів), можна забезпечити найбільш прийнятний розподіл зусиль, який представляє собою задану несучу здатність при обмеженні використанні матеріалу.

Резюмуючи перераховане, можна констатувати, що побудова методології формування внутрішньої геометрії є своєчасною й необхідною для практики будівництва проблемою. Її вирішення дозволить підвищити ступінь надійності подібних систем, їх довговічність, а

також за рахунок раціоналізації їхніх конструктивних параметрів реалізувати мінімізацію витрат матеріалів.

Виконано чисельний експеримент поведінки конструктивно-анізотропних конструкцій при впливі на них рівномірно-розподіленого 1600 Па/м^2 та зосередженого навантаження 1 т/м^2 . Для вивчення напружено-деформованого стану елементів запропоновано безпечний простір у вигляді конструктивно-анізотропної оболонки розміром $9 \times 9 \text{ м}$ з шагом бетонних ребер 1 м з полістирольними вкладишами та конструктивно-анізотропна оболонка розміром $9 \times 9 \text{ м}$ з металевим листом у нижньому поясі.

Проектування дизайну середовища у створенні закритих просторів малих архітектурних форм, а саме невеликих наземних модульних укриттів для захисту людей у громадських місцях від вибухових хвиль та осколкових уражень для розміщення на зупинках транспорту, у парках, скверах та інших відкритих місцях перебування людей у населених пунктах, територіях підприємств є на часі.

Раніше проведені наукові дослідження впливу між параметрами вибуху та огорожуючими конструкціями [31–36].

Демонструючи уявлення особливостей моделювання напружено-деформованого стану складних об'єктів не можливо не процитувати А. В. Перельмутера «Робота несучої конструкції багато в чому визначається плечем внутрішньої пари. У сфері воно дорівнює відстані між поясами, в арці – віддалі від замка до затягування, у купола – приблизно відстані між вершиною і опорним кільцем. А яке плече внутрішньої пари у оболонки двоякої кривизни на прямокутному плані? Відповідь на це питання вимагає розуміння роботи конструкції «в цілому», що багато в чому протилежно практикованому детальному аналізу напружено-деформованого стану (НДС). Такий аналіз спрямований на вивчення деталей (відшукування піків напруги, місць з максимальними прогинами та ін.» [37].

Метод скінченних елементів заснований на дискретизації самого об'єкта, який представляється у вигляді окремих кінцевих елементів [38]. При цьому, упровадженню в практику проектування прямих методів сприяли, з одного боку, способи трактування власне поняття «раціональне рішення», а з іншого – широке використання методу скінченних елементів (МСЕ). Поняття «раціональна конструкція» вдалося дещо конкретизувати і трансформувати за допомогою цікавих ідей і досліджень Г.В. Василькова і В.С. Шмуклера [39].

Моделюванню геометричних параметрів з урахуванням фрактальної теорії присвячені роботи Б. Мандельброта [40].

Розрізняють анізотропію:

- 1) пружних властивостей;
- 2) меж пружності, плинності, інших властивостей, які визначаються в області малих пластичних деформацій;
- 3) характеристик значною пластичної деформації (межа міцності при наявності шийки, рівномірна пластичність та ін.);
- 4) характеристик, пов'язаних з руйнуванням (характеристики опору руйнуванню при різних видах навантаження, гранична пластичність та ін.).

Розрізняють анізотропію характеристик, які визначаються при статичних навантаженнях, анізотропію тривалої міцності і повзучості, анізотропію ударної в'язкості, тріщиностійкості, твердості і мікротвердості та ін.

За структурною ознакою анізотропію розрізняють: гомогенну та гетерогенну, викликану орієнтованими залишковими мікрона пругами або пов'язану з особливостями дислокаційної структури. Багато металевих матеріалів квазіізотропні в пружних і пластичних областях, а також при руйнуванні шляхом зрізу, але анізотропні в опорі відриву.

У листових матеріалах розрізняють «площинну» і «нормальну» пластичну анізотропію. Перша визначається залежністю характеристик від напрямку в площині листа, друга – різницею між властивостями в площині листа і напрямку, перпендикулярному до неї (за товщиною). За геометричним характером розрізняють прямолінійну і криволінійну анізотропію.

2.1. Раціоналізації конструктивних параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних конструкцій

Моделювання напружено-деформованного стану, геометричність параметрів з урахуванням енергетичних принципів анізотропних оболонок, розглянуті у роботах [42–44, 46–51].

Досліджено принципово новий тип конструкції, що має задану зовнішню й розрахунково-внутрішню геометрію; математично змо-

дельованийий процес деформування конструктивно-анізотропної оболонки за різних типів зовнішніх та внутрішніх впливів. В.С. Шмуклер у своїй роботі [39] відзначив, «що для регулювання систем з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх и внутрішніх зв'язків (зовнішні параметри) під дією статичного зовнішнього навантаження власної ваги, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягає нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів:

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), \quad k = 1, 2, \dots, \infty \quad (2.1)$$

де U – ПЕД;

k – номер варіанта порівняння; $\alpha \in M$;

M – безліч допустимих значень зовнішніх геометричних параметрів.

Реалізація підходу зумовлює побудову взаємозв'язку між величиною енергії деформації системи и однієї або групи геометричних параметрів. Постановка подібної задачі в чисельному вигляді можлива при застосуванні обчислювальних програмних комплексів, однак, операція зумовлює побудову значної кількості моделей, що в певній мірі ускладнює процес.

Представлена постановка й реалізація завдання раціоналізації конструктивних параметрів залізобетонних оболонок. В якості критерію для даної задачі приймається енергетичний принцип, згідно з яким вважається, що з усієї безлічі можливих значень пошукових параметрів системи з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх и внутрішніх зв'язків, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягнена нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів, описаної системи.

У розгляд вводиться вектор керуючих параметрів даної системи:

$$\{x\}^T = \{H, B, V, R, L, l, q, \delta, \Delta, h\} \quad (2.2)$$

де H – стріла підйому;

B – довжина оболонки;

V – об'єм матеріалу;

R – радіус кривизни;

L – проліт оболонки;
 l – крок ребер;
 q – зовнішнє навантаження;
 δ – товщина обшивок;
 Δ – товщина ребер;
 h – висота перерізу оболонки.

При цьому параметри H, B, R, L, q – позиціонуються як зовнішні, а параметри l, δ, Δ, h – як внутрішні. В якості змінних параметрів прийнято крок внутрішніх ребер оболонки l (рис. 2.1). Решта атрибутів розрахункової моделі задані по аналогії, за винятком товщина обшивки δ , яка в даному випадку прийняття рівна 50 мм, и стріла підйому H , прийнята 3,8 м. Постійність обсягу матеріалу, в даному випадку, забезпечувалася шляхом підбору відповідного значення товщина ребер Δ .

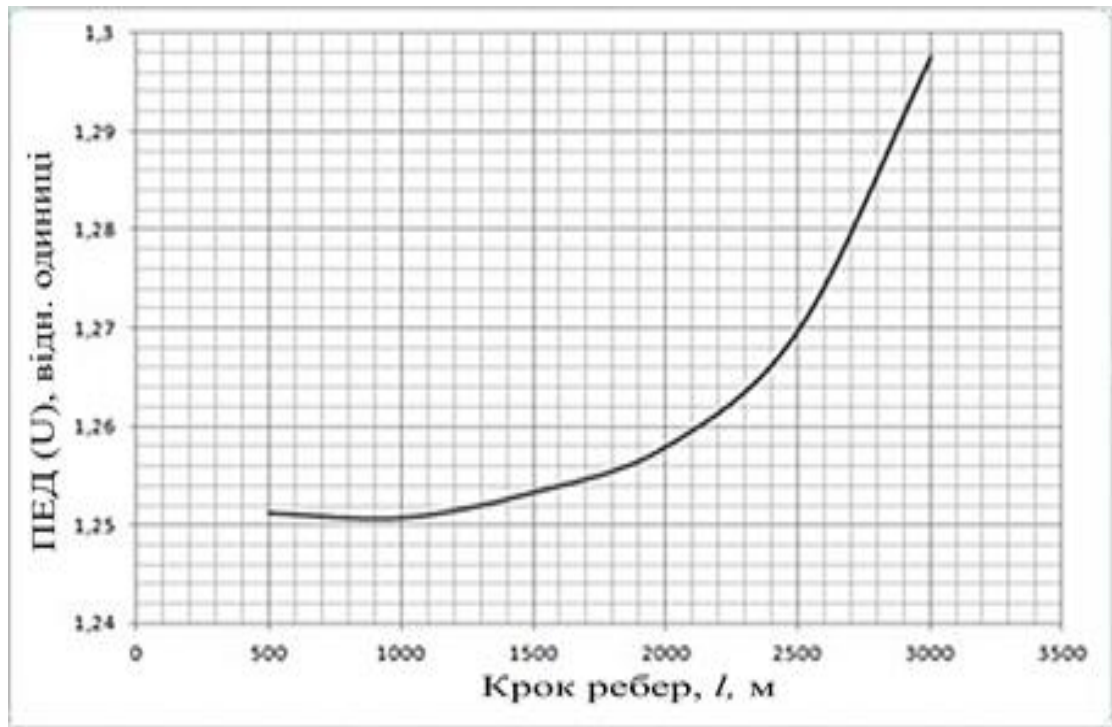


Рис. 2.1. Графік залежності енергії U деформації від кроку ребер

Як видно з графіка, при величині кроку ребер близько до $l \approx 1000$ мм ПЕД досягає нижньої межі. Таким чином, запропонований підхід відкриває можливість визначення раціональних параметрів залізобетонних елементів, що мають складну зовнішню и внутрішню геометрію

Наведень аналіз розширено завдяки вивченню розподілу щільності енергії деформації (внутрішній параметр). У даному випадку, критерієм буде залежність:

$$e \rightarrow \text{const}, \quad (2.3)$$

де e – щільність потенційної енергії деформації (ЩПЕД).

Вирівнювання поля ПЕД (ПК «Ліра») реалізовано за рахунок надання вкладишу-пустотоутворювачу складної форми. У цьому разі, сітка ребер не є ортогональною. Поле щільності потенційної енергії залежних від кроку ребер оболонки прогоном 9000 м наведені на рис. 2.2–2.5.

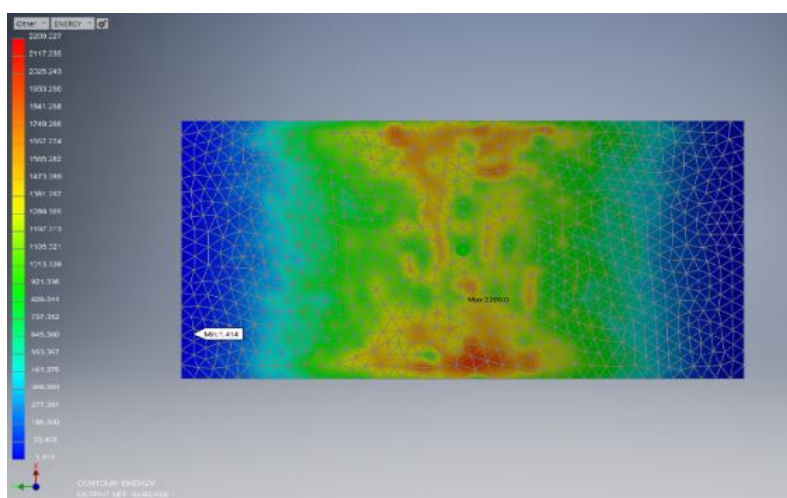


Рис. 2.2. Поле щільності потенційної енергії залежних від кроку ребер оболонки прогоном 9000 мм з висотою стріли 2250 мм кроком ребер 500 мм і товщина ребра 50 мм

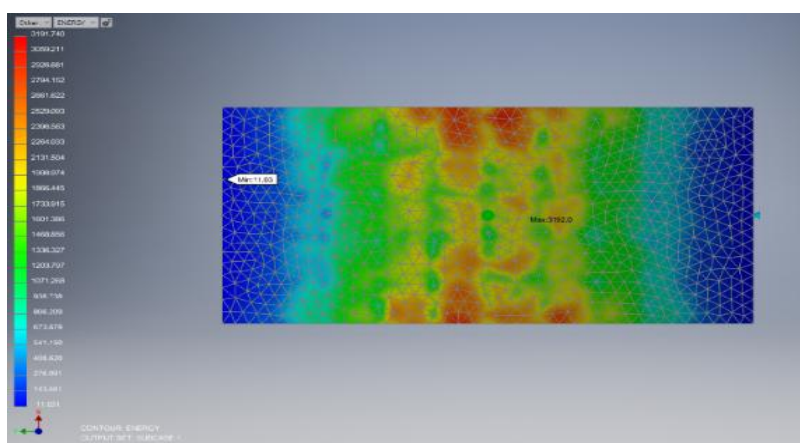


Рис. 2.3. Поле щільності потенційної енергії залежних від кроку ребер оболонки прогоном 9000 мм з висотою стріли 2250 мм кроком ребер 2000 мм и товщина ребра 166,9 мм

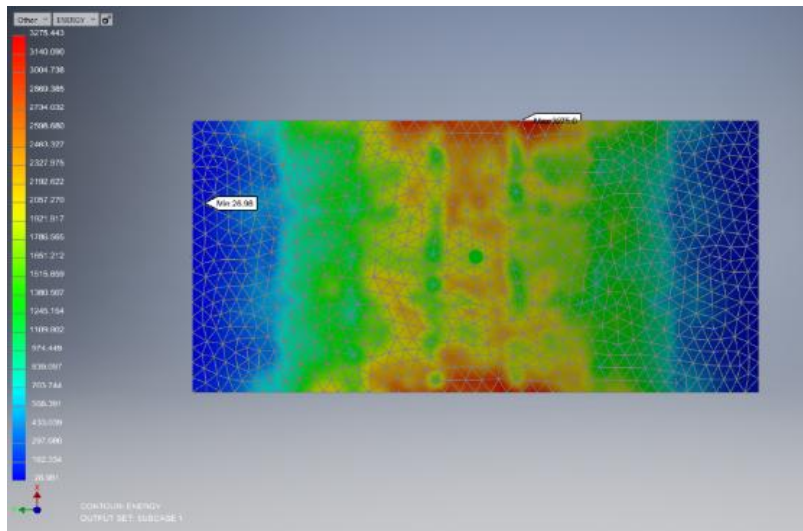


Рис. 2.4. Поле щільності потенційної енергії залежних від кроку ребер оболонки прогоном 9000 мм з висотою стріли 2250 мм кроком ребер 2000 мм и товщина ребра 241,1 мм

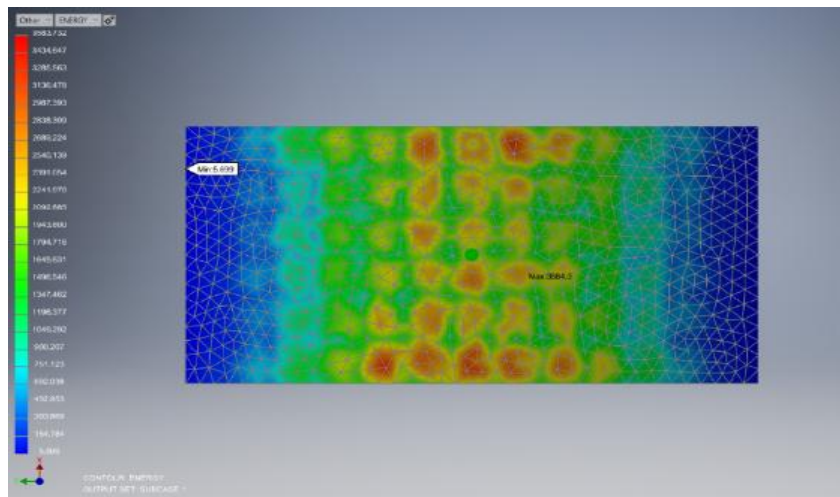


Рис. 2.5. Поле щільності потенційної енергії залежних від кроку ребер оболонки прогоном 9000 мм з висотою стріли 2250 мм кроком ребер 1500 мм и товщина ребра 137,7 мм

2.2. Покращення конструктивних характеристик конструктивно-анізотропних конструкцій

В роботі реалізовані чисельні методи вирішення поставленого завдання на прикладі циліндричної оболонки, що має внутрішні порожнини прямокутної в плані форми (рис. 2.6). В якості інструментарію для вирішенню поставленого завдання використовувався зв'язок програмних продуктів компанії Autodesk. Основоположним

тут є скрипт, написаний в середовищі візуального програмування, який дозволяє автоматично формувати геометрію оболонки шляхом завдання всіх необхідних параметрів з числа $\{x\}$.

Запропонована процедура дозволяє в автоматичному режимі вибудовувати взаємозв'язок між ПЕД системи и будь-яким геометричним параметром, що описує її. В якості ілюстрації розглянуті приклади пошуку зовнішніх й внутрішніх раціональних параметрів оболонки. Виконано аналіз дослідження зовнішніх параметрів циліндричної залізобетонної анізотропної оболонки, яка має внутрішні порожнини (рис. 2.7).

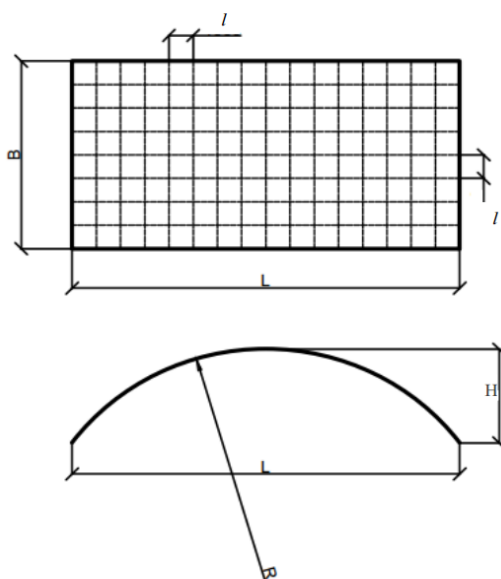


Рис. 2.6. Розглянута оболонка

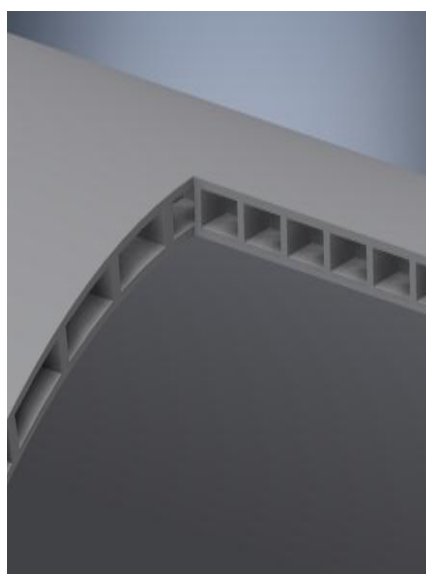


Рис. 2.7. Залізобетонна двухпоясна конструктивно-анізотропна оболонка

Сталість забезпечувалася шляхом підбору відповідного значення товщина обшивки δ . Результати розрахунку наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Результати розрахунку

Стріла підйому H , м	Обсяг матеріалу V , м ³	Радіус кривизни R , м	Товщина обшивок δ , м	Довжина дуги, м	ПЕД системи U , віднош. од.
0	22,8915	∞	0,0506	18,0000	5,75E + 06
1	22,8915	41	0,050000	18,1478	4,87E + 05
2	22,8915	21,25	0,047300	18,5869	1,30E + 05
3	22,8915	15	0,045000	19,3050	7,57E + 04
4	22,8915	12,125	0,040700	20,2839	6,93E + 04
5	22,8915	10,6	0,035700	21,5010	9,38E + 04
6	22,8915	9,75	0,031500	22,9321	1,55E + 05
7	22,8915	9,285	0,027100	24,5530	2,83E + 05
8	22,8915	9,0625	0,022400	26,3408	5,77E + 05
9	22,8915	9	0,018700	28,2743	1,12E + 06

На підставі отриманих даних побудований графік залежності ПЕД від стріли підйому H (рис. 2.8, а), який представляє собою унімодальну функцію. Визначено, що для завдань умов при $H \approx 3,8$ м ПЕД досягає нижньої межі. Отримані результати верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень H і оцінки максимальної несучої здатності (q_{\max}) оболонки.

Як видно з графіка (рис. 2.8, б), 7 з 10 тонів власних коливань приймають максимальне значення при значенні H близько до раціонального.

З умови досягнення еквівалентних напружень системи (σ_e) межі міцності матеріалу визначена q_{\max} для оптимального значення H_i значень, на 1 м більш і менш від раціонального (4,8 і 2,8 м відповідно). Так, при $H = 3,8$ м $q_{\max} = 38,45$ Кн / м²; при $H = 4,8$ м $q_{\max} = 35,15$ Кн / м²; при $H = 2,8$ м $q_{\max} = 30,26$ Кн / м².

При аналізі зовнішніх параметрів як змінний прийнята стріла підйому H_i (H [0; $L / 2$]), інші параметрами, що описують геометрію системи, прийняті наступні: $B = 9000$ мм; $L = 18000$ мм; $h = 300$ мм, $\Delta = 100$ мм; $l = 1000$ мм.

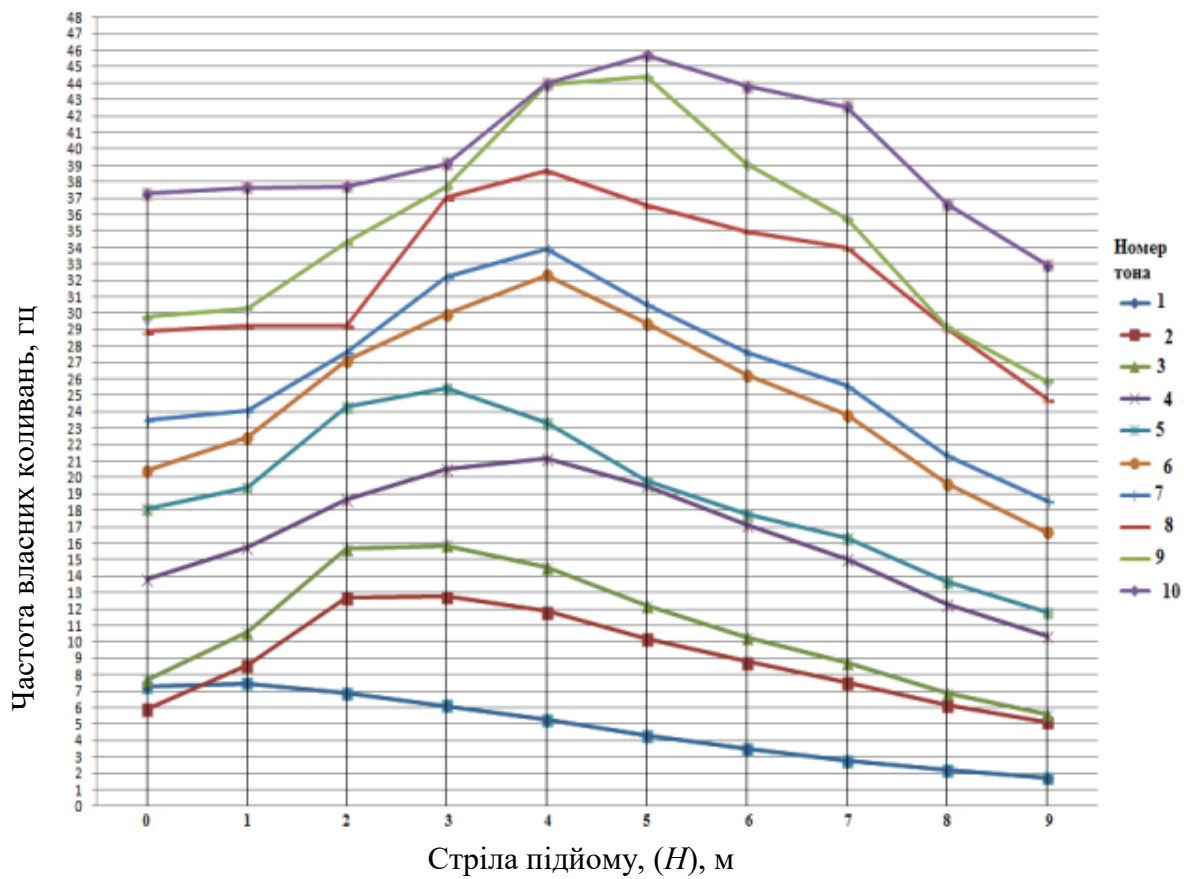
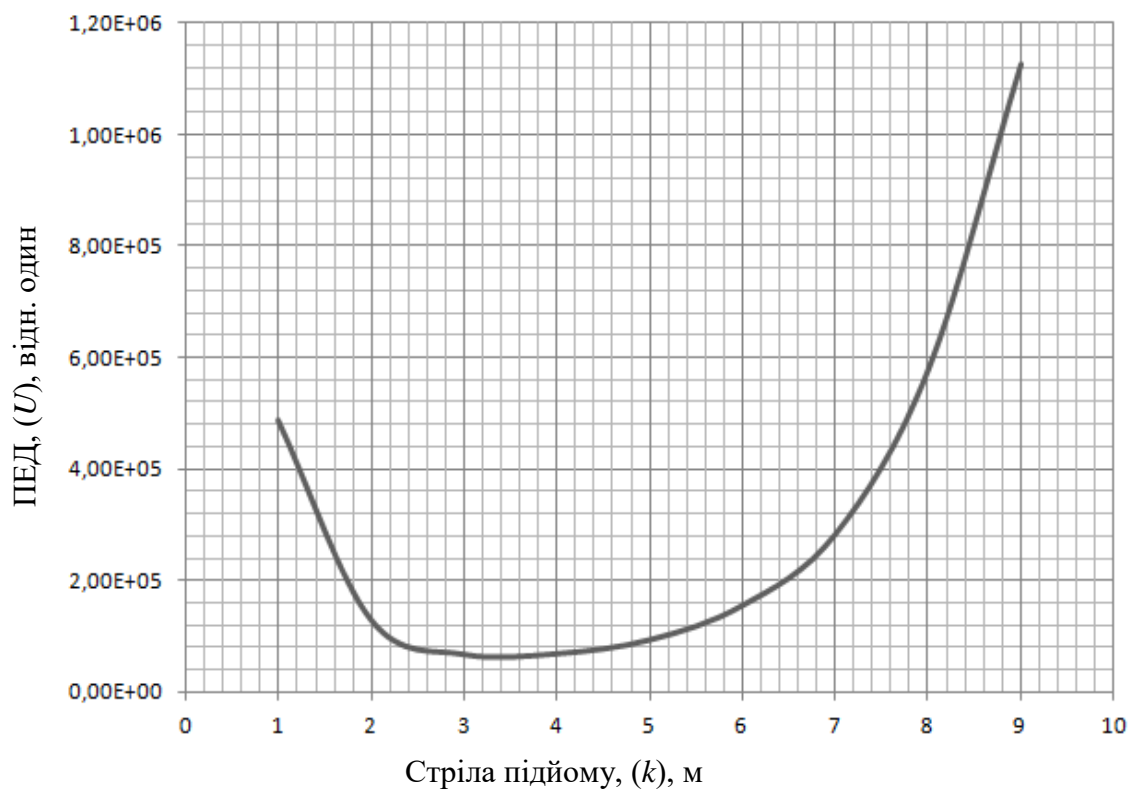


Рис. 2.8. Взаємозв'язок стріли підйому H_i :
а – ПЕД; б – частота власних коливань

Як навантаження прийнята власна вага, обпирання призначено шарнірно нерухоме за двома поздовжніми ребрами, матеріал - бетон C25 / 30.

Покроковий змінюючи параметр Н. Визначили його взаємозв'язок з величиною ПЕД системи, при цьому, у всіх випадках обсяг матеріалу оболонки був незмінний.

Частоти власних коливань конструктивно-анізотропних конструкцій наведені нижче на рис. 2.9–2.20.

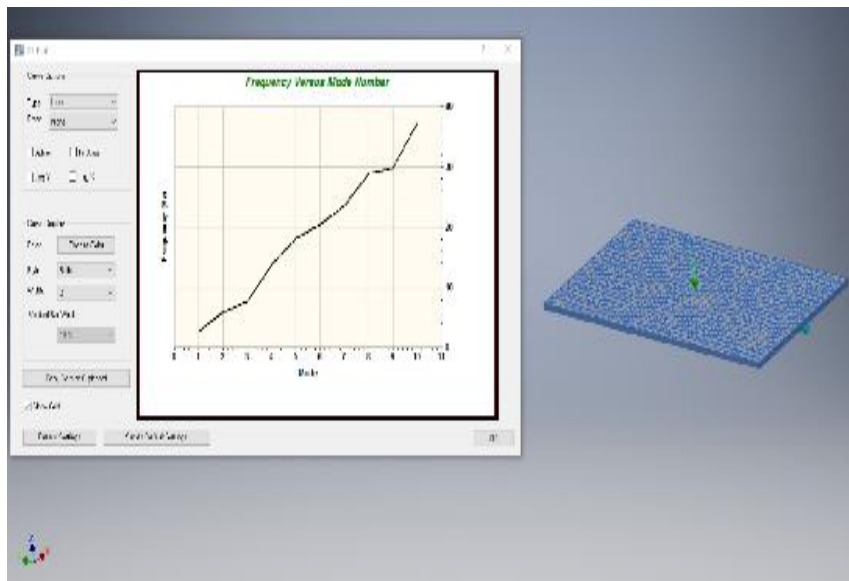


Рис. 2.9. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані $9000 \times 0,1$ мм

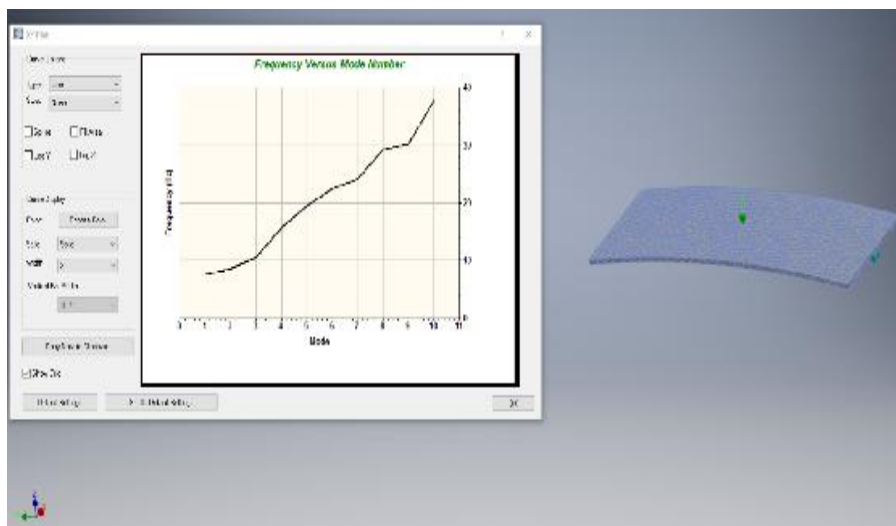


Рис. 2.10. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000×1000 мм

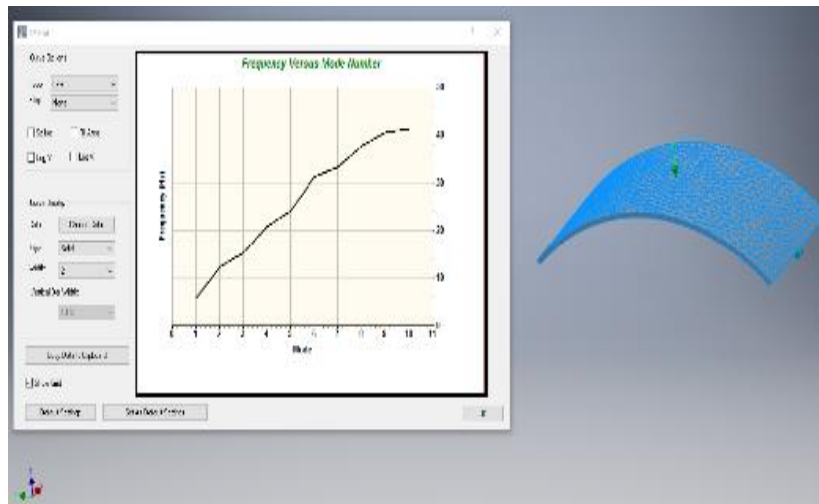


Рис. 2.11. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 × 3500 мм.

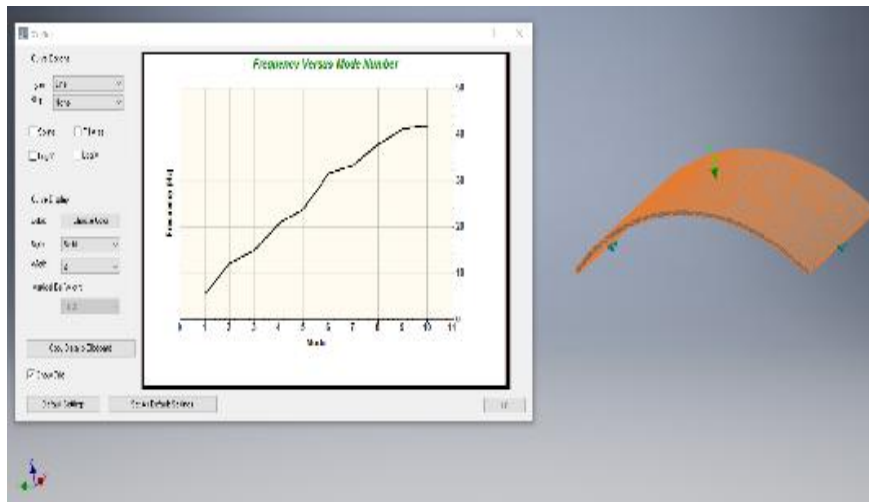


Рис. 2.12. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 × 3600 мм



Рис. 2.13. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 × 3700 мм

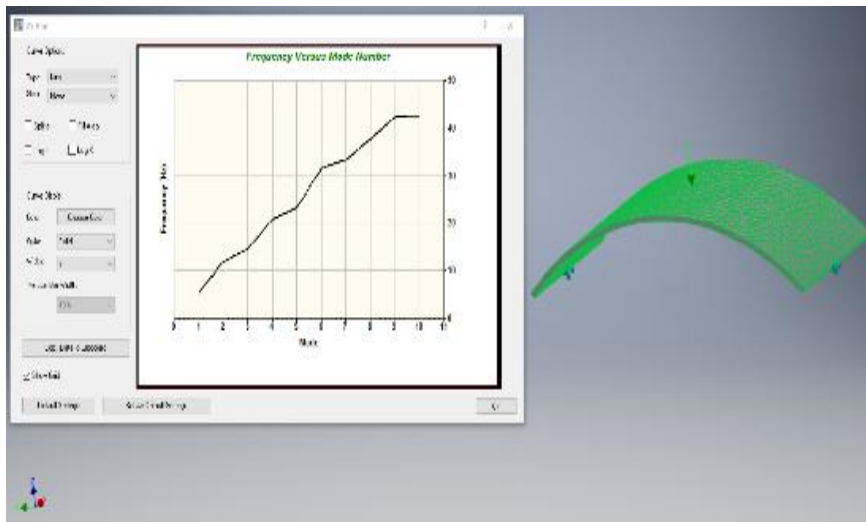


Рис. 2.14. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000×3800 мм

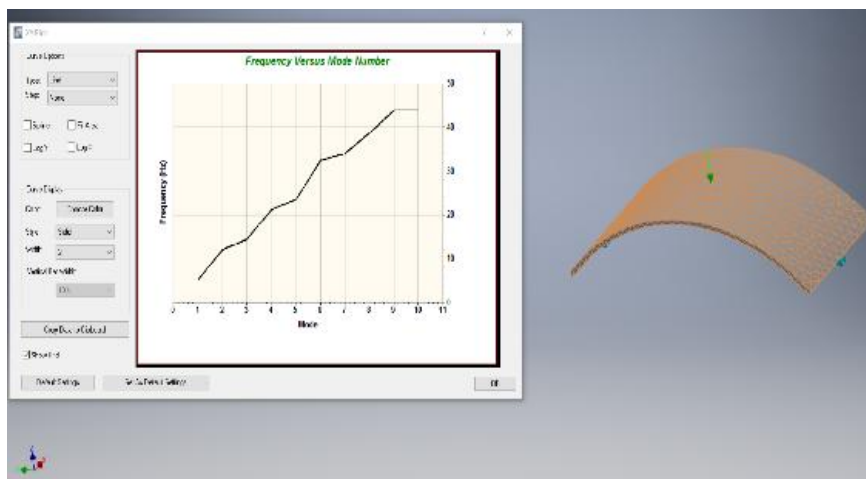


Рис. 2.15. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000×4000 мм

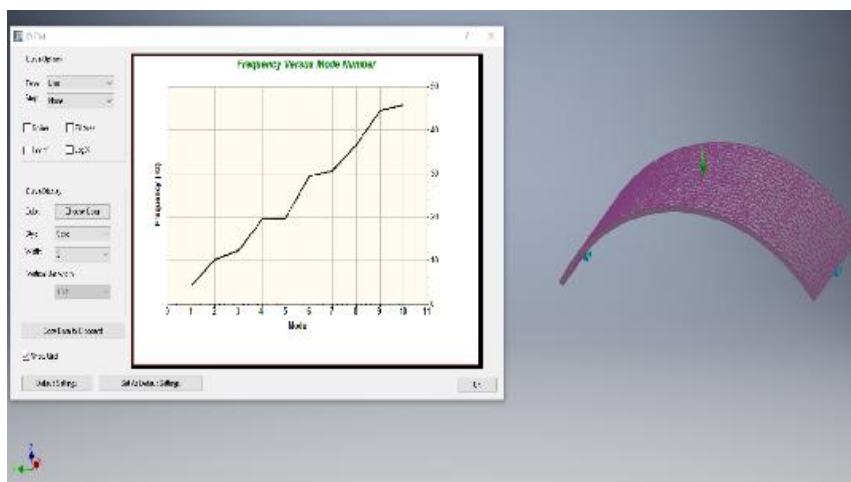


Рис. 2.16. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000×5000 мм

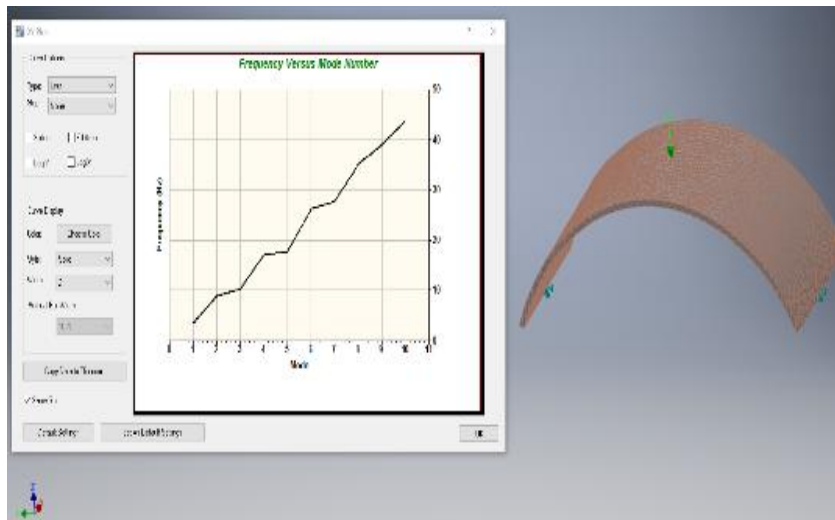


Рис. 2.17. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 × 6000 мм

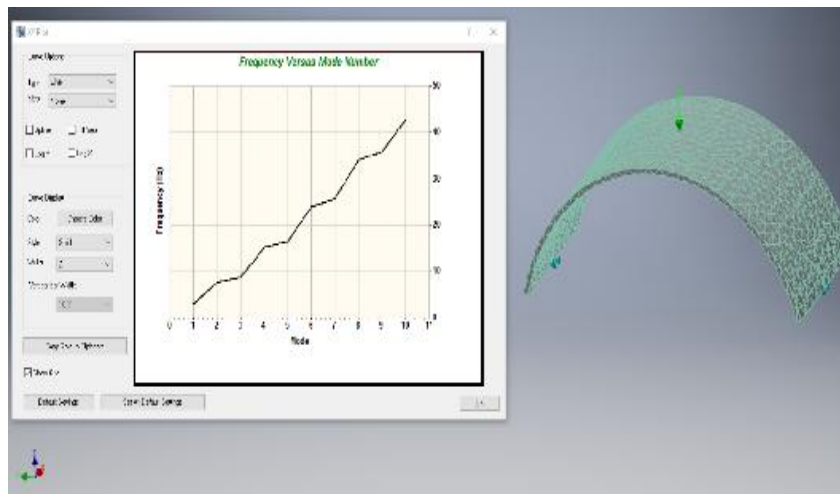


Рис. 2.18. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 × 7000 мм

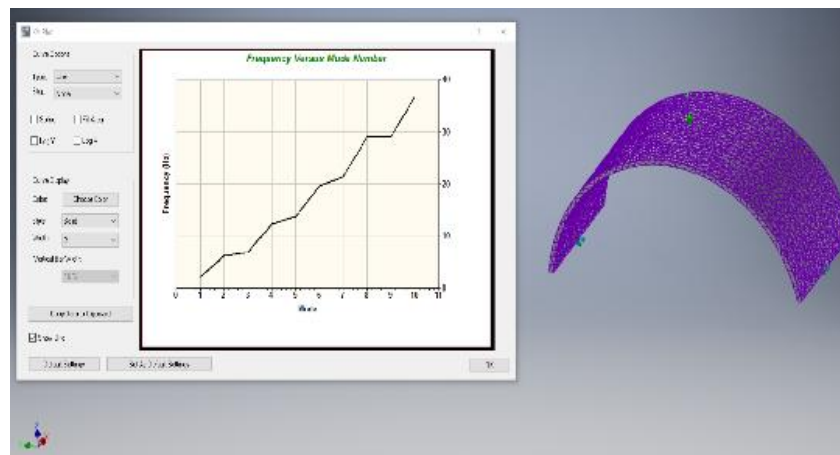


Рис. 2.19. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000 × 8000 мм

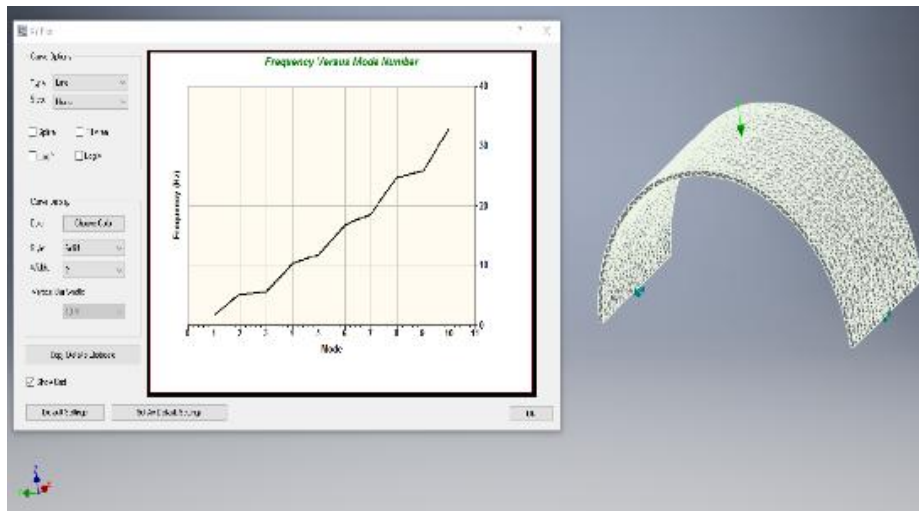


Рис. 2.20. Частоти власних коливань конструктивно-анізотропної оболонки розміром у плані 9000×9000 мм

2.3. Моделювання конструктивно-анізотропних конструкцій у програмного комплексу «Autodesk Inventor»

Приділена увага чисельному дослідженню щодо створення науково-обґрунтованого розрахунку конструктивно-анізотропних конструкцій у програмного комплексу «Autodesk Inventor» та виконані розрахунки напружено-деформованого стану конструктивно-анізотропних конструкцій у вигляді оболонки 9×9 м.

При цьому застосовано енергетичний критерій, що до раціоналізації зовнішніх конструктивних параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок.

За результатами дослідження визначено, що (для розглянутих конкретних умов) при $H \approx 3,8$ м потенційна енергія деформації (ПЕД) досягає нижньої межі, враховані дослідження, що взаємозв'язок раціональних параметрів у конструктивно-анізотропної оболонки між ПЕД системи зовнішніх і внутрішніх раціональних параметрів: при величині кроку ребер близькою до $l \approx 1000$ мм ПЕД досягає нижньої межі.

Виконаний чисельний експеримент поведінки конструктивно-анізотропної конструкції при впливі на них рівномірно-розподіленого снігового навантаження 1600 Па/м^2 та зосередженого навантаження 1 т/м^2 .

Для вивчення напружено-деформованого стану анізотропної конструкції оболонки для малих архітектурних форм елементів запропоновано безпечний простір у вигляді конструктивно-анізотропної оболонки розміром 9×9 м з шагом бетонних ребер 1 м та з полістирольними вкладишами. Конструкція монолітної оболонки містить арматурні каркаси, між якими розташовані бетонні ребра та вкладиші, що забезпечують вирівнювання зусиль і спільну роботу зовнішньої і внутрішньої обшивок [31]. Раніше [42] виконано чисельний аналіз поведінки конструктивно-анізотропної конструкції в нестационарних умовах під впливом на неї стандартної пожежі. Виявлено, що у розглянутої конструкції товщиною 300 мм діють температури по бетонному перерізу 395°C і по утеплювачу 520°C . У зв'язку з чим, оцінена вогнестійкість конструктивно-анізотропних оболонок, яка дорівнює REI 60. Моделювання різних схем навантажень на анізотропні конструкції різної Гаусової кривизни є досить актуальними та отримані результати розглянуті у роботах [43, 44]. Розрахунки проводились у програмному комплексі «Ansys» з використанням модуля «Static Structural» з використанням методу скінчених елементів при чисельному моделюванні роботи конструкції, також враховувалися класичні та чисельні методи механіки деформівного твердого тіла.

Побудовано тривимірну кінцево-елементну модель [45, 57], яка дозволяє оцінювати напружено-деформований стан конструкцій. Модель оболонки налічує 45644 вузлів і 7484 кінцевих елементів. Реалізоване 3D-моделювання арочної конструкції (рис. 2.21, 2.22).

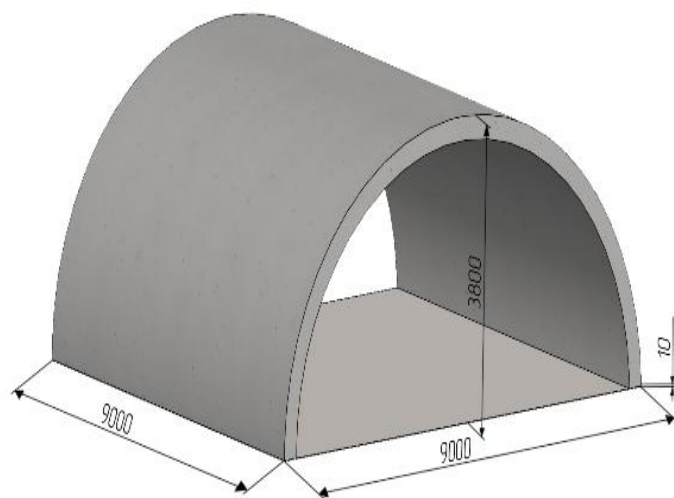


Рис. 2.21. Арочна конструкція з металевим листом

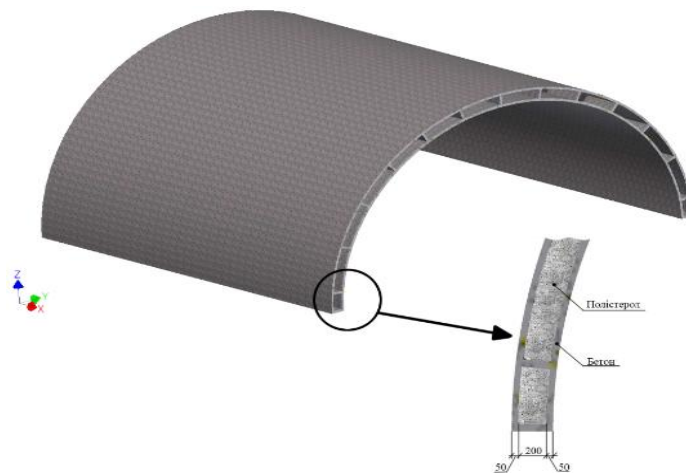


Рис. 2.22. Конструктивно анізотропна оболонка 9×9 м з поліестерними вкладишами.

Модель розраховувалась при навантаженні від власної ваги конструкції, з навантаженням від снігового покриву 1600 Па/м^2 (рис. 2.23) та зосередженого навантаження 1 т/м^2 (рис. 2.24, 2.25).

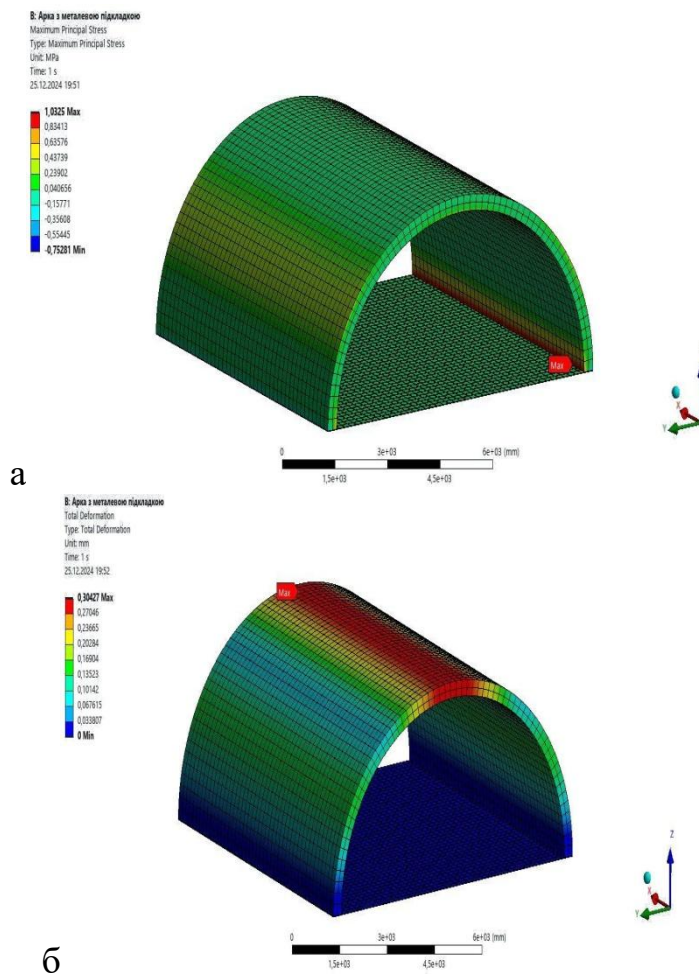
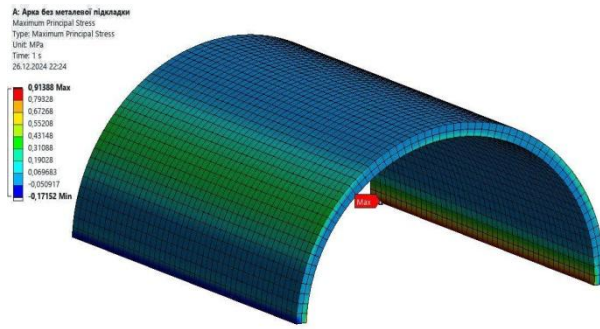
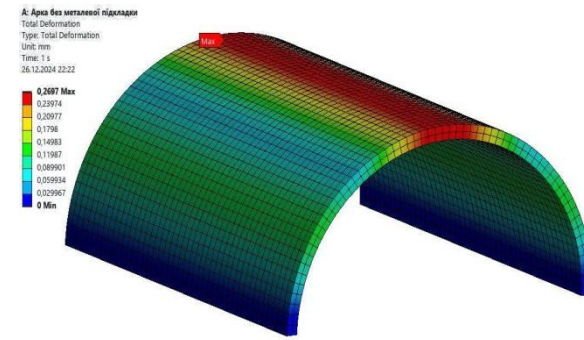


Рис. 2.23. Напруги (а) та деформація (б) конструкції з металевим листом від власної ваги та снігового покриву.

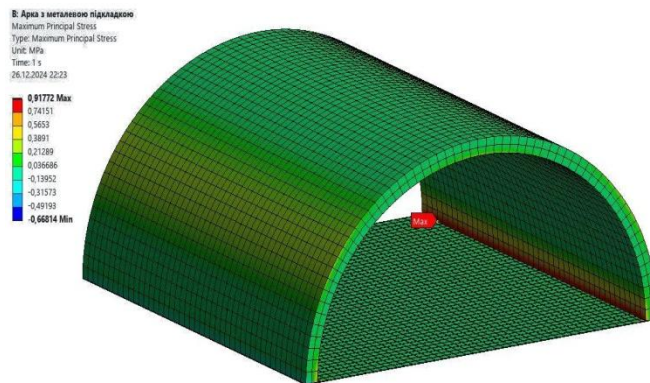


а

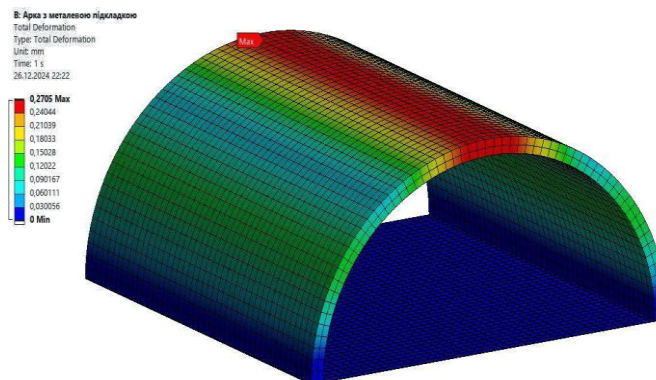


б

Рис. 2.24. Напруги (а) та деформація (б) конструкції без металового листа від дії зосередженого навантаження 1 т/м^2



а



б

Рис. 2.25. Напруги(а) та деформація (б) конструкції з металевим листом від дії зосередженого навантаження 1 т/м^2

Обпирання призначалось шарнірно нерухомим за чотирма кутовими точками оболонки в плані. Інструментарій розрахункового комплексу «Ansys» дозволяє проводити автоматичну триангуляцію складних форм на кінцеві об'ємні елементи шляхом автоматичного імпорту з допоміжного програмного комплексу тривимірного моделювання. Результати розрахунків зведені у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Зведена таблиця одержаних результатів

Параметри	Конструктивно-анізотропна оболонка 9 × 9 м з полістирольними вкладишами	Конструктивно-анізотропна оболонка 9 × 9 м з полістирольними вкладишами та з металевим листом у нижньому поясі $\delta = 10$ мм
Геометрія (довжина, ширина, висота), м	9×9×3,8	9×9×3,8
Максимальні напруги від власної ваги, МПа	0,827 МПа	0,831 МПа
Максимальні напруги від власної ваги та снігового покриву, МПа	0,827 МПа	1,033 МПа
Максимальні деформації від власної ваги, мм	0,244 мм	0,24 мм
Максимальні деформації від власної ваги та снігового покриву, мм	0,244 мм	0,3 мм
Максимальні деформації від зосередженого навантаження 1 т/м ²	0,269 мм	0,271 мм
Максимальні напруги від зосередженого навантаження 1 т/м ²	0,914 МПа	0,917 МПа

Застосовано енергетичний критерій, що до раціоналізації зовнішніх конструктивних параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок. За результатами дослідження визначено, що (для розглянутих конкретних умов) при $H \approx 3,8$ м потенційна енергія деформації досягає нижньої межі.

Отримані результати верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень N та оцінена максимальна несуча здатність (q_{\max}) оболонки.

Визначено взаємозв'язок раціональних параметрів у конструктивно-анізотропній оболонці між ПЕД системи зовнішніх и внутрішніх раціональних параметрів: при величині кроку ребер близько до $l \approx 1000$ мм ПЕД досягає нижньої межі, проведено чисельне дослідження НДС архітектурно композиційної споруди, виконаної з бетону з вкладишами з полістиролу; виконано порівняльний аналіз конструктивно-анізотропною оболонкою 9×9 м з полістирольними вкладишами та з металевим листом у нижньому поясі $\delta = 10$ мм. Аналіз НДС проведено методом скінченних елементів (МСЕ) в спеціалізованих програмних комплексах «Autodesk Inventor» та «Ansys» з використанням модуля «Static Structural». Виходячи з результатів розрахунку можна побачити, що напруги від власної ваги, напруги від власної ваги та снігового покриву та від зосередженого навантаження для конструкції без металевих листів мають малі величини. Резюмуючи перераховане, можна констатувати, що з економічної точки зору, для забезпечення найбільш прийнятого розподілу зусиль, який представляє собою задану несучу здатність при обмеженні використання матеріалу найбільше підходять конструктивно-анізотропні залізобетонні оболонки 9×9 м з полістирольними вкладишами, які сприймають зазначені види навантаження.

2.4. Математичне моделювання процесу тепломасообміну в конструктивно-анізотропних конструкціях при високих температурах

Актуальними є дослідження, присвячені поведженню залізобетонних конструкцій зі складною внутрішньою геометрією під час впливу високих температур із урахуванням матеріалу вкладишів-порожниноутворювачів. Застосування вкладишів, які не виймаються, дозволило створити нову архітектурно-будівельну систему «МОНОФАНТ». Вона характеризується зменшенням ваги основних залізобетонних елементів каркасного будинку та застосуванням вкладишів у якості утеплювача. Це викликає необхідність проведення як натурних, так і чисельних досліджень в цьому напрямку. В роботі

розглянуті рівняння термоупругості анізотропних конструкцій. Теплофізичні властивості матеріалів залежать від температури, тому задача розглядається як нелінійна. В умовах стаціонарного температурного навантаження залізобетонних конструкцій, з'являється вплив температури на деформації, а також вплив деформації на температурне поле.

Отримано поля розподілу температур за висотою перетину анізотропної конструкції при нагріванні за режимом стандартного пожежі для інтервалу часу 0–240 хв. Розглянуто ПДВ залізобетонної плити перекриття архітектурно-будівельної системи «МОНОФАНТ» під дією високих температур при нагріванні за режимом стандартної пожежі та з урахуванням змінювання розрахункової схеми. Чисельний експеримент довів відповідність межі вогнестійкості плити R60.

Вплив трансформації розрахункового перетину не був значним. Зниження несної здатності склало близько 17% порівняно з не нагрітою плитою. Запропоновано алгоритм, який враховує трансформацію розрахункових схем залежно від величин температур і надлишкового тиску в порожнинах розташування утеплювача

Останнім часом теорія термопружності отримала значного розвитку при розробці нових конструкцій, оскільки для багатьох сучасних конструкцій, які працюють в екстремальних або близьких до нього режимах характерним є наявність теплових впливів як в процесі виготовлення, так і при їх експлуатації [51].

Елементи цих конструкцій працюють в умовах нерівномірного нагріву, при якому змінюються фізико-механічні властивості матеріалів і виникають градієнти температури, що супроводжуються неоднаковою зміною частин елементів.

Нерівномірна теплова зміна в загальному випадку не може відбуватися вільно в суцільному тілі, вона викликає теплові (термічні, температурні) напруги. Знання величини і характеру дії теплових напружень необхідно для багатофакторного аналізу міцності конструкції.

Теплові напруги самі по собі і в поєднанні з механічними напруженнями від зовнішніх сил можуть викликати появу тріщин і руйнування конструкції з матеріалу з підвищеною крихкістю. Деякі матеріали при швидкому виникненні напружень, обумовленому дією різко нестационарного температурного поля, стають крихкими і не витримують теплового удару. Повторна дія теплових напружень

призводить до термовтомного руйнування елементів конструкції. Дія теплових напружень може викликати значну пластичну деформацію, що веде до повного або прогресуючого руйнування конструкції, термовипучування тонкостінної конструкції тощо.

У зв'язку з цим видається актуальним дослідження впливу температури на напружено-деформований стан елемента, але ще більший інтерес представляє зворотне завдання: вплив деформацій на температуру.

Задача теплопровідності матеріалу була свого часу розглянута дослідниками, такими як Л.Д. Ландау та Е.М. Ліфшиц [52, 53]. Вони за допомогою методів класичної термодинаміки отримали пов'язані рівняння термопружності. Для наочності розглянемо рівняння теплопровідності в твердих тілах, запропоновані Л.Д. Ландау.

Нерівномірне нагріте тверде середовище не призводить до виникнення в ній конвекції, як це зазвичай має місце в рідинах. Тому перенесення тепла здійснюється тут однієї тільки теплопровідністю. У зв'язку з цим процеси теплопровідності в твердих тілах описуються порівняно більш простими рівняннями, ніж в рідинах, де вони ускладнюються конвекцією.

Рівняння теплопровідності в твердому середовищі може бути виведено безпосередньо з закону збереження енергії, який виражений у формі рівняння безперервності для кількості тепла. Кількість тепла, що поглинається в одиницю часу в одиниці об'єму тіла, так само $T \frac{dS}{dt}$, де S – ентропія одиниці об'єму. Ця величина повинна бути прирівняна – $div q$, де q – щільність теплового потоку. Цей потік практично завжди пропорційний градієнту температури, тобто може бути записаний у вигляді $q = -\chi \nabla T$ (χ – теплопровідність). Таким образом,

$$T \frac{dS}{dt} = div(\chi \nabla T). \quad (2.4)$$

Будемо припускати, що, як це зазвичай має місце, наявні в тілі різниці температур досить малі для того, щоб можна було вважати постійними такі величини, як χ і т.п. Тоді рівняння (2.4) після підстановки написаного для S вираження прийме вигляд:

$$T \frac{dS_0}{dt} + aKT \frac{du_{ii}}{dt} = x\Delta T.$$

Згідно з формулою маємо

$$C_p - C_0 = Ka^2T.$$

Похідну від S_0 можна написати як

$$\frac{dS_0}{dt} = \frac{dS_0}{dT} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{C_0}{T} \frac{dT}{dt}$$

(похідна $\frac{dS_0}{dt}$ береться при $u_{ii} = \text{div } u = 0$, тобто при постійному обсязі).

В результаті отримаємо рівняння теплопровідності в такому вигляді:

$$C_v \frac{dT}{dt} + \frac{C_p - C_v}{a} \frac{d}{dt} \text{div} u = x\Delta T. \quad (2.5)$$

Для того щоб отримати повну систему рівнянь, треба приєднати сюди ще рівняння, що визначає деформацію нерівномірно нагрітого тіла. Цим рівнянням є рівняння рівноваги.

$$2(1 - \sigma) \text{grad} \text{div} u - 1(1 - 2\nu) \text{rot} \text{rot} u = \frac{2a(1 + G)}{3} \nabla T. \quad (2.6)$$

З рівняння (1) може бути визначена, в принципі, деформація тіла при довільно заданому розподілі температури. Підстановка отриманого таким чином для виразу в рівняння (2.5) приведе до рівняння, що визначає розподіл температури, в якому невідомою функцією є тільки одна $T(x, y, z, t)$

Розглянемо, наприклад, теплопровідність в необмеженому твердому середовищі з розподілом температури, що задовольняє тільки одній умові: на нескінченності температура прагне до постійної межі

T_0 і деформація відсутня. У такому випадку рівняння (3) призводить до наступної залежності між $divu$ та T :

$$divu = \frac{1 + \sigma}{3(1 - \sigma)} a(T - T_0).$$

Підставляючи цей вираз у (2.5), отримаємо рівняння типу простого рівняння теплопровідності:

$$\frac{(1 + \sigma)C_p + 2(1 + \sigma)C_v}{3(2 - \nu)} \cdot \frac{dT}{dt} = x\Delta T. \quad (2.7)$$

Рівнянням такого ж типу описується і розподіл температури вздовж довжини тонкого прямого стрижня, якщо хоча б один з його кінців не закріплений. Розподіл температури вздовж кожного з поперечних перерізів стрижня можна вважати постійним, тобто T буде функцією тільки від координати x вздовж його довжини (і від часу).

Теплове розширення такого стрижня призводить тільки до зміни його довжини без зміни прямолінійної форми і без виникнення внутрішніх напружень в ньому. Тому зрозуміло, що похідна $\frac{dS}{dt}$ у загальному рівнянні (2.4) повинна братися при постійному тиску, і оскільки $\left(\frac{dS}{dt}\right)_p = \frac{C_p}{T}$, то розподіл температури буде описуватися одновимірним рівнянням теплопровідності:

$$C_p \frac{dT}{dt} = x \frac{d^2T}{dx^2}.$$

Треба, втім, відзначити, що з практично достатньої точності розподіл температури в твердому тілі може завжди визначатиметься простим рівнянням теплопровідності. Але у твердих тілах різниця між різними теплоємкостями зазвичай дуже мала і якщо нехтувати нею, то рівняння теплопровідності в твердих тілах можна завжди писати у вигляді:

$$\frac{dT}{dt} = \chi \Delta T \quad (2.8)$$

де χ – є температуропровідність, що визначається як відношення $\chi = x / C$. Коефіцієнт x до деякої середньої теплоємності C одиниці об'єму.

Черговим етапом розвитку у вирішенні поставленого завдання є робота В. Новацького [53], який узагальнює в єдине ціле дві незалежні раніше дисципліни – теорію пружності і теорію теплопровідності, відкриваючи новий розділ механіки – термопружність. Головною ідеєю теорії термопружності є взаємний вплив полів деформації та температури.

Рішення, в цьому випадку, будується в наступному порядку: на основі рівняння теплопровідності знаходиться розподіл температури в конструкції, а потім інтегруються рівняння теорії пружності в переміщеннях, що містять вже знайдені члени, залежні від градієнта температури [54]. Подібний підхід істотно спрощує рішення розглянутої проблеми.

Проблеми вогнестійкості каркасних залізобетонних конструкцій вивчали багато дослідників [55–60]. Приміром, у роботі [55] наведено результати широких випробувань залізобетонних каркасних коняструкцій. Розглядалися як окремі конструктивні елементи, так і каркаси, виконані в натуральну величину. Проблемам моделювання каркасних залізобетонних споруд присвячено роботи [56, 57]. У цих роботах, як і в переважній більшості сучасних робіт щодо моделювання впливу високих температур унаслідок надзвичайного впливу пожежі, використовувалися програмні комплекси, що ґрунтуються на застосуванні методом скінченних елементів (МСЕ). Особливості матеріалів під час впливу на них високих температур висвітлено в роботах [58–60].

У зв'язку зі сказаним, необхідна побудова математичної моделі процесів для чисельного дослідження впливу деформацій внутрішнього шару (утеплювача) на розподіл температур в залізобетонній конструкції, яка має складну внутрішню геометрію за рахунок вкладишів-порожниноутворювачів, які не виймаються. В якості утеплювача широко застосовується пінополістирол (ППС). Таку конструкцію можна вважати монококовою у вигляді зовнішньої залізобетонної оболонці. Під дією температури були встановлені зміни

всередині конструкції, а саме зміна форми вкладиша із піно полістиролу [61] і перехід твердого тіла в рідкий і газоподібний стан. Пінополістирол є термопластичним матеріалом. Початок розкладання ППС визначається температурою 265 °С, що відповідає втраті 8% маси за рахунок видалення вологи і легколетючих продуктів. Температура максимальної швидкості деструкції 320 °С відповідає 40% втрати маси. Цьому процесу передують скловання при температурі 180 °С і окислення, що характеризується початком при температурі 230 °С і закінченням при температурі 390 °С (72% втрати маси). Максимуму окислювальних процесів досягають при температурах 300–350 °С.

У загальному випадку зміна температури тіла відбувається не тільки внаслідок підведення тепла від зовнішніх джерел, але і в результаті самого процесу деформування.

У процесі розвитку сучасного будівництва із застосуванням монолітного та збірного залізобетону постійно підвищуються вимоги до конструкцій що зводяться, а саме: створення нових архітектурних форм для облаштування різноманітних житлово-цивільних об'єктів, полегшення застосовуваних конструкцій і вдосконалення традиційних технологій бетонування шляхом застосування нових матеріалів [62].

Однією з систем, які відповідають сучасним вимогам щодо залізобетонних конструкцій, є архітектурно-будівельна система «МОНОФАНТ» [26], розроблена під керівництвом проф. В.С. Шмуклера. Особливостями цієї системи є те, що вкладиші-порожниноутворювачі використовують для зменшення ваги не тільки залізобетонних перекриттів, але й усіх основних елементів каркасного будинку (рис. 2.26). Застосування цієї системи можливо під час будівництва нових або реконструкції наявних будинків [27, 28, 29].

Всі основні конструкції системи можна розглядати, як оболонки, що складаються з зовнішніх обшивок, внутрішніх ребер та вкладишів-порожниноутворювачів. Додатковою функцією вкладишів є їх застосування у якості утеплювачів. Ефективність залізобетонних конструкцій цієї системи обумовлюється можливістю зміни форми та розмірів вкладишів та товщини зовнішніх обшивок та внутрішніх ребер. За рахунок цього можна досягти більш рівномірного розподілу значень внутрішніх зусиль (згинальних моментів) в елементах системи.

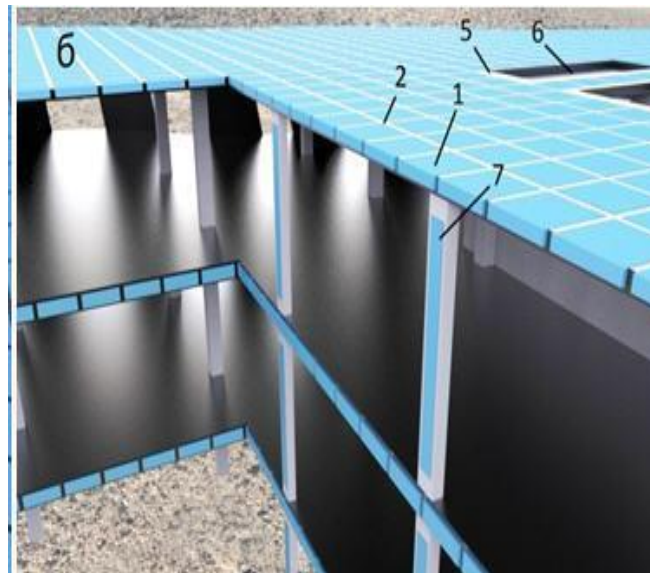
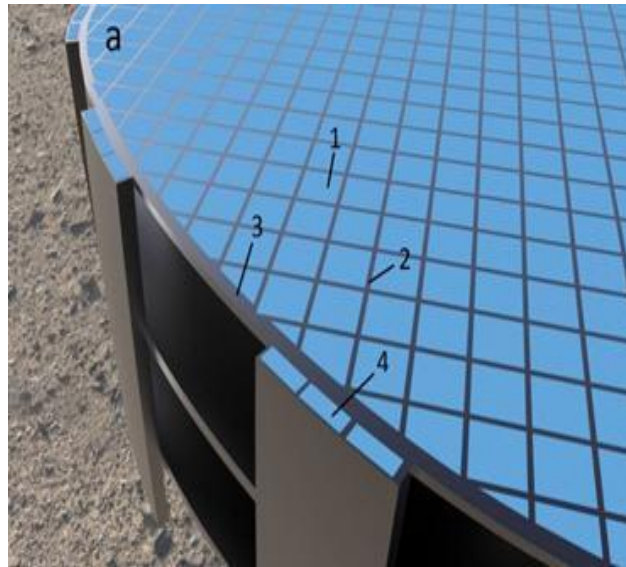


Рис. 2.26. Конструкція елементів архітектурно-будівельної системи «Монофант»: а – розташування вкладишів в перекритті та зовнішніх елементах жорсткості; б – розташування вкладишів в елементах системи; 1 – вкладиш-порожниноутворювач; 2 – внутрішні ребра жорсткості перекриття; 3 – зовнішнє окантування перекриття ребром жорсткості; 4 – вкладиш-порожниноутворювач у зовнішніх елементах жорсткості; 5 – внутрішнє окантування перекриття ребром жорсткості; 6 – отвори в перекритті; 7 – вкладиш-порожниноутворювач у колоні

Незважаючи на всі переваги системи «МОНОФАНТ», необхідно дослідити вплив високих температур унаслідок надзвичайної ситуації (пожежа) на залізобетонну конструкцію. У цій роботі розглянемо тільки плиту перекриття системи, що буде піддаватися пожежі.

Конструкція плити перекриття характеризується простою зовнішньою і складною внутрішньою геометрією (рис. 2.27). Головною особливістю такої конструкції є вкладиші в тілі плити, виконанні із легких, часто використовуваних в будівництві матеріалів (пінополістирол, мінеральна вата тощо).

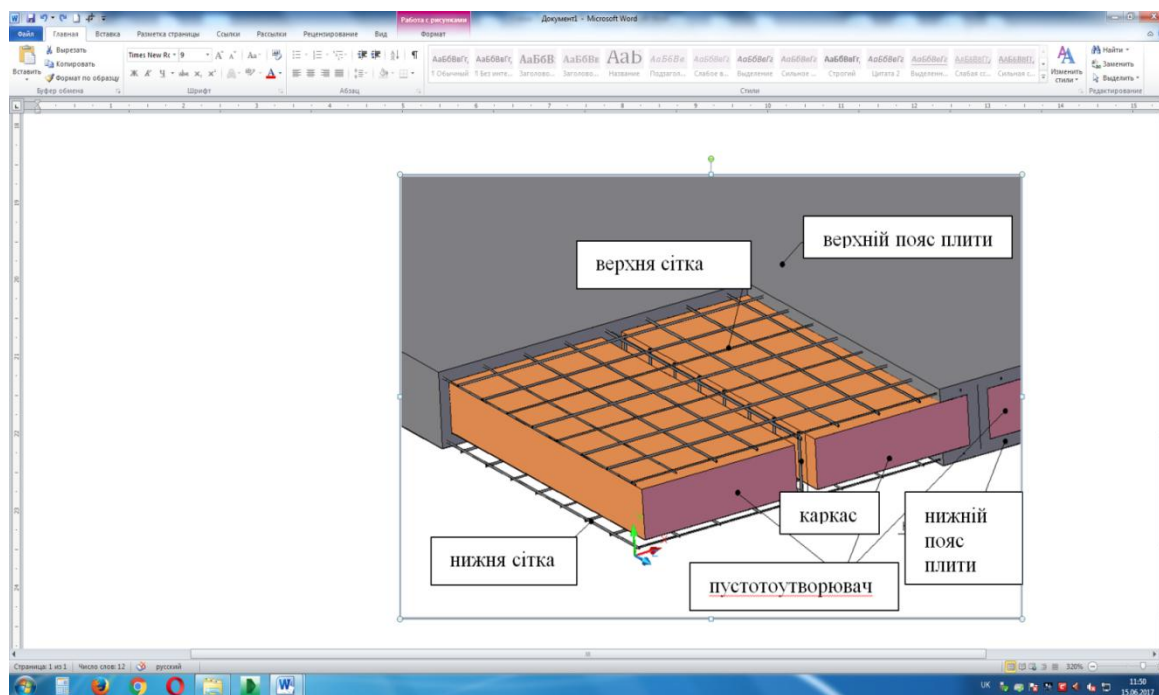


Рис. 2.27. Конструктивні особливості плити перекриття архітектурно-будівельної системи «МОНОФАНТ»

Запропонований алгоритм

Оскільки внутрішня анізотропна структура елементів плити перекриття сформована з різних матеріалів, у ній спостерігаються місця збільшені неоднорідні теплові потоки. Зазначена неоднорідність гіпотетично може стати причиною взаємовпливу температури й деформації і навпаки. З огляду на це видається доцільним оцінювати цю взаємодію за допомогою динамічної теорії термопружності [53].

Ця теорія базується на припущеннях В. Новацького [53, 54] про те, що деформація твердого тіла тісно пов'язана зі змінюванням уміщеного в ньому тепла та розподілу температури в конструкції. Змінюване в часі поле температур спричиняє змінювання поля деформацій та навпаки. Внутрішня енергія конструкції, таким чином, обумовлюється деформаціями і температурами.

Варто зазначити, що вплив поля деформацій на розподіл температур в твердих тілах незначний, крім випадків різкої (стрибко-подібної) зміни температур [56]. Проте з огляду на неоднорідну внутрішню структуру формованої конструкції і невивченість процесів, які можуть виникнути в сталих і, особливо, аномальних умовах, вважається закономірною початкова відмова від традиційних гіпотез і припущень, які обґрунтовують поділ рівнянь Фойгта-Джеффріса і Ляме.

У зв'язку з цим, спочатку розглядається модель, що визначається системою лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} \mu \nabla^2 u + (\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} U + X = \gamma \operatorname{grad} T + \rho U \\ \nabla^2 T - (1/x) T - \eta \operatorname{div} U = -Q/x \end{cases} \quad (2.9)$$

При заданих крайових і початкових умовах.

У системі (2.9), записаній у векторній формі, прийняті такі позначення:

U – вектор переміщення;

T – температура;

μ, γ – постійні Ляме, що відповідають ізотермічному стану;

$\mu, \gamma = (3\lambda + 2\mu)\alpha_T$;

ρ – інерційний коефіцієнт (узагальнена маса);

$X = \frac{\lambda_0}{C_0}$;

$\eta = \frac{\gamma \cdot T_0}{\lambda_0}$;

$Q = \frac{W}{\lambda_0}$;

α_T – коефіцієнт лінійного термічного розширення;

W – кількість тепла, виробленого в одиниці об'єму тіла за одиницю часу;

λ_0 – коефіцієнт теплопровідності;

T_0 – температура тіла в недеформованому й ненапруженому стані (зовнішні сили відсутні);

C_0 – питома теплоємність при постійній деформації.

До моделі, що задається (6) додамо ряд передумов і припущень:

1) вважається наближено можливим ототожнення залежності «інтенсивність напружень – інтенсивність деформацій» із залежністю «напруження – деформація», отриманої шляхом експериментального випробування стандартного зразка при одноосьовому завантаженні (аналог другої гіпотези теорії малих пружно-пластичних деформацій);

2) вважаються відомими (здебільшого, з експериментів) залежності фізико-механічних характеристик матеріалу конструкцій від температур [53];

3) величини міцності й деформаційних параметрів вкладишів-порожниноутворювачів вважаються величинами другого порядку нескінченно малих величин стосовно аналогічних параметрів базового матеріалу (залізобетону);

4) конструкція в процесі нагрівання (охолодження) зазнає низки станів, що характеризуються зміною температури оболонки, тиску й обсягу матеріалу у внутрішній порожнині;

5) матеріал вкладиша-порожниноутворювача, зі свого боку, при нагріванні може переходити з твердого стану в рідкий (точка плавлення) і з рідкого в газоподібний [53];

б) коливання температур і тисків, що виникають в порожнині оболонки (за рахунок конвективного процесу), вважаються гармонійними, тобто $T = T_1 \sin \omega t$, (T_1 – амплітуда температури, ω – частота);

7) вважається, що тиск в порожнинах змінюється в часі відповідно до виразу $P = P_1 \cdot e^{-\beta(t)-t}$ (P_1 – максимальний тиск, $\beta = \beta(t)$ – відома функція (константа), різновид якої потрібно встановити шляхом розгляду процесу тріщиноутворення об'єми й фізико-механічних флуктуацій утеплювача);

8) зазначені флуктуації в матеріалі вкладиша, зумовлюють необхідність уведення в розгляд низки послідовних розрахункових схем, що відображають цю специфіку (рис. 2.28);

Систему (2.9) при заданих граничних і початкових умовах доцільно розв'язувати ітераційно.

а) для $T \leq T^*$ (T^* – температура плавлення);

б) для температур $T > T^*$ (до утворення тріщин);

в) для температур $T < T^*$ (після утворення тріщин).

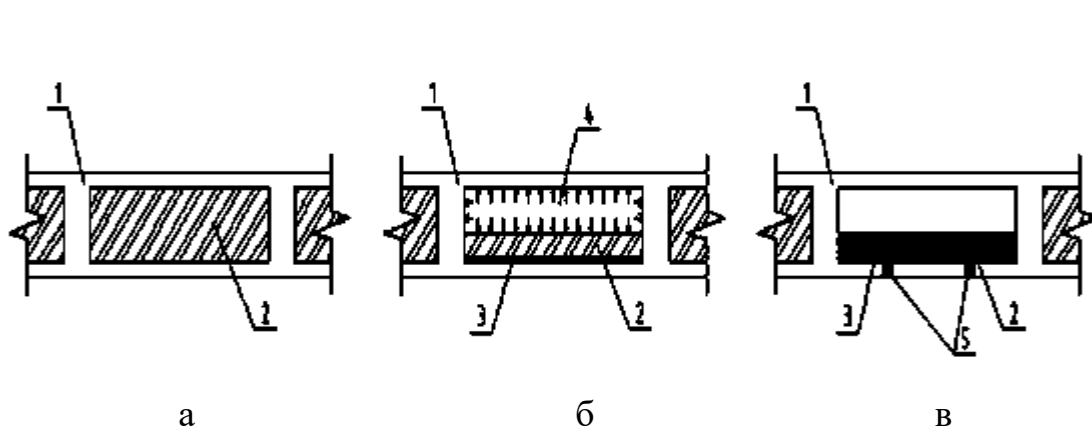


Рис. 2.28. Розрахункові схеми, що враховують флуктуації вкладиша-порожниноутворювача: 1 – залізобетонна оболонка; 2 – вкладиш-порожниноутворювач; 3 – рідка субстанція; 4 – газоподібна субстанція з тиском – P ; 5 – тріщини

Тоді алгоритм розв’язання включатиме такі операції:

- завдання температурного поля T , яке задовольняє початкові умови;
- визначення за допомогою методу кінцевих елементів вектора переміщень (перше рівняння системи (2.9));
- підставлення знайденого вектора $\{u\}^0$ в (2.9) і визначення поля T ;
- підставлення температурного поля T в (2.9) і визначення нового вектора переміщень $\{u\}^H$;
- виконання зіставлення вихідного вектора $\{u\}^0$ та нового вектора $\{u\}^H$ переміщень;

$$\left| u_k^0 \right| - \left| u_k^H \right| \leq \varepsilon, \quad (2.10)$$

де $k = 1, 2, \dots, N$,

N – кількість точок порівняння;

ε – задана точність.

У разі виконання (2.10) процедура призупиняється. В іншому разі проводиться привласнення $\{u\}^0 = \{u\}^H$ і вся процедура повторюється знову до виконання (2.10).

Незначна кількість досліджень, присвячених дослідженню залізобетонних конструкцій зі складною внутрішньою геометрією під час впливу високих температур із урахуванням матеріалу порожниноутворювачів, призводить до необхідності проведення як натурних, так і чисельних досліджень.

Метою цих досліджень має бути не тільки визначення реальних меж температур у перетинах конструкцій протягом встановлених нормативними документами проміжків часу, але й вивчення трансформації розрахункових схем (геометричної нелінійності) унаслідок дії високих температур, а також розроблення загального підходу щодо врахування цих факторів.

Об'єктом дослідження було обрано плиту перекриття архітектурно-будівельної системи «МОНОФАНТ».

Проведемо дослідження напружено-деформованного стану нового типу архітектурно-будівельної системи «МОНОФАНТ» унаслідок одночасного впливу вертикальних навантажень і нагрівання за стандартним режимом пожежі. Отримаємо поля температур за висотою перетину для всіх меж вогнестійкості. Запропонований алгоритм ураховує трансформації розрахункової схеми залежно від величин температур і надлишкового тиску в порожнинах розташування утеплювача.

Об'єктом чисельного дослідження було обрано квадратну в плані плиту з розміром грані 4 м, виготовлену з важкого бетону класу С25/30. Робоча арматура в кожному ребрі була такою: внизу – $\varnothing 14A400C$; угорі – $\varnothing 8A400C$. Висота перетину плити – 300 мм; крок ребер – 1 м, а ширина ребра – 150 мм. Товщина верхньої і нижньої обшивки становила 50 мм. Загальне вертикальне навантаження, зокрема й власна вага, становили 10 кН.

Процедура чисельного дослідження включала наступні етапи:

1. Визначення температурного поля в плиті перекриття під впливом високих температур при нагріванні знизу за режимом стандартної пожежі.

2. Аналіз в кінцево-елементній постановці плоских перетинів плити в різні моменти часу із завданням вертикальних навантажень, діючої температури та надлишкового тиску від плавлення ППС, якщо таке могло бути в цей момент часу, із метою визначення моменту трансформації розрахункової схеми.

3. Визначення наведеної згинальної товщини плити перекриття і встановлення виникаючих зусиль унаслідок впливу температури в заданий момент часу і вертикального навантаження.

4. Визначення несучої здатності перетину плити відповідно до деформаційної методики зазначеної в ДСТУ Б.В.2.6-156:2010 [19], з урахуванням вимог EN 1992-1-2 [20] і зіставлення цих даних із виникаючими зусиллями.

Слід зазначити, що експериментальні дослідження вогнестійкості залізобетонних конструкцій проводилися проф. В.С. Шмуклером (рис. 2.29) [73].



Рис. 2.29. Вогневий вплив на будівельну конструкцію (дослідження проф. В.С. Шмуклера) [73]

Для створення моделей чисельного дослідження було використано програмні комплекси із застосуванням МСЕ [71]. Конфігурація і розміри елементів у цих моделях визначається на підставі тестових завдань, шляхом перевірки співвідносності методу скінченних елементів і оцінювання точності отриманих результатів (рис. 2.30).

Температурні поля по перерізу плити перекриття при односторонньому нагріванні за режимом стандартної пожежі було отримано в ПК «Ansys» [71] на об'ємній скінченно-елементній моделі.

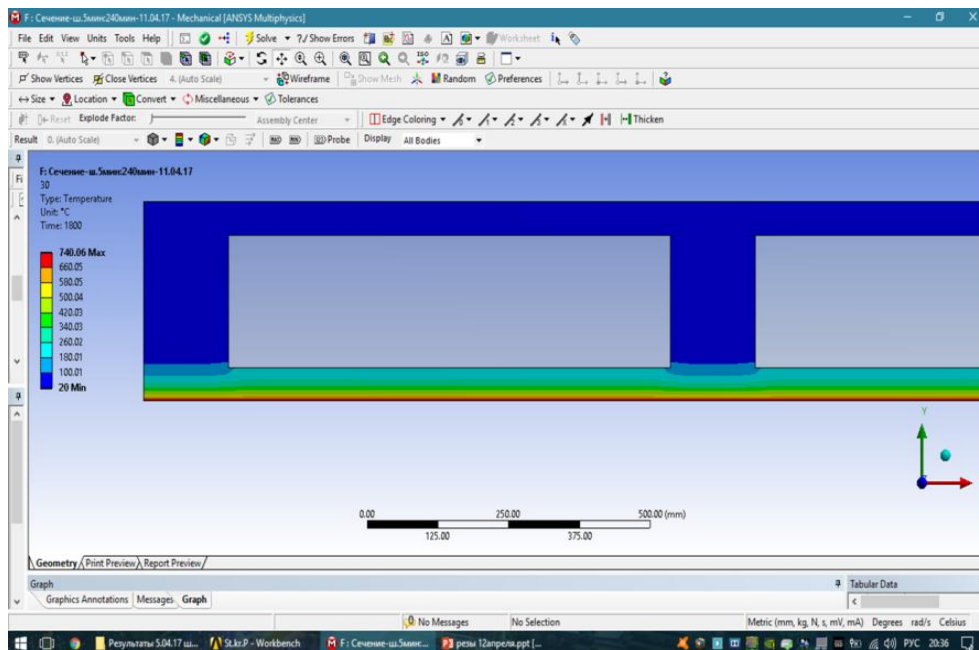


Рис. 2.30. Чисельне дослідження впливу деформацій внутрішнього шару (утеплювача) на розподіл температур в плиті перекриття

Визначено температурні поля для часу нагрівання від 0 хв до 240 хв. Але для плит перекриттів житлових і адміністративних будівель вимога вогнестійкості зазвичай становить R 60, тому для подальшого аналізу використовувалися температурні поля для часу не пізніше 60 хв.

З метою визначення впливу надлишкового тиску, що втрачається внизу утеплювача при нагріванні, у ПК «Ліра-САПР» було розроблено 12 плоских моделей, створених скінченно-елементної оболонки нульової гаусової кривизни [62].

Кожна з скінченно-елементних моделей відображала перетин плити перекриття в певний момент часу (5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 60 хв).

Відповідно до раніше отриманих полів температур у кожен скінченно-елементній моделі задавалася температура як навантаження.

Крім цього у всіх моделях було прикладено повне вертикальне навантаження, а в моменти часу, коли температура утеплювача досягала значень плавлення (рис. 2.31), прикладався надлишковий тиск унаслідок плавлення утеплювача [73].

Розрахунки показали, що після 30 хв у порожнині плити створювалося настільки великий надлишковий тиск, що напруги розтягнення для бетону С25/30 досягали граничних значень ($f_{ctm} = 2,6$ МПа) (рис. 2.31).

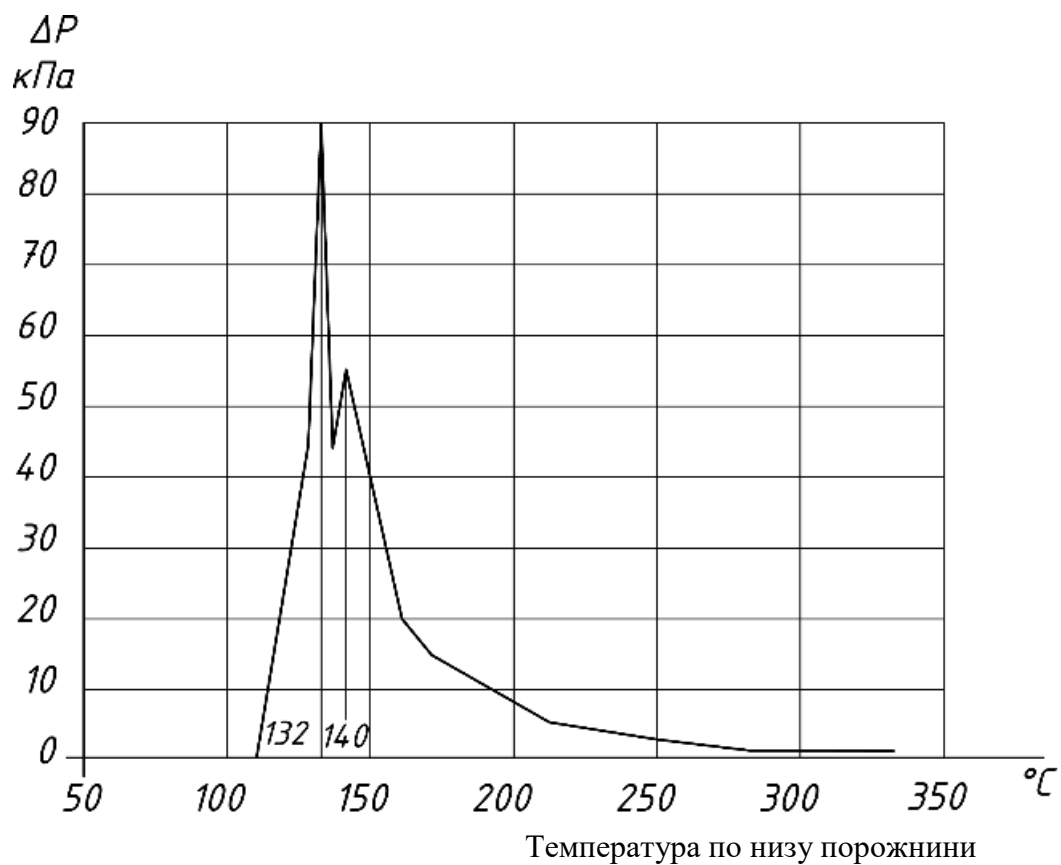


Рис. 2.31. Графік надлишкового тиску на рівні низу утеплювача при нагріванні [73]

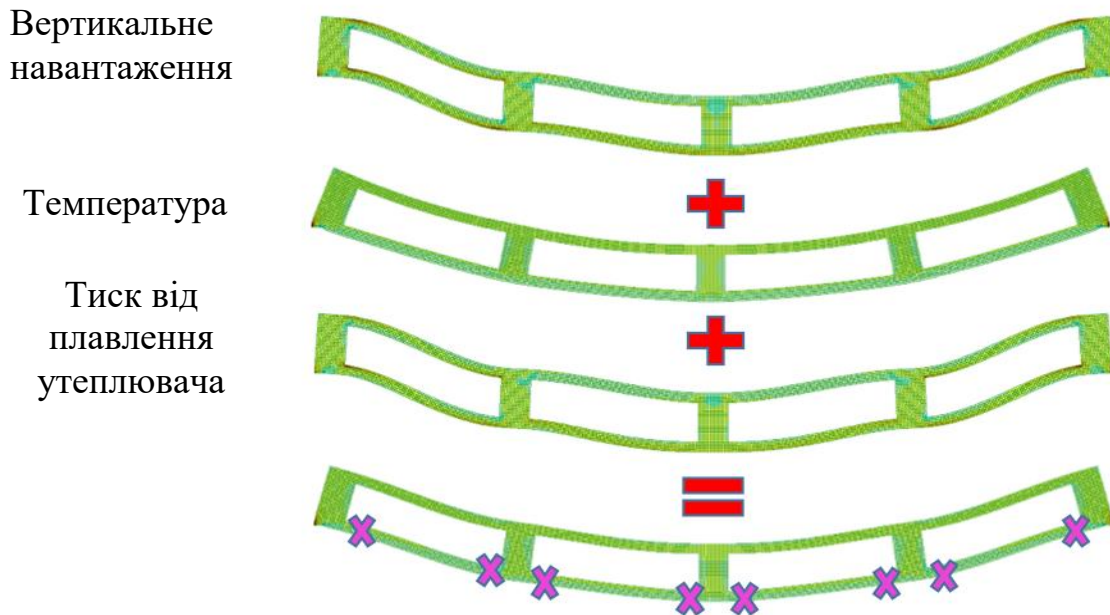


Рис. 2.32. Особливості деформування перетину плити перекриття після 30 хв стандартної пожежі

Для отримання остаточних зусиль від спільного впливу вертикальних навантажень і температури розглядалася скінченно-елементна модель плити, виконана також із оболонки нульової гаусової кривизни. Наведена товщина плити визначалася за формулою (2.11). Приміром до впливу надлишкового тиску від плавлення утеплювача наведена товщина становила 27,4 см, а після порушення цілісності нижньої обшивки – 21,5 см:

$$\frac{b_{eff} \Delta}{12} = I_x \Rightarrow \Delta = \sqrt[3]{\frac{12 I_x}{b_{eff}}}, \quad (2.11)$$

де b_{eff} – наведена ширина полиці перетину;

I_x – заздалегідь обчислений момент інерції перетину (рис. 2.33);

Δ – наведена товщина плити.

На рис. 2.33. подано перетин плити перекриття: зліва до 30 хв при нагріванні за режимом стандартної пожежі, справа – після 30 хв.

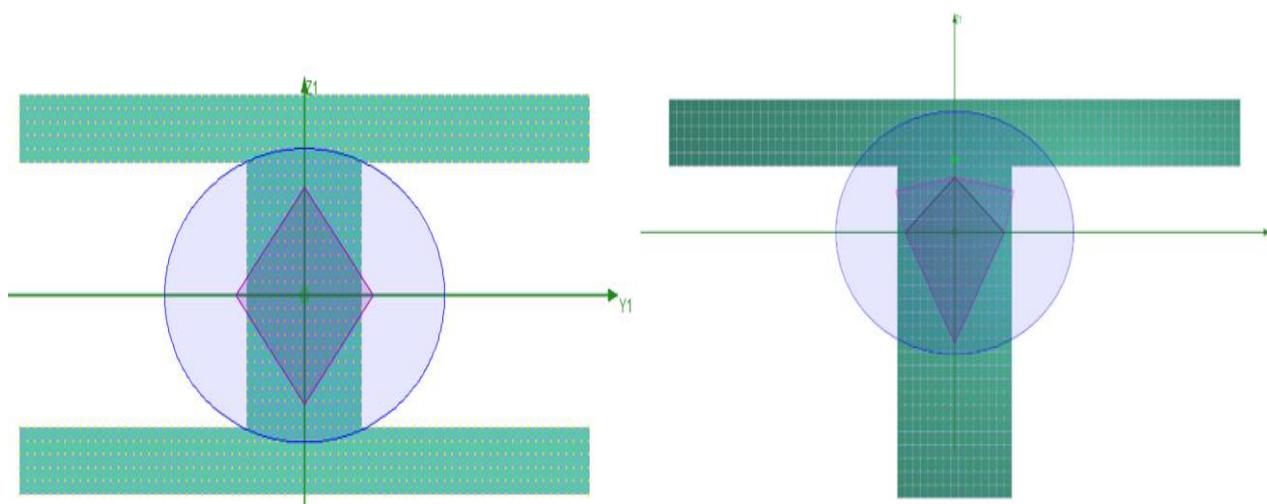


Рис. 2.33. Перетин плити перекриття з еліпсом інерції і ядром перетину

Визначення несної здатності перетинів, що зазнають впливу високих температур, було проведено за деформаційною методикою, описаною в [69], а облік впливу температур було реалізовано за методом ізотерми 500 °С [70]. У цій методиці припускається, що у бетон, нагрітий понад 500 °С, не має відповідної міцності і жорсткості, а бетон нагрітий до температури менше 500 °С, зберігає такі самі характеристики, як і при сталій температурі. Фізико-механічні характеристики арматури було задано з урахуванням несприятливого впливу температури, що діє в певний період часу (60 хв) у місці розташування арматурного включення.

Чисельний експеримент розглядуваної плити довів відповідність межі вогнестійкості R60. Вплив трансформації розрахункового перетину не був значним. Зниження несної здатності склало ~ 17 % порівняно з не нагрітою плитою.

Висновки за розділом

Запропоновано алгоритм, який враховує трансформацію розрахункових схем залежно від величин температур і надлишкового тиску в порожнинах розташування утеплювача.

Отримано поля розподілу температур за висотою перетину анізотропної плити при нагріванні за режимом стандартного пожежі для інтервалу часу 0–240 хв. Розглянуто ПДВ плити перекриття нового типу архітектурно-будівельної системи «МОНОФАНТ» під

дією високих температур при нагріванні за режимом стандартної пожежі та з урахуванням змінювання розрахункової схеми. Встановлено відповідність цієї плити межі вогнестійкості R60.

Розділ 3.

ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ СКЛОПЛАСТИКОМ

3.1. Актуальність застосування склопластиків для підсилення

Одним з основних завдань сучасного будівництва є створення ефективних і надійних виробів і конструкцій. Особливо гостро стоять питання вдосконалення виробів, експлуатованих в агресивних середовищах. Нерідко потрібно створити конструкції, які за своїм функціональним призначенням повинні володіти немагнітними, діелектричними та іншими спеціальними властивостями, тобто коли традиційні матеріали не придатні.

Сучасний рівень науки і техніки дозволяє створювати будівельні вироби і конструкції, що відповідають таким вимогам. Основою для цього служить комплекс заходів, що застосовуються на стадіях розробки, виготовлення і експлуатації.

Застосування пластмас в будівництві дозволяє підвищити довговічність, надійність і інші експлуатаційні якості будівель і споруд, значно знизити їх масу, скоротити терміни і трудомісткість будівництва при істотній економії металу, цементу, деревини та інших матеріалів.

До числа найбільш поширених сучасних освоєних промисловістю конструкційних пластмас відносяться склопластики, що володіють комплексом властивостей, що вигідно відрізняють їх від традиційних матеріалів. За короткий час склопластики знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості. Все ширше застосовують ці матеріали і в будівництві. Завдяки високим технічним характеристикам склопластики вже використовують при виготовленні різноманітних будівельних виробів, конструкцій і деталей.

Номенклатура будівельних виробів зі склопластику, що випускаються в Україні в промисловому масштабі, поки ще недостатньо велика. Однак, вже намітилися тенденції постійного зростання застосування склопластиків в будівництві. Істотний інтерес для будівництва має перспектива використання склопластикової арматури при виготовленні бетонних конструкцій.

До основного будівельного матеріалу – залізобетону пред'являються все більш жорсткі вимоги по міцності, тріщиностійкості та довговічності. Часто відбуваються серйозні пошкодження залізобетонних виробів і конструкцій, що викликаються корозією сталеві арматури, особливо, коли руйнування сприяють атмосферні умови, морська вода, димові гази, електричні струми і т.п. Коли ж потрібно створити інженерну конструкцію з діелектричними, немагнітними і іншими спеціальними властивостями, застосування сталеві арматури протипоказано. Традиційні шляхи підвищення ефективності залізобетонних виробів і конструкцій не дозволяють в повній мірі вирішити ці завдання. Подальше вдосконалення залізобетонних конструкцій багато в чому пов'язане із застосуванням нових ефективних видів арматури, зокрема неметалевої склопластикові арматури.

У будівельній практиці часто відбуваються серйозні пошкодження залізобетонних виробів і конструкцій, що викликаються корозією сталеві арматури, особливо в тих випадках, коли захисний шар бетону занадто тонкий, або коли руйнування сприяє важкі атмосферні умови, морська вода, димові гази, електричні струми і т. ін.

Проведені в Україні та за кордоном теоретичні та експериментальні дослідження підтверджують можливість практичного використання склопластикові арматури. Перевагою склопластикові арматури в порівнянні з металеві є її висока корозійна стійкість, а також антимагнітні і діелектричні властивості. Склопластикові арматура легше сталеві більш, ніж в 3 рази, а її питома міцність в 3,5–4 рази вище.

Склопластиком називають композиційний матеріал, що складається зі скловолокнистого наповнювача та полімерного зв'язуючого (матриці). Скловолокно є зміцнюючим елементом, що забезпечує міцність та жорсткість склопластику. Полімерне зв'язуюче поєднує окремі волокна в монолітний матеріал, сприяє ефективному використанню міцності скляного волокна та рівномірному розподілу зусиль між волокнами, захищає їх від атмосферних, хімічних та інших впливів, сприймає частину зусиль при роботі матеріалу під навантаженням.

Вже зараз в окремих конструкціях та виробіах склопластики успішно конкурують із прокатом та литтям чорних та деяких кольорових металів, з азбестоцементом, пиломатеріалами. Проте склопластики не можна розглядати лише як замітники традиційних

матеріалів, оскільки вони забезпечують отримання якісно нових виробів. Тому склопластики випускатимуться поряд зі звичайними матеріалами і в багатьох випадках використовуються у комбінації з ними.

З розвитком виробництва склопластиків виникають нові можливості для створення ефективних виробів та деталей. Завдяки їх застосуванню знижується маса будівель та споруд, скорочується трудомісткість оздоблювальних робіт. Велика механічна міцність склопластиків та їхня стійкість до агресивних середовищ визначили їх застосування для виготовлення різних санітарно-технічних виробів та обладнання. Підвищена корозійна стійкість трубопроводів зі склопластику дає змогу широко використовувати їх у міському господарстві, у ґрунтах з агресивним середовищем.

Серед будівельних деталей, виробів та конструкцій зі склопластиків, які вже знайшли практичне застосування, можна назвати плоскі та хвилясті світлопроникні листи; тришарові теплоізоляційні світлопроникні та глухі панелі огорож та покриттів; склепіння, бані; арки, рами, консольно-балочні системи; віконні та дверні блоки, балконні плити, огороження балконів та сходів, підвіконня, плінтуса, карнизи; облицювання стін санітарно-технічних вузлів, камінів, сходів; санітарно-технічні вироби ванни, умивальники, мийки; опалубка для бетонних та залізобетонних виробів та ін.

3.2. Вихідні матеріали для склопластиків

3.2.1. Скляне волокно та скловолокнисті матеріали.

При виготовленні склопластиків основними матеріалами є: скляне волокно, полімерні зв'язуючі, ініціатори та прискорювачі, наповнювачі, барвники та інші добавки.

В даний час найбільш поширеними способами вироблення скляного волокна є: витягування розплавленої скломаси через фільтри та розчленування струменів скломаси потоком розпечених газів, перегрітої пари, стисненого повітря або за допомогою відцентрових.

Скляне волокно залежно від діаметра поділяють на ультратонке (0,1–1 мкм), супертонке (1,3–3 мкм), тонке (3–12 мкм), грубе (12–35 мкм), пружне (35–100 мкм) і товсте. Залежно від довжини воно буває безперервне та штапельне. Безперервне волокно одержують

0,05–0,5 м, іноді до 3 м. Арміруючі матеріали на основі безперервного волокна мають більш високі показники міцності і дозволяють виготовляти склопластики на різних зв'язуючих з великим діапазоном фізико-технічних властивостей.

Елементарні волокна з'єднують у пасмо (первинну нитку), однак у пасмі вони чинять один на одного сильну абразивну дію. Щоб знизити втрати міцності волокон від абразивного стирання, на їхню поверхню наносять замаслюючі препарати, що складаються зі склеювальних та змащувальних речовин. Крім того, замаслювання надає волокну рівної поверхні, захищає від статичної електрики при терті і скріплює волокна в пасмі. При виготовленні склопластиків змащувальник перед формуванням виробів видаляють. Роблять це, як правило, термічним (нагрівання при 200–300 °С) або хімічним (обробка водним розчином сечовини та іншими препаратами). Потім на поверхню волокна наносять склади, що апретують, підвищують адгезію між склом і зв'язуючим.

Найбільш типовий склад скла, рекомендований для виробництва безперервного скловолокна, %: 54 SiO₂, 14 Al₂O₃, 16 CaO, 14 MgO, 10B₂O₃, 0,4 Fe₂O₃ до 2 Na₂O.

З безперервного скляного волокна виготовляють великий асортимент армуючих матеріалів для склопластиків: нитки комплексні некручені та кручені; ровінги (джгути); сітки, тканини та стрічки; скломати та інші неткані рулонні матеріали.

Скляні волокна належать до розряду найміцніших волокон. Їхня міцність при розтягуванні перевищує міцність багатьох природних та синтетичних волокнистих матеріалів. Нижче наведено міцність при розтягуванні різних волокнистих матеріалів, МПа:

сталевий дріт	до 3150
азбестове волокно	1540
скловолокно	1400
льон (целюлоза)	1120
тягнута мідна дріт	560
нейлонова нитка	560
тягнутий алюмінієвий дріт	420
прядив'яний канат	1,05
тверда деревина (по волокну)	1,05

Ці значення міцності скляного волокна є граничними. У лабораторних умовах одержано високомодульне скловолокно з

$\sigma = 5600$ МПа. Модуль пружності скляного волокна дорівнює 2000–7000 МПа. Не можна не зважати на те, що практична міцність скляних волокон значною мірою залежить від їх діаметра, чим тонше волокно, тим вища його міцність.

До основних факторів, що впливають на міцність скляних волокон, як і на міцність масивного скла, можна віднести:

- 1) хімічний склад та структурний стан скла;
- 2) вплив температури;
- 3) механічні недосконалості поверхні волокна;
- 4) хімічні ефекти лежить на поверхні скляного волокна.

Скляне волокно не горить, не уражається грибками та бактеріями, має високі діелектричні властивості.

Поряд з високою температуростійкістю (500–700 °С – температура розм'якшення) вироби зі скляного волокна мають високу морозостійкість: неодноразові заморожування виробів не впливають на їх фізико-механічні властивості.

При витримуванні скляного волокна у вологій атмосфері міцність дещо знижується. Адсорбована на поверхні волокна волога зменшує його поверхневу енергію і призводить до розвитку існуючих та утворення нових мікротріщин, знижуючи міцність волокна. Глибина уражень тим більша, чим вища вологість середовища та триваліший її вплив.

Скло не є ідеально пружним матеріалом. Йому властиві такі реологічні явища, як повзучість при постійному навантаженні, тимчасова залежність міцності, релаксація напружень при постійній деформації та ін. При вирішенні різних питань механіки склопластиків зазвичай сприймають, що скляне волокно є ідеально пружним матеріалом, що підкоряється закону Гука. На рис. 3.1 показано деформування скловолокон за її рівномірному навантаженні. Як видно з малюнка, скловолокно поводить себе як пружний матеріал. Максимальне (граничне) деформування скловолокон при їх рівномірному навантаженні. Як видно із малюнка, скловолокно веде як пружний матеріал. Максимальні (граничні) деформації скловолокон сягають 5%.

При виборі скляного волокна для склопластиків, які призначаються для тривалої роботи в агресивних середовищах за підвищених температур, переваги віддають волокнам безлужного складу.

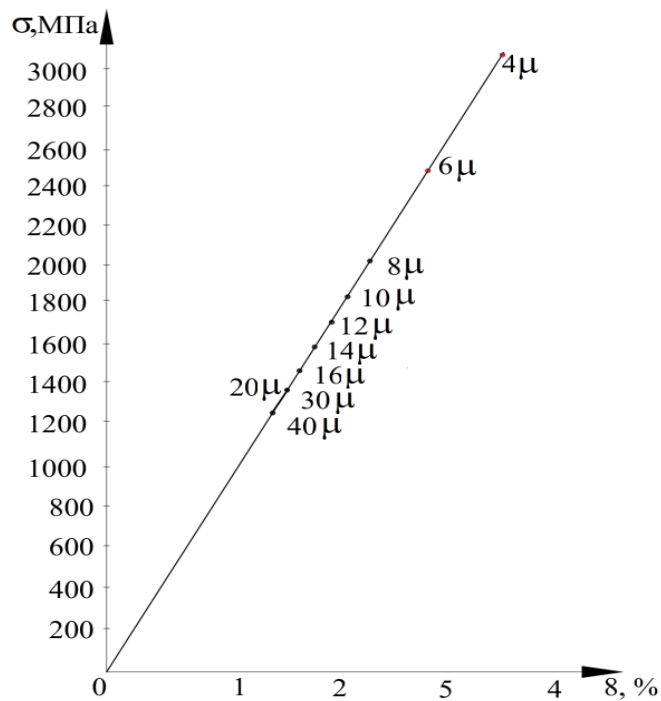


Рис. 3.1. Графік деформування скляних волокон $\sigma - \epsilon$

Скловолоконні матеріали ділять на неткані – нитки, рівенги, мати та тканини – склотканини, склоленті. Деякі матеріали більш перспективні при виготовленні склопластиків, тому що не вимагає трудомістка текстильна переробка скловолокон, яка також знижує їх механічні властивості.

3.2.2. Зв'язуючі, наповнювачі та барвники для склопластиків.

Зв'язуючі для склопластиків одержують на основі різних смол. Серед необхідних властивостей мають поліефірні, епоксидні, фуранові та інші смоли. Число видів смол, що застосовуються в усаєствє зв'язуючих для склопластику, з кожним роком збільшується. В даний час близько 65% склопластиків виводять на основі поліефірних смол. Вибір зв'язуючого залежить від багатьох технік економічних факторів – на значення та умови експлуатації матеріалу, виду склонаповнювача, методу виготовлення та переробки матеріалів і т.д. Зв'язуюча повинна н дбати про достатню жорсткість виробів, бути з амозатухоаючим, мати слособність до фарбування в різні кольори, стійкість до старіння, мати високу змочуючу здатність і адгезію до скляного волокна, когезійну міцність, незначну усадку після затвердіння, тривалу життєздатність наповнювача та відсутність виділення

побічних або летких продуктів, водо- та атмосферостійкість, термо- та корозійну стійкість.

Для забезпечення певного режиму затвердіння смоли, а також отримання заданих фізико-механічних властивостей склопластиків смолу вводять розчинники, пластифікатори, затверджувачі, прискорювачі, стабілізатори, різні неорганічні та органічні добавки (порошкові наповнювачі, барвники та ін.)

Зв'язуюче на основі поліефірних смол. Поліефірні смоли є продуктом взаємодії багатоатомних спиртів (гліколів, гліцерину, пента еритриту, та ін.) з двоосновним і кислотами – малінової, фталієвої, тирефталевої, адицинової, себацинової та ін. У виробництві будівельних склопластиків застосовують переважно ненасичені поліефірні смоли холодного та палаючого затвердіння. Широке використання їх обумовлено здатністю до затвердження без виділення летючих продуктів, а також легкістю протікання цього процесу при низьких тисках і звичайних температурах талевої, адипінової, себацинової та ін.

Промисловість випускає велику кількість марок поліефірних смол, мають різні позитивні якості, і знаходять при застосуванні. Затвердіння поліефірної смоли може здійснюватися підйомом тепла. ультрафіолетових променів та перекисних сполук. Процес затвердіння залежить від марки поліефірної смоли та кількості затверджувача. Температура затвердіння може бути різною: 15–30 °С (холодний), 30–90 °С (при середніх температурах), більше 90 °С (при високих температурах).

Негативні якості поліефірних смол – горючість, недостатня теплостійкість, іноді погана атмосферостійкість. Для покращення властивостей поліефірного зв'язуючого його модифікують різними речовинами, що дозволяє одержувати склопластики з високою механічною міцністю, підвищеною термо- та водостійкістю.

Зв'язуючі на основі фенольних смол. Ці зв'язуючі раніше, ніж інші, почали застосовувати для виготовлення склопластиків, що пояснюється їх доступністю і наявністю багатьох позитивних властивостей.

Більш широке застосування у виробництві склопластиків виявили фенолоформальдегідні з смоли резольного типу. Їх отримують шляхом конденсації фенолу з надлишком формальдегіду у при-

сутності каталізаторів (аміаку, їдкою натру). Затвердіння феноло-формальдегідної смоли відбувається у три стадії. У першій – смола знаходиться у розчинному рухомому стані (резол). При просушуванні при температурі 80 °С вона переходить у другу стадію резитол, де може – охороняти "життєздатність" досить тривалий час. Остаточне затвердіння смоли відбувається при температурі обробки – 170–180° та високому тиску: це третя стадія – різіт.

Склопластики на основі феноло-формальдегідних смол мають стійкість до високих температур, хороші тепло- і звукоізоляційні властивості, стійкість до впливу атмосферних умов. Щільна сітчаста структура фенолоформальдегідних ялин мол резольного типу обумовлює їх твердість, жорсткість і підвищену крихкість. Ці смола мають порівняно високий модуль пружності (50–60 МПа).

Для модифікації фенолоформальдегідних смол використовують також епоксидні, кремнійорганічні та інші смоли.

Зв'язуючи на основі епоксидних смол. Епоксидні смоли мають низку цінних властивостей: підвищені механічні та діелектричні характеристики, високу адгезію до скляного волокна та порівняно велику стійкість до дії підвищених температур, відсутність виділення летких продуктів реакції в процесі термозатвердіння та малу усадку при затвердінні.

Однак ці смоли в 4–5 разів дорожчі за поліефірні. Процес їх затвердіння більш тривалий. Серед інших недоліків епоксидних смол можна назвати такі, як складність регулювання тривалості затвердіння, токсичність та крихкість. Епоксидні смоли відносяться до полімеризаційних термореактивних смол.

Для затвердіння епоксидних полімерів при кімнатній температурі зазвичай застосовують етилендіамін, гексаетилендіамін, піридин, піперидин та ін. лоформальдегідні смоли. Собівартість епоксидних смол дещо знижується при поєднанні їх з дешевими смолами, наприклад, з поліефірною, фурановою та фенольною.

Якщо до складу зв'язуючого ввести різні порошкоподібні наповнювачі, можна значно змінити властивості склопластиків. Цілеспрямовано змінюючи склад і вміст наповнювачів, можна підвищувати в'язкість зв'язуючого, знижувати його усадку, збільшувати водостійкість склопластику, покращувати його механічні властивості,

надавати йому відповідного зовнішнього вигляду. При цьому в ряді випадків вдається знизити вартість склопластику.

Зв'язуючі на основі фуранових смол. Ці зв'язуючі представляють інтерес для виробництва склопластиків внаслідок того, що фуранові полімери мають підвищену термостійкість (більше 300 °С), водостійкість, стійкість до дії більшості агресивних середовищ, зокрема кислот і лугів різної концентрації. По теплостійкості, особливо тривалої, вони значно перевершують поліефірні та фенольні смоли.

Фуранові смоли отримують конденсацією фурилового спирту або сококонденсацією його фурфуролом, фенолом, кетонами та іншими сполуками. Недоліками цих смол є крихкість у знедоленому стані, низькі адгезійні властивості по відношенню до скляного волокна. Для покращення адгезійних властивостей та надання затверденим смолам еластичності їх попередньо модифікують.

3.2.3. Стрічкова склопластикова арматура (ССПА).

ССПА – це високоефективний композиційний матеріал, який у поєднанні з бетоном та іншими будівельними матеріалами підходить для створення нових комплексних виробів. Можливість контролювати процес армування та керувати орієнтацією стрічкової арматури дозволяє створювати штучну анізотропію властивостей, що відповідає необхідним силовим та експлуатаційним навантаженням. ССПА виконує як зміцнювальні, так і захисні функції. Вона сприяє підвищенню міцності, довговічності, корозійної стійкості, а також покращенню екологічної безпеки, зниженню матеріаломісткості та металомісткості, зниженню маси конструкції, одночасно забезпечуючи високі показники діелектричних та магнітних властивостей.

Скляне волокно має ряд переваг: його густина у 3,5 рази менша за густину сталі, воно має низький коефіцієнт теплопровідності, високу вібростійкість і відмінні електрофізичні властивості. Скляне волокно також відрізняється високою механічною міцністю.

Однак, є ряд недоліків: модуль пружності скляного волокна вдвічі вищий, ніж у бетону та окремі волокна, через природні властивості скла, чутливі до механічних впливів, особливо до ударів.

Особливе значення має питання хімічної взаємодії скляного волокна з вологим середовищем свіжоукладеного бетону. При повній гідратації цемент освоює близько 20% води, а решта води залишається у вигляді адсорбованих плівок на твердих частинках. Арматура зі

скляного волокна в бетоні тривалий час піддається дії вологи. Міцність скляного волокна на розрив у вологому середовищі дещо нижча, ніж у сухому, особливо при тривалому впливі навантаження (статична втома).

Звичайний цементний бетон характеризується високою лужністю водяних плівок. У залізобетонних конструкціях ці лужні плівки мають пасивну дію на сталеву арматуру, формуючи на її поверхні тонкий оксидний шар, який захищає метал від корозії. Однак лужне середовище надає інше вплив на скляне волокно, викликаючи рівномірне розчинення всіх його компонентів. Автоклавна обробка готових конструкцій під впливом пару високого тиску прискорює процес корозії скляного волокна, що в кінцевому підсумку може призвести до повної втрати міцності скляної арматури.

Один із шляхів запобігання цьому процесу – виключення контакту склопластикової арматури з агресивним середовищем бетону на стадії його твердіння. Серед розроблених методів є технологія безперервного намотування арматури на готову бетонну конструкцію (сердечник). Інший спосіб полягає у використанні склопластикової арматури в полімербетонних виробках, де середовище свіжоукладеного бетону не чинить агресивного впливу на склопластик.

Технологія виготовлення комбінованих будівельних конструкцій забезпечує створення склопластикового каркасу з необхідними міцнісними та деформативними характеристиками.

Стрічкова склопластикова арматура (ССПА), яка є різновидом склопластикової арматури, використовується як армуючий матеріал. Управління процесом безперервного армування та завдання орієнтації стрічки дозволяє створювати штучну анізотропію властивостей, адаптовану до різних зовнішніх впливів як силовим, так і несиловим.

Стрічкова склопластикова арматура має ряд переваг перед іншими видами склопластикової арматури. Її використання методом намотування дозволяє легко формувати суцільні покриття, оболонки та інші елементи. Такі покриття можуть мати як постійну товщину, так і змінну довжину конструкції. Стрічкова форма особливо підходить для багат шарового намотування, забезпечуючи однорідну структуру склопластикової оболонки.

Застосування ССПА виправдано також за рахунок її високих специфічних властивостей, як-то висока міцність при розтягу і

стійкість до корозії, що робить її кращим вибором широкого спектра будівельних завдань.

3.3. Властивості склопластиків

3.3.1. Міцнісні характеристики.

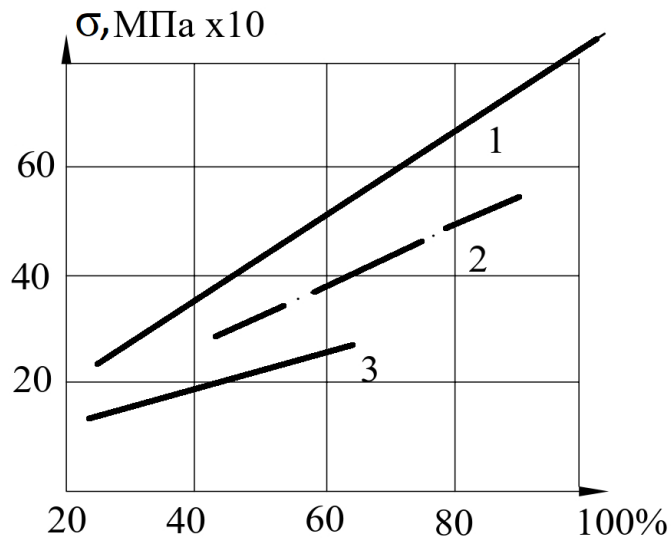
Властивості склопластиків залежать від багатьох факторів, до яких насамперед належать хімічний склад скловолокна; вид і структура скловолокнистого наповнювача; спосіб підготовки поверхні скловолокна перед просоченням його зв'язуючим; тип зв'язуючого, його властивості та міцність зв'язку з волокном; об'ємний вміст волокон та зв'язуючого; взаємне розташування (орієнтація) волокон у композиції; технологія склопластику; напрямок дії навантаження та інші фактори.

Склопластики на вигляд склонаповнювача діляться на хаотично армовані і впорядковано армовані (орієнтовані). Міцність та деформативні властивості цих матеріалів різко відрізняються. Вироби з орієнтованим розташуванням волокон мають найвищі показники механічних властивостей вздовж волокон (рис. 3.2). Абсолютні значення руйнівної напруги односпрямованих склопластиків на основі алюмоборосилікатного волокна досягають 1600...1800МПа. У перехресних склопластиках волокна розташовані під кутом одна до одної.

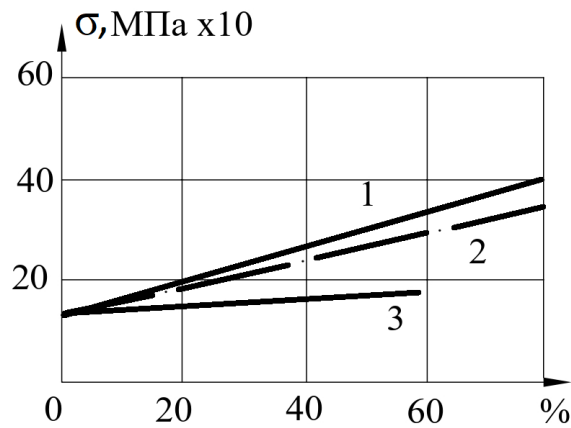
Змінюючи співвідношення поздовжніх і поперечних волокон у матеріалі, можна цілеспрямовано змінювати характеристики міцності. Осі волокон у різних шарах можуть бути повернені на 90°, 60°, 45°. Часто використовують інші кути укладання волокон, що дає можливість отримувати матеріал з широким діапазоном механічних властивостей. Показники механічних властивостей склопластикових матеріалів, що застосовуються у будівельних конструкціях, наведено у табл. 3.1.

На міцність склопластиків сильно впливає кількість скловолокна у матеріалі. Найбільшу міцність при розтягуванні мають склопластики з максимальним вмістом орієнтованого склонаповнювача.

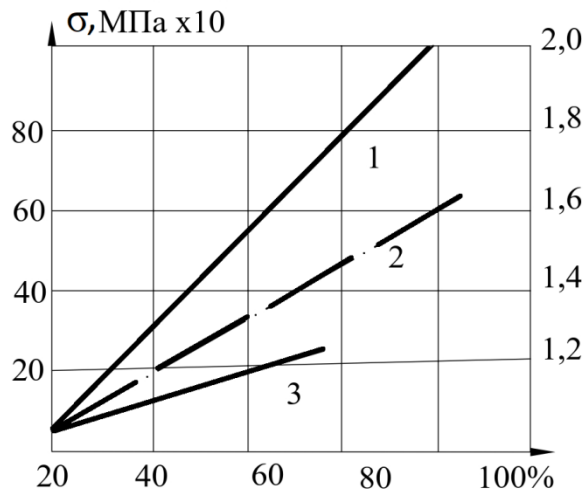
Однак це справедливо лише до певної межі. Існує певне оптимальне співвідношення між вмістом армуючих волокон у матеріалі та його міцністю (рис. 3.3).



а



б



в

Рис. 3.2. Залежність меж міцності склопластиків від виду та змісту склонаповнювача: а – розтягування; б – стиск; в – вигин; 1 – наповнювач орієнтованих склопластиків; 2 – зі склотканини; 3 – зі скломатів

Таблиця 3.1

Показники механічних властивостей склопластикових матеріалів,
що застосовуються у будівельних конструкціях

Матеріал	Межа міцності, МПа			Модуль пружності, МПа	Питома ударна в'язкість, кДж/ м ²
	при розтягу	при стиску	при вигині		
Склопластик: - поліефірний листовий, плоский, хвилястий	60	90*	130	6000	
- конструкційний КАСТ-В (товщина до 7 мм)	230	95*	120	24000	
- листовий СВМ	450	400*	700*	28500*	500
Склопластиковий пресувальний матеріал АГ-4 марки: - В	80	100	120	18000	30
- С	500*	200*	250*	18000*	150
3 орієнтованих пресмасеріалів 27–63 °С	830*	410*	790*	48000*	-

Примітка. * Міцність у напрямі найбільшого армування.

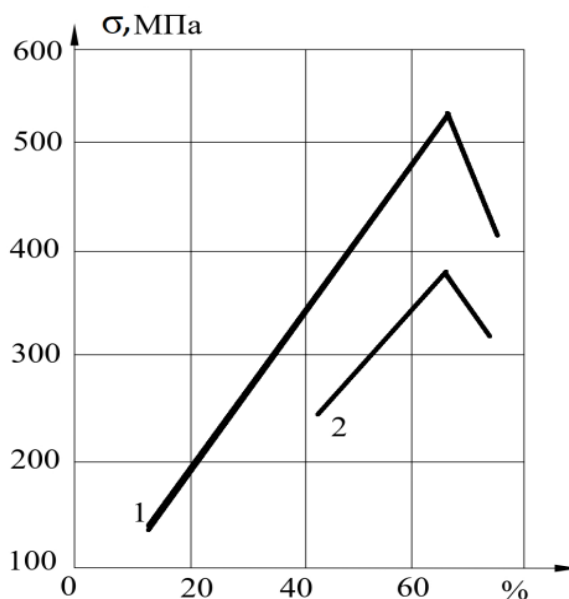


Рис. 3.3. Залежність міцності склопластику від вмісту скловолокна:
1, 2 діаметр волокна 14,5 та 6,5 мкм відповідно

Руйнівна напруга при стисканні однонаправлених склопластиків уздовж волокон також залежить від ступеня наповнення матеріалу та діаметра волокон. Зі збільшенням діаметра волокон до 0,12 мм міцність на стиск односпрямованого склопластику продовжує зростати. Склопластики, армовані волокнами великого діаметра, доцільно застосовувати для виготовлення плит, панелей, труб тощо. Міцність склопластиків, армованих відрізками волокон залежить від довжини відрізка. При довжині його менше ніж 15 мм міцність склопластиків помітно знижується, а при довжині волокон понад 50 мм практично не зростає (рис. 3.4).

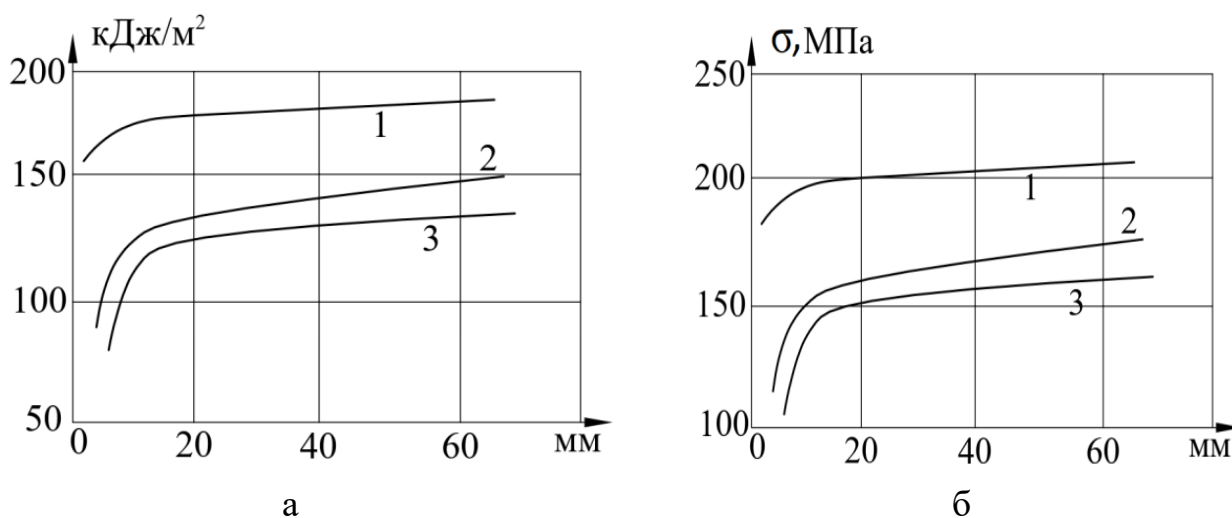


Рис. 3.4. Залежність міцності склопластику від довжини рубаних волокон склопластикового наповнювача: 1 – переділ міцності при розтягуванні; 2 – теж при статичному вигині; 3 – питома ударна в’язкість.

На міцність орієнтованих склопластиків великий вплив має міцність адгезійного зв’язку між волокнами та полімерними зв’язуючими.

Міцність склопластиків залежить від міцності зв’язуючого. Так, зі збільшенням межі міцності смоли при зсуві та розтягуванні міцність склопластику зростає. Встановлено математичну залежність між показниками міцності склопластику, скловолокнистого наповнювача та зв’язуючого. Міцність склопластику при паралельному розташуванні скляних волокон

$$\sigma_{c.n} = \frac{\sigma_c + pQ(\sigma_v - \sigma_c)}{p_cQ - p_v(100 - Q)}, \quad (3.1)$$

склопластику з наповнювачем зі склотканини

$$\sigma_{c.n} = \sigma_c + \frac{p_c \left(\frac{+\sigma_c}{2} \right) Q}{p_c Q + p_g (100 - Q)}, \quad (3.2)$$

де $\sigma_{c.n}$ – межа міцності при розтягу склопластику;

σ_c – межа міцності при розтягу смоли;

σ_g – межа міцності при розтягу скляного волокна;

p_c – густина смоли;

p_g – густина скляного волокна;

Q – вміст скляних волокон у пластиці, кг.

Склопластики мають невелику в порівнянні зі сталлю твердість. Значення модуля пружності їх значно менше, ніж в сталі. Однак питома жорсткість склопластиків (модуль пружності, віднесений до густини) не поступається за значенням питомої жорсткості високоміцної сталі та дюралюмінію.

Деформативність орієнтованих склопластиків визначається спільною роботою скляних волокон та полімерного зв'язуючого. Експериментально встановлено, що при навантаженні орієнтованих склопластиків з високим вмістом скловолокна вздовж напрямку армування їх з достатньою для практики точністю вважатимуться лінійно пружними тілами. Діаграми розтягування ($\sigma - \epsilon$) ряду орієнтованих склопластиків за кімнатної температури показані на рис. 3.5–3.7.

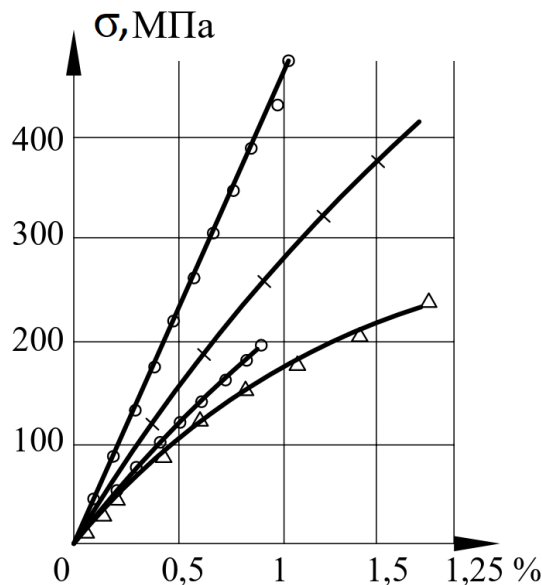


Рис. 3.5. Залежність між напруженням і деформаціями для орієнтованих склопластиків при кімнатній температурі: 1 – односпрямований; 2 – укладання волокон; 3 – склотекстоліт епоксифенольним зв'язуючим

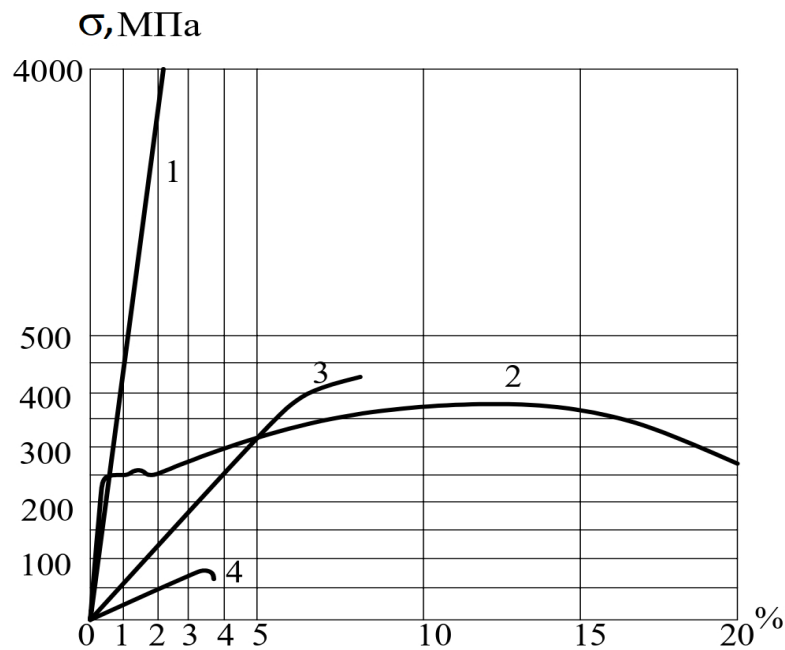


Рис. 3.6. Діаграма для орієнтованого склопластику у порівнянні з іншими матеріалами орієнтовані склопластик сталь вуглецева Дюралюміній епоксидна смола

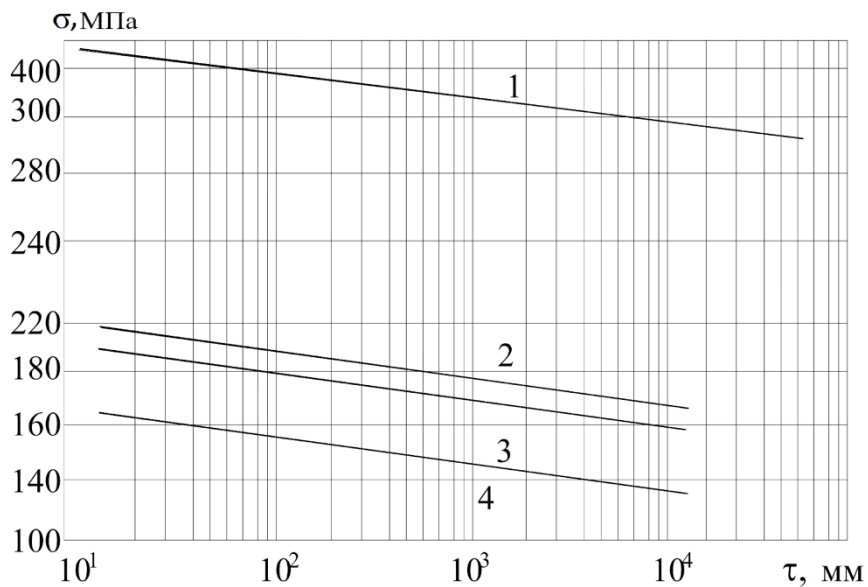


Рис3.7. Криві тривалої міцності при розтягуванні склопластику однонаправлений матеріал ортогонально армований матеріал з площею поперечного перерізу бетонних елементів відповідно 25, 100, 120 мм²

Вид діаграм залежить від способу укладання арматури. У односпрямованих склопластиків АГ-4С, 27-63С, ЛСБ-Ф та ін. діаграми деформування практично прямолінійні, хоча і мають ледь помітний перелом. У склопластиків, в яких волокна укладені у двох взаємно

перпендикулярних напрямках, діаграми також складаються з двох прямолінійних ділянок, але перелом виражений сильніше. Кожній ділянці діаграми відповідає значення модуля пружності. Діаграма деформування склотекстоліту – ламана лінія, що має кілька точок перегину.

Точки перегину на діаграмах пояснюються двома основними причинами: по-перше, появою непружних деформацій зв'язуючого певному етапі навантаження; по-друге, руйнуванням адгезійного зв'язку арматура-матриця або руйнуванням окремих компонентів склопластиків.

Склотекстолітам властива ще одна особливість. При розтягуванні їх вигнуті нитки намагаються випростатися, передаючи напруги що розтягують, зв'язуючим. Коли ця напруга досягне критичного значення, у матеріалі утворюються мікротріщини, що також має супроводжуватися зміною кута нахилу діаграми розтягування ($\sigma - \epsilon$). Таким чином, зміна кута нахилу діаграми вказує на мікророзтріскування орієнтованих склопластиків.

Цю обставину необхідно враховувати при проектуванні несучих конструкцій із склопластикових матеріалів.

При роботі орієнтованих склопластиків на стиск перегину на діаграмах ($\sigma - \epsilon$) спостерігаються рідше і виражені слабше, ніж при розтягуванні. Зміна нахилу кривих у разі викликано переважно вигином самих волокон, ніж розтріскуванням зв'язуючого.

У роботі [77] показано, що коефіцієнт Пуассона для перехресних склопластиків також не є постійною величиною у всьому діапазоні навантаження.

При проектуванні конструкцій із склопластику слід враховувати залежність пружних властивостей цього матеріалу від напрямку укладання скловолокна.

Незважаючи на те, що абсолютні значення в межах втоми склопластиків нижче, ніж у сталі та інших матеріалів, їх успішно застосовують у конструкціях, схильних до вібрації, так як демпфуюча здатність склопластиків дуже висока.

Склопластики мають здатність добре чинити опір ударним впливам, а наявність високоеластичних деформацій у полімерному зв'язуючому оберігає їх від крихкого руйнування, властивого об'ємним зразкам скла, чавуну та деяких інших матеріалів

3.3.2. Густина, водопоглинання. Хімічна стійкість склопластиків.

Густина склопластику визначається методом гідростатичного зважування. Густина склопластику розраховується за формулою:

$$\rho = \frac{g}{g - (b_1 - b_2)} \cdot \rho_0 \quad (3.3)$$

де g – маса елемента на повітрі, г;

b_1 – маса елемента та дріт в спирті, г;

b_2 – маса дроту в спирті, г;

ρ_0 – густина спирту при 20 °С, г/см³.

Водостійкість склопластику залежить від наявності пор та мікротріщин, а також від водостійкості зв'язуючого матеріалу та скловолокна, використаного в композиції. Водостійкість зв'язуючого визначається присутністю полярних груп у затверділому полімері. Майже всі епоксидні зв'язуючі містять полярні групи, такі як гідроксильні та амінні. Збільшення кількості таких груп у складі зв'язуючого призводить до погіршення водостійкості склопластиків.

Додавання інертних пластифікаторів, таких як дибутилфталат, також знижує водостійкість зв'язуючого, оскільки послаблює міжмолекулярні взаємодії.

Зниження міцності скловолокна під впливом вологи пов'язане з адсорбцією води на поверхні скла та хімічним руйнуванням волокон, зокрема через вимивання водорозчинних компонентів скла. Водостійкість скловолокна зростає при зменшенні вмісту лужних компонентів у складі скла.

На рис. 3.8 показано залежність водопоглинання склопластику від часу його знаходження у воді. Як видно, найбільший відсоток вологи (0,08%) склопластик набирає у першу добу, після чого процес уповільнюється та стабілізується до 50 діб.

Епоксидний склопластик має високу хімічну стійкість до агресивних середовищ. Однак його стійкість значною мірою залежить від технології виробництва та складу вихідних компонентів.

Склопластикові каркаси, що входять до складу елементів дахів, можуть піддаватися впливу парів агресивних середовищ, таких як кислоти та луги, як у промислових умовах, так і сільському господарстві. Концентрація агресивних рідин у повітрі покриття зазвичай невисока.

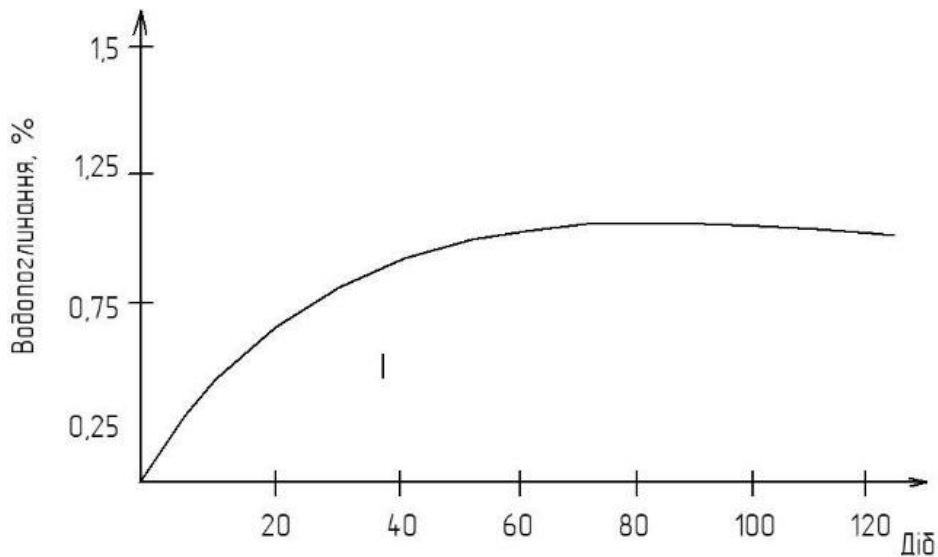


Рис. 3.8. Залежність вимірювання водопоглинання склопластику від тривалості перебування у дистильованій воді

Для оцінки хімічної стійкості епоксидного склопластику, виготовленого «мокрим» способом методом намотування косої перехресної структури з використанням затверджувача «гарячого» типу – третинного аміну, в якості хімічних реагентів було обрано 10% розчин NaOH і 5% розчин H₂SO₄. В якості зв'язуючого застосовується епоксидна діанова смола ЕД-20, затверділа триетаноламін з додаванням пластифікатора дибутилфталата.

Зміна маси (ΔM) в % обчислюється за формулою:

$$\Delta M = \frac{M_1 - M}{M} \cdot 100 \quad (3.4)$$

де M – маса елемента до занурення в хімічний реагент, г;

M_1 – маса елемента після витримки його в хімічному реагенті, г.

На рис 3.9 показана кінетика сорбції склопластику.

За графіком визначається час, за який відбулося збільшення маси до величини $M_{\max}/2$ і обчислюється коефіцієнт дифузії хімічних реагентів (D):

$$D = 0,0494 \left(\frac{r_0}{\delta^2} \right)^{-1} \quad (3.5)$$

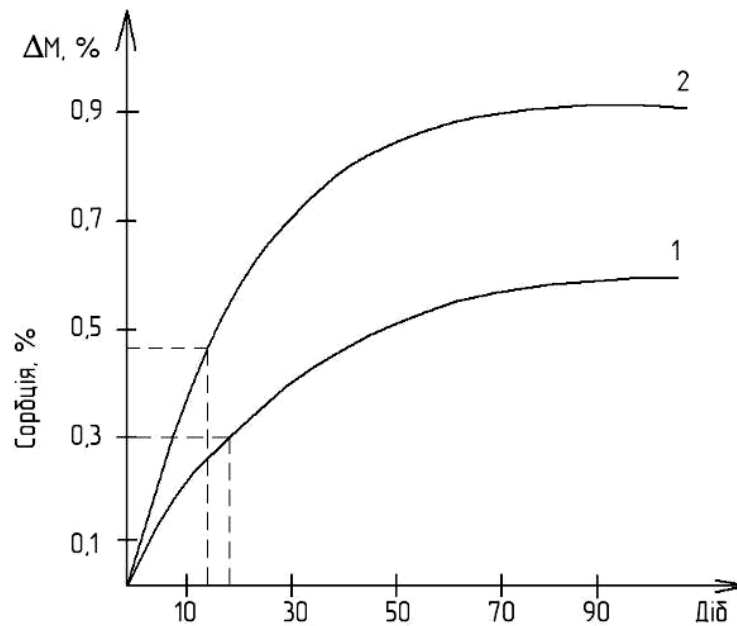


Рис. 3.9. Кінетика сорбції склопластику:
1 – у 10% розчині NaOH; 2 – в 5% розчині H₂OS₄

Коефіцієнт сорбції хімічних реагентів (ρ) визначається по залежності:

$$\rho = \frac{M_p}{V_{\max}}; \quad (3.6)$$

$$M_p = M_{\max} - M_1. \quad (3.7)$$

Коефіцієнт проникності хімічного реагенту в склопластику (p) визначається за залежністю

$$p = D \cdot S. \quad (3.8)$$

В табл. 3.2 наведені значення коефіцієнта дифузії, сорбції, проникності склопластиків .

Склопластиковий композит як композитний матеріал характеризується низьким рівнем водопоглинання, що знижує ризик накопичення вологи в його структурі та мінімізує розвиток деградаційних процесів. Невисокі коефіцієнти сорбції й дифузії підтверджують обмежене проникнення вологи всередину матеріалу, завдяки чому зберігається стабільність його фізико-механічних характеристик упродовж тривалого часу експлуатації.

Значення коефіцієнта дифузії, сорбції,
проникності склопластику

Розчин	Коефіцієнт дифузії, м ² /с	Коефіцієнт сорбції, %	Коефіцієнт проникності м ² /с
NaOH	$2,6 \times 10^{-9}$	0,0213	$0,554 \times 10^{-12}$
H ₂ SO ₄	$3,7 \times 10^{-9}$	0,0276	$10,2 \times 10^{-11}$

Сукупність цих властивостей робить доцільним застосування склопластику для підсилення залізобетонних конструкцій, оскільки він здатен забезпечувати підвищену довговічність та надійність елементів в умовах дії агресивних середовищ і циклічного зволоження-висушування.

При добрій адгезії зв'язуючого і достатньої змочуваності скловолокна виходить щільний і однорідний матеріал, стійкий в агресивних середовищах. Однак останні, як правило, погіршують фізико-механічні властивості склопластиків, Хімічна стійкість склопластиків визначається наступними факторами хімічної стійкістю зв'язуючого, відсутністю пористості, хімічною стійкістю армуючого матеріалу. Перший чинник є вирішальним. Хімічно стійким у даному середовищі при даній температурі вважають таке зв'язуюче, міцність якого при згинанні знижується не більше ніж на 20 % після місячної витримки у цьому середовищі.

Хімічна стійкість склопластикових виробів багато в чому залежить від наявності тріщин та опір. Відносне подовження зв'язуючого має бути більшим, ніж скляного волокна. Недотримання цієї умови може призвести до того, що під дією силових факторів у процесі виготовлення, монтажу та експлуатації зв'язуючий потріскується і виріб швидко вийде з ладу внаслідок корозії склопластику. Про хімічну стійкість армованих склопластиків можна судити за табл. 3.3, де показано зміну маси з хаотично армованого матеріалу АГ-4В та орієнтованого матеріалу АГ-4С залежно від виду реагенту та часу витримки.

Для дослідження хімічної стійкості конструкційних склопластиків КАСТ, СВАН та інших зразки матеріалу протягом 40 діб витримують під впливом парів азотної, соляної та оцтової кислот. При цьому міцність склопластиків на основі безлужного волокна та

фенольних зв'язуючих знижується на 17...18 %, а на основі поліефірних зв'язуючих ще більше.

Таблиця 3.3

Хімічна стійкість матеріалів АГ-4В та АГ-4С

Реагент	Час витримки, год	Зміна маси, %	
		АГ-4В	АГ-4С
Дистильована вода	24	0,07	0,07
10% розчин сірчаної кислоти	24	0,01	0,10
10% розчин їдкого натру	24	0,50	0,50
Трансформаторне масло	24	0,06	0,06
Бензин	24	0,01	0,05
	4	0,01	0,01
Ацетон	4	0,02	0,50
Етиловий спирт	4	0,1	0,05
Бензол	4	0,1	0,20

3.3.3. Теплофізичні властивості склопластиків.

Вироби із склопластиків прогріваються повільно. Навіть при температурі поверхні в декілька 1000 °С внутрішні шари склопластикового виробу не прогріваються і довго не втрачають міцності.

Стійкість склопластиків до впливу підвищених температур насамперед залежить від теплостійкості полімерних зв'язуючих. При нагріванні склопластику зв'язуючі можуть або структуруватись, або піддаватися деструкції. При структуруванні збільшується молекулярна маса полімеру та підвищується його жорсткість, внаслідок чого механічна міцність склопластику спочатку може зростати. При деструкції полімеру знижується його молекулярна маса та зменшується механічна міцність склопластику.

Склопластики, виготовлені на фенольних та епоксидних смолах, мають теплостійкість до 200 °С, на поліефірних – до 180 °С, на епоксифенольних – до 210 °С, на силіконових до 300 °С. Вплив більш високих температур призводить до погіршення фізико-механічних властивостей склопластиків, що викликається незворотними змінами, що відбуваються у структурі полімерних зв'язуючих внаслідок термічної та термоокислювальної деструкції.

Однак є дані про використання склопластиків у конструкціях, що працюють за температур 500–1000 і навіть 3000 °С. На рис. 3.10

показано характерні зміни міцності склопластиків із підвищенням температури.

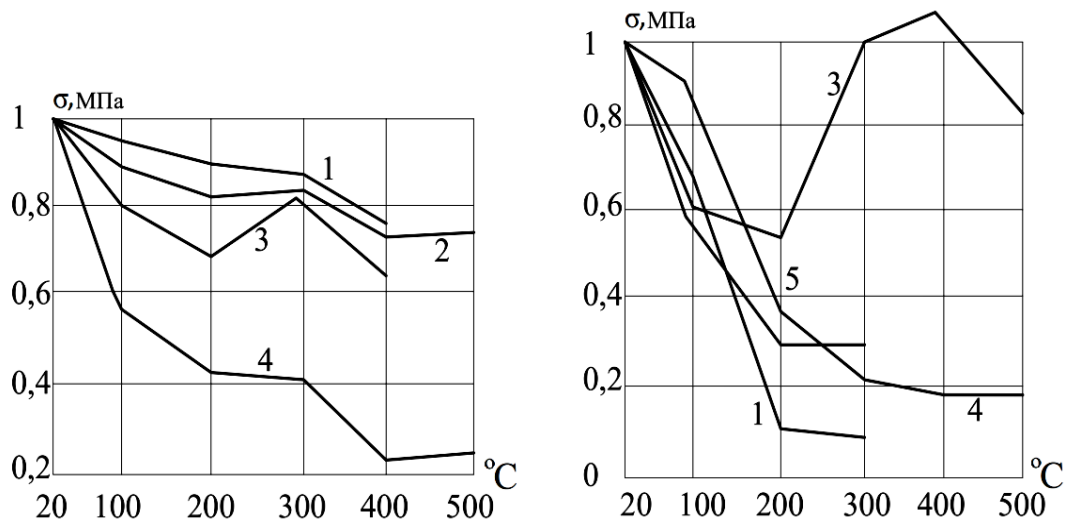


Рис. 3.10. Зміна міцності склопластиків із підвищенням температури:
1 – 27–63 °С; 2 – 33–18 °С; 3 – РТП-170; 4 – П-5-2; 5 – АГ-4В

Міцнісні характеристики склопластиків при знижених температурах упродовж тривалого спостереження зазнають лише незначних змін.

3.3.4. Горючість склопластиків.

Неврахування ступеня займистості може призвести до тяжких наслідків. Займистість склопластиків залежить насамперед від фізичних та хімічних властивостей полімерного зв'язуючого. Важливе значення має також співвідношення полімеру та скловолокнистого наповнювача, наявність негорючих порошкоподібних наповнювачів, а також співвідношення площі поверхні матеріалу, що підпалюється, до його обсягу та потужність теплового джерела.

Так як велика кількість склопластикових виробів виготовляють на основі поліефірних смол, найбільш інтенсивні роботи з отримання займистих склопластиків проводять з цими матеріалами. Поліефірні смоли при безперервному впливі полум'я можуть вигоряти повністю. Природно, що при горінні склопластику вигоряє лише смола, а скловолокнистий наповнювач розшаровується.

Використання поліефірних склопластиків у будівництві та міському господарстві потребує зниження горючості цього матеріалу. Існує кілька методів вирішення цього завдання. Так, у смолу можна

вводити неорганічні наповнювачі, окис кремнію, буру, крейду, галун, триокис сурми. Однак матеріал при цьому стає більш крихким, непрозорим, зі зниженою атмосферостійкістю.

Роботи ведуться ще за двома напрямками: включення до складу поліефірних полімерів галоїдовмісних кислот і хлорангідридів за допомогою хімічної модифікації; введення в поліефірні смоли антипіренів.

Необхідно зауважити, що введенням до складу зв'язуючого різних добавок поки що не вдалося отримати вогнетривкі склопластики, проте цих заходів буває достатньо, щоб запобігти розповсюдженню вогню, уповільнити горіння та встигнути вжити заходів до його припинення.

3.3.5. Світлопропускання склопластиків.

Великою перевагою склопластиків є можливість створення на їх основі світлопропускних будівельних та інших конструкцій, наприклад, покриттів і стін будівель та споруд. Склепіння, куполи, зенітні ліхтарі, світлопроникні панелі та інші конструкції з поліефірних склопластиків успішно застосовують при будівництві виставкових павільйонів, спортивних споруд, складів, оранжерей та багатьох інших об'єктів.

На світлопропускання склопластиків впливають наступні технологічні фактори: характер підготовки склонаповнювача, процес просочування його зв'язуючим, швидкість затвердіння зв'язуючого, режим термообробки склопластику. Теоретично можна отримати склопластики, які мають таке ж світлопропускання, як силікатне скло. В дійсності ж склопластики мають великий світлорозсіювання. Основними причинами цього є розбіжність показників заломлення скла і отверждаемого зв'язуючого, різні дефекти, нерівномірний розподіл скловолокна в матеріалі та ін. впливають товщина виробу, температура затвердіння, вологість скловолокнистого матеріалу та ін.

Для видалення з поверхні скловолокна вологи матеріал перед використанням потрібно сушити, оскільки наявність на поверхні волокна вологи збільшує розсіювання світла та зменшує їх прозорість. Використання вологого склонаповнювача особливо небажане при гарячому режимі затвердіння зв'язуючого. Випаровування вологи з поверхні скла призводить до утворення в матеріалі дрібних пір і тріщин, які стають причиною світлорозсіювання. Для зменшення цих

мікродфектів процес термообробки доцільно проводити повільно, а температура має бути невисокою.

Світлопропускання деяких склопластиків може погіршуватися під впливом ультрафіолетових променів та атмосферних умов. Так, поліефірні склопластики під впливом ультрафіолетових променів жовтіють і втрачають прозорість.

Зменшити ці явища можна раціональним підбором зв'язуючих, ініціаторів, стабілізаторів та барвників. Як приклад можна навести поліефірметилметакрилатні смоли, а також зв'язуючі, що є полімерами ефірів акрилової кислоти. Ці смоли менш чутливі до окислення та повільніше змінюють колір.

Для отримання склопластиків з високим світлопропусканням необхідно дотримуватись таких умов: скловолокно та ствердне зв'язуюче повинні мати однакові показники заломлення при температурі експлуатації виробу; скловолокно має бути безбарвним, а зв'язуюче прозорим і безбарвним; змочування волокна смолою має бути по можливості повним, адгезія смоли до волокна має бути високою; скловолокнистий матеріал повинен бути рівномірно розподілений у масі зв'язуючого; зв'язуюче при затвердінні не повинно давати великої усадки; температура затвердіння має бути відносно невисокою, а режим затвердіння плавним.

3.4. Бетонні колони в склопластиковій обоймі

Вплив склопластикової обойми на несучу здатність і деформативні характеристики бетонних елементів при осьовому навантаженні поєднується з оцінкою ефективності використання стрічкової склопластикової арматури (ССПА) для підсилення конструкцій.

Конструкція колони, що складається з бетонного ядра (сердечника) та попередньо напруженої склопластикової обойми відрізняється порівняно невеликою вагою, невисокою металоємністю та корозійною стійкістю.

Колона є бетонним циліндром, на поверхню якого за описаною вище технологією обвита стрічкова склопластикована арматура. Намотування ССПА проводиться спіралью-хресним способом під певним кутом.

Розрахунок бетонних колон в склопластиковій обоймі

Перший доданок умови міцності інтерпретується як характеристика опору бетону одноосьовому стиску та визначає його базову несучу здатність.

Другий доданок відображає приріст міцності за рахунок поперечного обтиснення, що враховується введенням коригувального коефіцієнта для несучої здатності спіралі у кільцевому напрямку або оболонки у поздовжньому. Відмінності між формулами зводяться переважно до методики визначення цих коефіцієнтів, що суттєво впливає на точність оцінки роботи бетону у складному напруженому стані.

Розрахунок по міцності центрально стиснутих залізобетонних елементів суцільного перерізу при армуванні спіральною або кільцевою арматурою виконується за формулою

$$f_{b,red} = f_b + 2\mu_{cir} f_{s,cir} \left(1 - \frac{7,5l_0}{d_{ef}} \right), \quad (9)$$

де $f_{s,cir}$ – розрахунковий опір сталевій спіральній арматурі;

μ_{cir} – коефіцієнт армування, рівний $\frac{4A_{s,cir}}{d_{ef}s}$;

d_{ef} – діаметр перетину всередині спіралі;

$A_{s,cir}$ – площа поперечного перерізу спіральної арматури;

s – крок спіралі;

l_0 – ексцентриситет додатка поздовжньої сили.

Специфічні анізотропні властивості склопластиків зумовлюють необхідність спеціалізованих теоретичних досліджень напружено-деформованого стану склопластбетонних колон.

Всебічний обтиск бетону уповільнює процес утворення тріщин в ньому при експлуатаційних навантаженнях; зона пружної роботи бетону стає значно триваліший, ніж в неармованих склопластиком колонах.

Спільна робота бетонного ядра і склопластикової обойми, що володіють різними властивостями і механічними характеристиками, стає можливою завдяки тому, що зі зростанням осьової зовнішнього навантаження або матеріалу деформування сумісно.

Розглянемо напружено-деформований стан бетонного ядра, яке поміщено у суцільну склопластикову обойму, утворену намотуванням стрічкової склопластикової арматури (рис. 3.11).

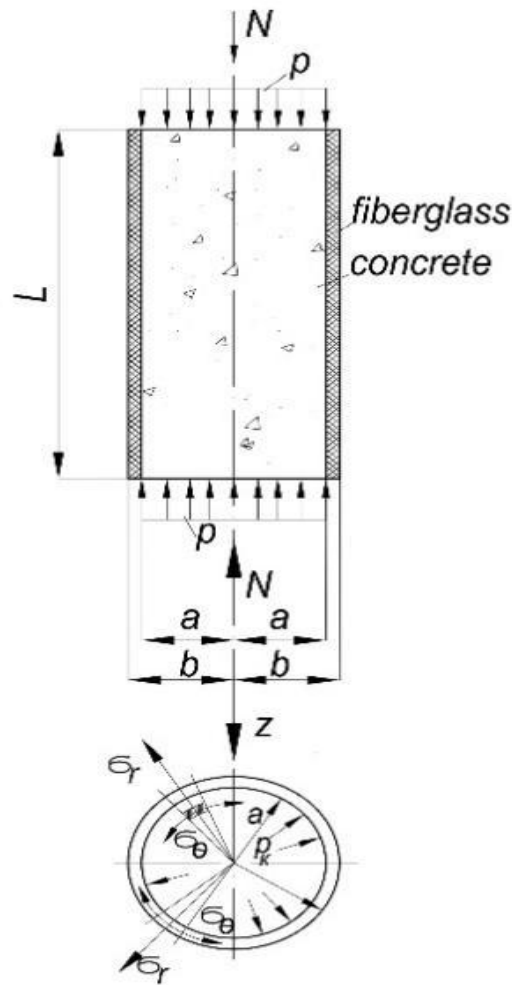


Рис. 3.11. Напружено деформований стан бетонного ядра ув'язненого в суцільну склопластикову обойму

Відділимо бетонне ядро від обойми, замінимо дію останнього контактного тиску p_k , враховуючи його рівномірні по довжині та по зовнішній координаті. У цьому випадку бетонне ядро буде представляти собою суцільний циліндр при осесиметричному навантаженні, відповідаючий умовам плоскої деформації.

Загальний вигляд рішення задачі про напружено-деформований стан циліндричного бетонного ядра може представляти наступним рівнянням:

$$\sigma_r = \sigma_0, \quad (3.10)$$

$$\sigma_z = \varepsilon_r E_\delta + 2\mu_\delta \cdot \sigma_r, \quad (3.11)$$

$$\sigma_z = -p = -\frac{4F}{\pi a^2}, \quad (3.12)$$

де E_δ , μ_δ – модуль пружності та коефіцієнт Пуасона бетону;

ε_r – осьова деформації;

σ_z – осьова стискаючого напруження;

σ_r – радіальні напруження;

F – стискаючі зусилля;

p – тиск стискання (приймаємо рівномірним).

Радіальне переміщення точки перетину циліндру бетонного ядра знаходиться з рівняння:

$$u = \varepsilon_\theta r = r \cdot \left(\frac{\sigma_\theta}{E_\delta} - \mu_\delta \frac{\sigma_r}{E_\delta} - \mu_\delta \frac{\sigma_z}{E_\delta} \right). \quad (3.13)$$

Переміщення бетонного ядра на радіусі сполучення його з обоймою підраховуються за формулою:

$$u(a) = \varepsilon_\theta \cdot a = -\frac{P_k \cdot a}{E_\delta} (1 - \mu_\delta) + \frac{4F\mu_\delta}{E_\delta \cdot \pi a^2}. \quad (3.14)$$

Напружено-деформований стан у бетонному ядрі буде повністю визначено, якщо знайти значення контактного тиску P_k .

Визначимо P_k із умови сумісності деформування обойми та бетонного ядра. Розглянемо шар обойми, вважаючи його односпрямованим. Якщо ось співпадає з направленням волокон, γ кут орієнтації намотування стрічки (рис. 3.12).

Несуча здатність бетонного ядра, яке поміщено у склопластикову обойму, тим більше, чим вищий клас бетону.

Несуча здатність його збільшення зі збільшенням товщини стінки обойми (потужності обойми), тобто кількості шарів стрічкової арматури.

Несуча здатність зростає по мірі збільшення міцності волокна та матриці, а також зі збільшенням заповнення волокнами армувального шару ψ_c .

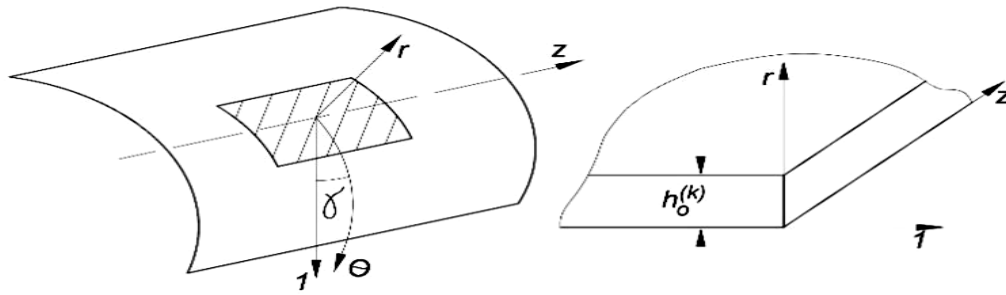


Рис. 3.12. Напружено деформований стан у шарі обойми.

Несуча здатність ядра знижується зі збільшенням діаметру обойми $2R_{cp}$.

У випадку сталеві обойми

$$\langle \sigma_z \rangle = f_{np} + \sigma_T \ln \left(\frac{b}{a} \right) \operatorname{tg}^2 \alpha, \quad (3.15)$$

звідки випливає, що несуча здатність бетону буде вище в армованій склопластиковій стрічці обойми, чим у металевій, якщо при інших рівних

$$\frac{\psi_c \langle \sigma_c \rangle + (1 - \psi_c) \langle \sigma_m \rangle}{R_{cp}} (b - a) > \sigma_T \ln \frac{b}{a}. \quad (3.16)$$

Ця формула дозволяє оцінити ефективність заміни металеві обойми на армуючу оболонку ССПА.

Несуча здатність при дії осьового стискаючого навантаження

Графіки залежності руйнівного навантаження від інтенсивності бічного тиску показані на рис. 3.13. З графіків випливає, що створення бічного тиску в бетонному ядрі за рахунок склопластикові обойми значно підвищує руйнівне навантаження. Для бетону класу С16/20, що не мають склопластикових обойм руйнівне навантаження при осьовому стиску була $F = 100 \text{ кН}$, а для таких же бетонних елементів з обоймою товщиною 4 мм (бічний тиск $p = 80 \text{ МПа}$) руйнівне навантаження досягло 980 кН, тобто. зросла у 9,8 рази. Міцність бетону інших класів також наростає. Так, для бетону класу С50 в діапазоні значень бічного тиску $p = 0-80 \text{ МПа}$ руйнівне навантаження збільшилося в 5,2 рази.

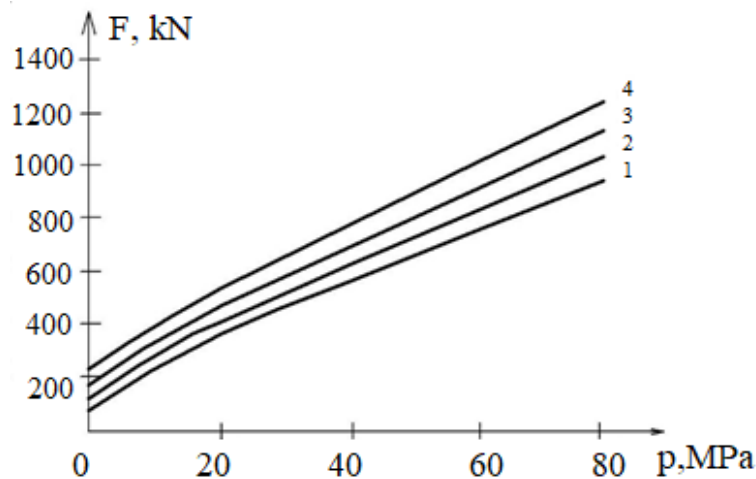


Рис. 3.13. Залежність руйнівного навантаження p від інтенсивності бічного тиску у граничному стані: 1 – бетон класу С16/20; 2 – С20/25; 3 – С32/40; 4 – С50

Укладання бетонного ядра в склопластикову обойму зі стрічковою склопластиковою арматурою призводить до значного підвищення міцності на осьовий стиск.

Інтенсивність наростання міцності залежить від класу бетону.

Склопластикова обойма поряд з високою механічною міцністю має високі протикорозійні властивості, що вигідно відрізняє її від сталевих обойм.

Вимірювання поздовжніх до поперечних дозволяє дослідити вплив та інтенсивність деформацій від бічного тиску та механічні властивості бетону

На рис. 3.14 показана залежність поздовжніх ε_z та поперечних ε_r деформацій центрально-стискових бетонних елементів від величини стискаючої осьової напруги для бетону класу С16/20.

Ефективність склопластикової обойми в залежності від її потужності та від механічних властивостей бетону

Ефективність сталеві оболонки, як відомо, оцінюють коефіцієнтом α , який за даними різних авторів має значення. Коефіцієнт α не постійної величини, при цьому діапазон значень α коливається в межах від 1 до 5. Розмір коефіцієнта α для склопластобетонних елементів визначаються за формулою

$$\alpha = \frac{F_p - F_0}{A_T \cdot \sigma_0}, \quad (3.17)$$

де F_p – руйнівне навантаження елемента в обоймі;

$F_0 = A_0 \cdot f_{ck} - F_0 = A_0 \cdot f_{ck}$ – руйнівне навантаження бетонного ядра (без обойми);

$F_p - F_0$ – зусилля, що сприймається елементом у граничному стані за рахунок дії обойми;

A_T – площа поперечного перерізу обойми;

f_{ck} – міцність бетонного елемента без обойми;

σ_0 – тимчасове опір матеріалу обойми при розтягуванні.

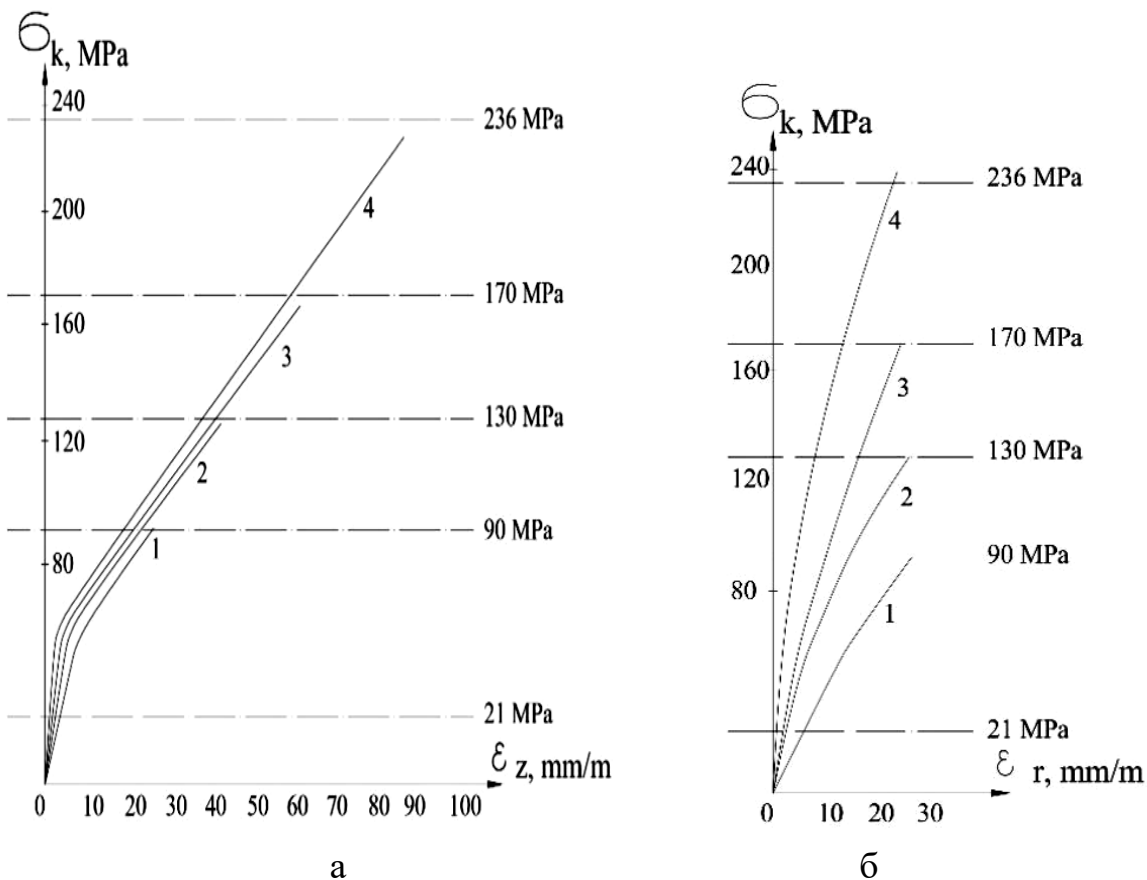


Рис. 3.14. Графіки поздовжніх ϵ_z та поперечних ϵ_r деформацій центрально-стискових бетонних циліндричних елементів із склопластику: 1 – 5 шарів ССПА; 2 – 10 шарів; 3 – 15 шарів; 4 – 20 шарів

Коефіцієнт α залежить від двох основних факторів: бічного тиску p , що надається на бетон склопластикової обойми, та класу бетону. Потужність обойми визначається величиною бічного тиску обойми в граничному стані (P), яке підраховали за формулою:

$$p = \sigma_0 \frac{\delta}{r} p = \sigma_0 \frac{\delta}{r}, \quad (3.18)$$

де σ_0 – тимчасовий опір склопластикової арматури;

r – радіус перерізу елемента;

δ – товщина стінки фіктивної труби

Коефіцієнт α залежить від бічного тиску. Величина бічного тиску обійми може бути змінена за рахунок зміни числа шарів склопластикової стрічки. Залежність коефіцієнта α від бічного тиску представлена на рис. 3.15.

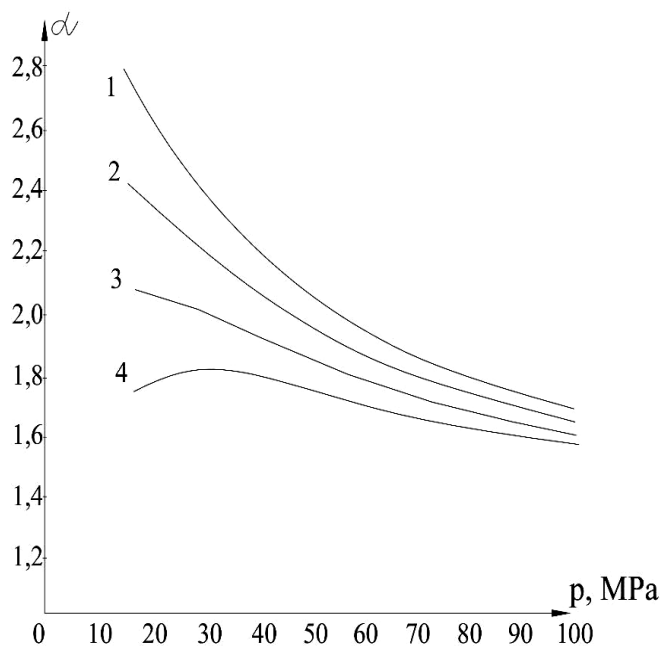


Рис. 3.15. Залежність коефіцієнта ефективності склопластикової обійми α від бічного тиску p : 1 – бетон класу C16/20; 2 – C20/25; 3 – C32/40; 4 – C50

Залежність коефіцієнта α від класу бетону має місце лише при обіймах невеликої потужності $\alpha = 1,8–2,7$ (рис. 3.15). З підвищенням потужності обійми ця залежність практично втрачається, а коефіцієнт α стає близьким до однакової величині ($\alpha = 1,85$).

Теоретична залежність коефіцієнта посилення (α) від рівня бічного тиску, яка узгоджується з експериментальними результатами і дає можливість прогнозувати поведінку бетону, посиленого склопластиковою обіймою, при різних типах навантажень підраховується за формулою:

$$\alpha = 8,91p^{-0,358} - \frac{F_0}{A_T \cdot \sigma_T} \quad \alpha = 8,91p^{-0,358} - \frac{F_0}{A_T \cdot \sigma_T}. \quad (3.19)$$

З графіка (рис. 3.15) видно, що з високих рівнях тривісного стискування спостерігається тенденція різних матеріалів деякого загального характеру руйнації, тоді як із низьких рівнях стиснення характер їх руйнації може мати суттєві відмінності.

Бетонні колони у склопластиковій обоймі мають високу деформативність, яка є характерною для конструкцій такого типу: армованих спіраллю, трубобетонних та інші. Це не дозволяє у повній мірі використовувати отриманий ефект збільшення міцності. Тому наряду з оцінкою несучої здатності колони на міцність повинна обов'язково проводитися її перевірка за стійкістю.

Умови міцності бетонних колон у склопластиковій оборочці при втраті стійкості прямолінійної форми рівноваги записується так:

$$\sigma \leq \sigma_{кр}, \quad (3.20)$$

де $\sigma_{кр}$ – критичні напруги, які треба визначати з урахуванням нелінійного характеру залежності між напруженням та деформаціями бетону

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 E_k}{\lambda^2}, \quad (3.21)$$

де λ – гнучкість колони;

E_k – дотичний модуль пружності, який може визначити, наприклад, за формулою:

$$E_k = \frac{E_0}{1 + a \left(\frac{\sigma}{b} \right)^c}, \quad (3.22)$$

де E_0 – початковий модуль пружності (при $\varepsilon = 0$);

a, b, c – емпіричний коефіцієнт.

Отримаємо рівняння для визначення $\sigma_{кр}$:

$$\sigma_{кр} = \left[1 + a \left(\frac{\sigma_{кр}}{b} \right)^c \right] = \frac{\pi^2 E_0}{\lambda^2}. \quad (3.23)$$

Задаючи різні значення гнучкості, можна звідси визначити $\sigma_{кр}$. Однак легше вчинити інакше – задатися значенням $\sigma_{кр}$ і визначити λ :

$$\lambda = \pi \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\sigma_{кр}}}}{\sqrt{1 + a \left(\frac{\sigma_{кр}}{b} \right)^c}}. \quad (3.24)$$

При порівнянні малих λ несуча здатність визначається міцністю матеріалу, при порівнянні великих – стійкістю. Значення λ , яке розділяє ці два випадки, отримаємо, $\sigma_{кр} = \sigma_{нч}$:

$$\lambda_0 = \pi \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\sigma_{нч}}}}{\sqrt{1 + a \left(\frac{\sigma_{нч}}{b} \right)^c}}. \quad (3.25)$$

У якості ілюстрації такого підходу покажемо, що для бетону класу С50 значення $\lambda_0 = 17,2$. Отже, при значеннях $\lambda \leq 17,2$ руйнування колони відбудеться від руйнування матеріалу, а при $\lambda > 17,2$ – від втрати стійкості конструкції.

У літературі відсутні відомості про значення дотичного модуля для бетонів високих та дуже високих класів, відповідаючих міцності бетону в склопластиковій обоймі. Побудована крива $\lambda = f(\sigma)$ дозволяє визначити λ_0 у більш широкому діапазоні значень міцності бетону. Так, для бетону класу 150 гнучкість $\lambda_0 = 1,51$ (рис. 3.16).

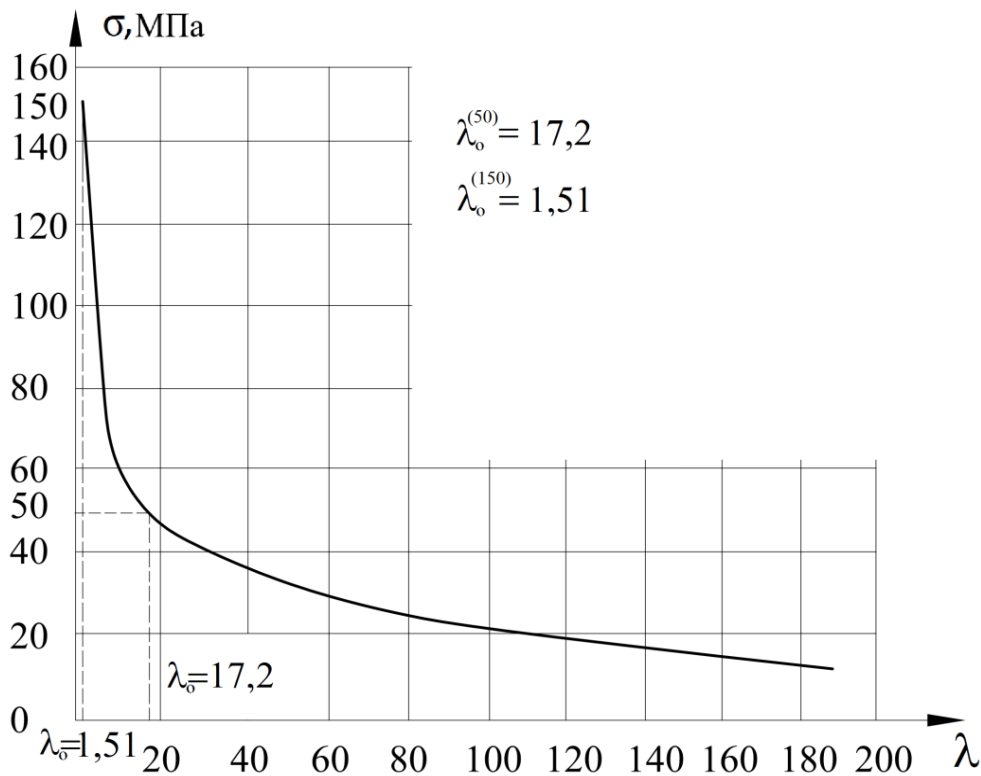


Рис. 3.16. Графік залежності руйнування напружень σ від гнучкості λ бетонних колон у склопластиковій обоймі.

Висновки за розділом

Властивості композитного склопластикового матеріалу, призначеного для зовнішнього підсилення залізобетонних конструкцій дозволяють оцінити стійкість матеріалу до агресивних факторів, що є ключовим для визначення його ефективності та довговічності в умовах експлуатації. Використання композитного матеріалу для підсилення конструкцій є цілком доцільним, має великий потенціал у забезпеченні надійності та тривалого терміну служби залізобетонних елементів.

На підставі отриманих даних рекомендується впровадження класу будівельних виробів та конструкцій, підсилених стрічковою склопластиковою арматурою. Така арматура здатна одночасно виконувати як зміцнювальні, так і захисні функції. Вона забезпечує значне покращення експлуатаційних характеристик, включаючи підвищення міцності та довговічності матеріалів, а також корозійну стійкість та екологічну безпеку. Крім цього, використання склопластикової

арматури сприяє зниженню матеріаломісткості та металомісткості конструкцій, зменшуючи їх загальну масу.

Використання Обойми зі склопластику значно збільшує міцнісну здатність бетонних елементів. Наприклад, для бетону С16/20 руйнуюче навантаження збільшилося з 100 кН до 980 кН, коли було застосовано Обойму товщиною 4 мм.

Обойма зі склопластику не тільки підвищує міцність, але й покращує деформативність, що підвищує стійкість конструкції як до поздовжніх, так і поперечних деформацій.

Обойма зі склопластику демонструє високу механічну міцність та корозійну стійкість, що робить її більш вигідною порівняно з традиційними сталевими Обоймами.

Теоретична залежність коефіцієнта посилення (α) від величини бічного тиску, що підтверджує експериментальні дані та дозволяє передбачити поведінку бетону в оболонці склопластику під різними навантаженнями

Бетон із склопластиком, може вважатися перспективним структурним матеріалом для високо навантажених структур, завдяки його високій міцності, низькій вазі та корозійній стійкості.

Розділ 4.

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛЕГКОГО БЕТОНУ НА ВЕРМИКУЛІТОВОМУ ЗАПОВНЮВАЧІ

У сучасному будівництві бетони займають провідне місце серед матеріалів, що використовуються для зведення як житлових, так і промислових та транспортних споруд. Висока універсальність, довговічність, здатність адаптуватися до різних умов експлуатації роблять бетон незамінним матеріалом у всіх секторах будівельної індустрії. Водночас розвиток технологій та підвищення вимог до енергоефективності, екологічності й економічності будівель зумовили активний пошук нових типів бетонів, що відповідають цим викликам. Одним із перспективних напрямів є легкі бетони, які завдяки своїм властивостям поєднують достатню міцність із низькою щільністю, покращеними теплотехнічними характеристиками та зниженим впливом на довкілля.

Питання застосування легких бетонів у будівництві набуває дедалі більшої актуальності з кількох причин. По-перше, сучасні тенденції у будівельній галузі акцентують увагу на зменшенні ваги конструкцій, що особливо важливо при зведенні висотних споруд, об'єктів у сейсмічно небезпечних районах та на нестійких ґрунтах. Легкі бетони дозволяють знизити навантаження на фундаменти та несучі елементи, забезпечуючи при цьому достатній рівень міцності.

По-друге, значний інтерес становлять теплоізоляційні властивості легких бетонів, адже у сучасному будівництві зростають вимоги до енергоефективності будівель. По-третє, важливою перевагою є зменшення трудовитрат і вартості будівництва завдяки кращій оброблюваності та нижчій масі матеріалу.

Таким чином, легкі бетони поєднують у собі конструкційну функціональність, теплотехнічні й акустичні властивості, що робить їх універсальним матеріалом для вирішення широкого спектра інженерних завдань.

Традиційно бетон визначається як штучний кам'яний матеріал, отриманий унаслідок твердіння суміші в'язучого, води та заповнювачів, раціонально підібраних у певному співвідношенні. Якщо звичайний важкий бетон має щільність понад 2000 кг/м³, то легкі бетони характеризуються середньою густиною менше ніж 2000 кг/м³.

Зниження густини досягається шляхом застосування пористих заповнювачів (природних або штучних), використання спеціальних добавок, введення повітряних пор у структуру матеріалу.

Нормативні вимоги до легких бетонів в Україні регламентуються ДСТУ Б В.2.7-18-95 «Бетони легкі. Загальні технічні умови», у якому наведено класифікацію за призначенням, структурою та видами заповнювачів.

4.1. Класифікація легких бетонів.

За призначенням:

Легкі бетони поділяються на кілька категорій залежно від основної функції:

Конструкційні – застосовуються для виготовлення несучих елементів будівель і споруд, здатні сприймати значні навантаження. Вони мають середню щільність 1400–2000 кг/м³, клас міцності на стиск – не менше В2 (М20) і до В40 (М500), морозостійкість не нижче F15.

Конструкційно-теплоізоляційні – поєднують достатню міцність із низькою теплопровідністю. Використовуються для виготовлення стінових блоків, плит покриттів, панелей, що одночасно виконують функцію несучих і огорожувальних конструкцій.

Теплоізоляційні – їх головне завдання полягає в забезпеченні потрібного термічного опору будівлі. Об'ємна маса таких бетонів зазвичай не перевищує 500 кг/м³, коефіцієнт теплопровідності становить до 0,2 Вт/(м·°С).

Спеціальні – призначені для особливих умов експлуатації, наприклад жаростійкі, хімічно стійкі, звукопоглинальні та інші.

За структурою:

За структурною організацією легкі бетони можуть бути: щільні – з рівномірним розподілом пор і високою щільністю; поризовані – відрізняються наявністю значної кількості замкнутих повітряних пор, отриманих у результаті введення піноутворювачів; ніздрюваті (пористі) – містять до 85 % дрібних повітряних пор, що надає їм надзвичайно низьку щільність і добрі теплоізоляційні властивості (приклади – газобетон, пінобетон); великопористі – безпіщані бетони,

у яких заповнювачем є крупні присті частинки; застосовуються для виготовлення стінових матеріалів невисоких будівель.

За видами заповнювачів заповнювачі поділяють на мінеральні та органічні.

Мінеральні заповнювачі (природні або штучні) – керамзит, аглопорит, пемза, туф, перліт, вермикуліт, шлаки тощо. Вони найчастіше застосовуються у сучасному будівництві, оскільки забезпечують оптимальне поєднання міцності, довговічності та теплоізоляційних властивостей.

Органічні заповнювачі – продукти переробки деревини (тирса, стружка, тріска), рослинна сировина (льоноволокно, костра конопель тощо). На їх основі виготовляють такі різновиди легких бетонів, як тирсобетон і арболіт.

Заповнювачі поділяють також за крупністю: дрібні (пісок, до 5 мм), крупні (щебінь, гравій, понад 5 мм).

Вибір заповнювача визначає фізико-механічні характеристики бетону, його теплопровідність, водопоглинання та довговічність. Вибір конкретного виду матеріалу залежить від поєднання таких факторів, як: несуча здатність конструкції, теплотехнічні а акустичні вимоги, екологічність сировини, економічна доцільність.

Наприклад, у багатоповерховому житловому будівництві доцільним є використання керамзитобетону, що забезпечує необхідну міцність і довговічність, тоді як у спорудах, де основним є теплоізоляційний ефект, доцільніше застосовувати газобетон чи верчихулітобетон.

Таким чином, легкі бетони являють собою різноманітну групу матеріалів, здатних задовольнити вимоги сучасного будівництва в аспектах міцності, енергоефективності та економічності (табл. 4.1.).

4.2. Фізико-механічні властивості легких бетонів

Легкі бетони як клас будівельних матеріалів характеризуються значним різноманіттям властивостей, що обумовлено насамперед природою заповнювачів, видом в'язучого та структурними особливостями.

Види легкого бетону

Вид бетону	Основний заповнювач	Характерні властивості та сфера застосування
Керамзитобетон	Керамзит	Висока міцність, достатня морозостійкість; застосовується для несучих і огороджувальних конструкцій
Пемзобетон	Природна пемза	Низька щільність, добра теплоізоляція; обмежене застосування через високу крихкість і складність транспортування
Шлакобетон	Топкові та доменні шлаки	Невисока міцність, високе водопоглинання; обмежене використання в житловому будівництві через екологічні ризики
Вермикулітобетон	Вермикуліт	Висока теплоізоляційність, мала маса конструкцій; перспективний для енергоефективного будівництва
Перлітобетон	Перліт	Дуже низька щільність, відмінні теплоізоляційні властивості; застосовується як утеплювальний матеріал
Аглопоритобетон	Аглопорит	Висока міцність, добрі теплоізоляційні властивості; широко використовується в панельному будівництві
Арболіт, тирсобетон	Органічні заповнювачі (тирса, стружка, волокна)	Легкість, екологічність, добрі акустичні властивості; обмежена міцність і водостійкість

Головними показниками, які визначають область застосування легкого бетону, є: середня густина у сухому стані; межа міцності при стисканні; коефіцієнт теплопровідності; морозостійкість; водопоглинання. Залежно від поєднання цих параметрів легкі бетони можуть виконувати як конструкційну функцію (сприймати навантаження), так і теплоізоляційну (забезпечувати термічний опір огороджувальних конструкцій).

Наприклад, теплоізоляційні бетони мають щільність 200–500 кг/м³ і характеризуються низьким коефіцієнтом теплопровідності (0,08–0,2 Вт/м·К).

Конструкційні легкі бетони, навпаки, мають щільність від 1400 до 2000 кг/м³ та марку за міцністю не нижче М50, що дозволяє застосовувати їх у несучих елементах будівель.

Вплив заповнювачів і в'язучих. Вибір заповнювача є визначальним фактором у формуванні експлуатаційних характеристик легких бетонів. У сучасному будівництві використовуються як природні пористі матеріали (пемза, туф, вулканічний шлак), так і штучні заповнювачі (керамзит, перліт, вермікуліт, аглопорит, доменний шлак).

Керамзитні бетони відзначаються високою міцністю та довговічністю, що робить їх придатними для конструкційних елементів. Вермікулітові бетони мають надзвичайно низьку теплопровідність, тому використовуються переважно для теплоізоляційних шарів. Перлітові та аглопоритові бетони поєднують помірну міцність із задовільними теплоізоляційними характеристиками.

Що стосується в'язучих, то для легких бетонів застосовуються цементні, вапняні, гіпсові та полімерні системи. При цьому цементні склади є універсальними, тоді як гіпсові та полімерні мають більш спеціалізоване застосування – зокрема, у внутрішніх опоряджувальних роботах або для виробів із регламентованими теплоізоляційними властивостями.

Відповідно до ДСТУ Б В.2.7-18-95, легкі бетони класифікують за кількома ознаками: За призначенням: конструкційні; конструкційно-теплоізоляційні; теплоізоляційні; спеціальні (жаростійкі, хімічно-стійкі, акустичні тощо). За структурою: поризовані; коміркові; з пористими заповнювачами. За видами заповнювачів: природні пористі; штучні пористі; органічні (тирса, полімерні гранули тощо) (табл. 4.3).

У міжнародних стандартах (наприклад, EN 206-1:2013, ASTM C330) підходи до класифікації мають спільні риси, однак різняться межами щільності та визначенням класів міцності, що можна побачити з табл. 4.2.

Як було сказано вище, легкі бетони також розподіляються за видами заповнювачів, а самі основні види наповнювачів, які використовуються для їх створення, показані в табл. 4.3.

Таблиця 4.2

Класифікація легких бетонів

Тип бетону	Середня густина (кг/м ³)	Клас міцності (МПа)	Теплопровідність (Вт/м·К)	Морозотійкість (циклів)	Галузь застосування
Теплоізоляційний	200–500	B0,35 – B1	0,08–0,20	15–25	Теплоізоляційні шари, огорожувальні конструкції
Конструкційно-теплоізоляційний	500–1400	B2 – B15	0,20–0,45	25–100	Стіни, перегородки, заповнення каркасів
Конструкційний	1400–2000	B20 – B40	0,45–0,75	50–300	Несучі елементи будівель, перекриття
Спеціальний	300–2000 (залежно від виду)	B5 – B50	Варіює	50–500	Хімічно стійкі, жаростійкі, акустичні конструкції

Таблиця 4.3

Види заповнювачів

Тип заповнювача	Походження	Приклади матеріалів	Характеристика
Природні пористі	Вулканічні породи	Пемза, туф, шлак	Легкі, екологічні, але обмежені родовищами
Штучні пористі	Термообробка глини, шлаків	Керамзит, аглопорит, перліт, вермікуліт	Висока якість, контрольовані властивості
Органічні	Рослинні та полімерні матеріали	Тирса, полімерні гранули, гумові відходи	Низька маса, але обмежена міцність

4.3. Порівняння українських та міжнародних стандартів

В Україні діє ДСТУ Б В.2.7-18-95, який регламентує показники легких бетонів. У Європі використовується стандарт EN 206-1:2013, а у США – ASTM C330. Основні відмінності полягають у діапазонах густини, класифікації за міцністю та методиках випробувань.

Таблиця 4.4

Порівняння класифікації легких бетонів у різних стандартах

Показник	ДСТУ Б В.2.7-18-95	EN 206-1:2013	ASTM C330
Межа густини	<2000 кг/м ³	800–2000 кг/м ³	<1850 кг/м ³
Класи міцності	B0,35 – B40	C8/10 – C35/45	7–35 МПа
Морозостійкість	25–500 циклів	Не регламентується прямо	50–300 циклів
Вимоги до заповнювачів	Чітко визначені	Вказано загально	Специфікація ASTM C331

Отже, легкі бетони формують широкий клас матеріалів, що поєднують різноманітність складів і властивостей. Їхні ключові переваги полягають у можливості регулювання густини, міцності та теплотехнічних характеристик залежно від вимог конкретного будівельного об'єкта. Водночас важливим залишається дотримання стандартів та технологічних норм, які забезпечують стабільність властивостей і довговічність матеріалу.

4.4. Характеристика гіпсу, що застосовується для виготовлення повітряних в'язучих легкого бетону

Серед неорганічних в'язучих матеріалів, що застосовуються у будівництві, гіпс посідає особливе місце завдяки поєднанню доступності сировини, низької енергоємності виробництва, швидкого твердіння та екологічності.

Використання гіпсових матеріалів дозволяє скоротити терміни будівельних робіт, зменшити навантаження на несучі конструкції та підвищити комфортність експлуатації будівель [95, 96, 111–128].

Порівняно з цементом чи вапном, гіпс потребує у 4–5 разів менших витрат палива, а також характеризується відсутністю значних викидів CO₂, що особливо важливо в умовах глобального переходу до низьковуглецевої економіки.

Гіпсові в'язучі отримують із:

- природних родовищ: гіпсовий камінь (CaSO₄·2H₂O), ангідрит (CaSO₄), гажа, глиногіпс;
- техногенних відходів: фосфогіпс (побічний продукт виробництва добрив), борогіпс, будівельні відходи (гіпсокартон).

В Україні значні поклади гіпсу зосереджені у Донбасі, Прикарпатті, Поділлі, що забезпечує рівномірну сировинну базу для розвитку будівельної індустрії (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Основні джерела сировини для гіпсових в'язучих

Джерело	Характеристика	Переваги	Обмеження
Природний гіпсовий камінь	CaSO ₄ ·2H ₂ O, тверда мінеральна порода	Доступність, рівномірність родовищ	Потребує видобутку, транспорту
Ангідрит	CaSO ₄ , безводна форма	Стійкість, можливість використання у цементі	Повільне твердіння
Фосфогіпс	Побічний продукт добрив	Вторинне використання, утилізація відходів	Наявність домішок (P ₂ O ₅ , F)
Будівельні відходи	Гіпсокартон, плити	Замкнений цикл переробки	Потреба у сортуванні

4.5. Класифікація гіпсових в'язучих

Фізико-хімічна та кристалічна структура гіпсу.

Основною фазою природного гіпсу є двогідрат сульфату кальцію (CaSO₄·2H₂O). Кристалічна решітка складається з іонів кальцію, що пов'язані із SO₄²⁻ групами, між якими утримуються молекули води. Вода є ключовим фактором, що визначає властивості гіпсу. При нагріванні отримується: – 150–180 °C → напівгідрат (CaSO₄·0,5H₂O) – основна фаза в'язучого, при >600 °C → ангідрит (CaSO₄), який твердне повільно.

Змішування напівгідрату з водою призводить до зворотної кристалізації у двогідрат, що супроводжується виділенням тепла та утворенням міцної структури. Будівельний гіпс – швидкотверднучий, для штукатурок і шпаклівок. Високоміцний α -гіпс – отримується в автоклавних умовах, застосовується для блоків, гіпсокартону. Форма β -гіпсу – отримується при відкритому випалі, використовується в оздобленні; ангідритові цементи – повільнотверднучі, з високою хімічною стійкістю. Основні типи гіпсових в'язучих ми можемо побачити з табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Основні типи гіпсових в'язучих

Тип	Умови отримання	Особливості	Застосування
Будівельний	150–180 °С	швидке твердіння	оздоблення
Альфа-гіпс	автоклав, тиск	висока міцність	гіпсокартон, блоки
Бета-гіпс	відкритий випал	пориста структура	штукатурки
Ангідритовий цемент	>600 °С	повільне твердіння	підлоги, агресивні середовища

Нижче наведено основні фізико-механічні властивості гіпсових в'язучих матеріалів, (табл. 4.7) які використовуються для їх оцінювання згідно з будівельними нормами (ДСТУ, EN 13279) та практикою матеріалознавства.

Таблиця 4.7

Фізико-механічні властивості гіпсових в'язучих

Показник	Значення
Густина, кг/м ³	2300–2400
Насипна густина, кг/м ³	700–1100
Міцність на стиск, МПа	8–25
Міцність на вигин, МПа	4–8
Водопоглинання, %	5–20
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,2–0,35

Теплотехнічні та акустичні характеристики.

Гіпсові матеріали мають низьку теплопровідність, що дозволяє зменшити тепловтрати будівель. Крім того, завдяки пористій структурі вони мають хороші акустичні властивості. Нижче, в табл. 4.8 показано зрівняння теплотехнічних та акустичних властивостей огороджуючих будівельних матеріалів.

Таблиця 4.8

Теплотехнічні характеристики будівельних матеріалів

Матеріал	Теплопровідність, Вт/(м•К)	Звукоізоляція, дБ
Гіпс	0,2–0,35	35–50
Бетон важкий	1,3–1,7	40–55
Цегла керамічна	0,5–0,8	35–45

Гіпс має економічні переваги: у 4–5 разів нижчі енергозатрати, швидкість будівництва, дешевше обладнання. Екологічні переваги: мінімальні викиди CO₂, можливість повторного використання відходів, нетоксичність. Табл. 4.9 демонструє перевагу екологічності гіпсу над вапном та цементом при виробництві.

Таблиця 4.9

Порівняння екологічного впливу

Матеріал	Викиди CO ₂ , кг/т	Використання вторинної сировини
Гіпс	50–80	високе
Цемент	700–800	низьке
Вапно	150–200	середнє

Сучасні інноваційні напрями використання гіпсу:

Гіпсові композити: модифікація полімерними добавками для підвищення міцності та водостійкості.

Нанотехнології: застосування нанокремнезему, наноглин, графену для поліпшення структури.

3D-друк гіпсом: використання гіпсу як порошку для адитивних технологій у будівництві.

Гіпс з фазозмінними матеріалами (PCM): для підвищення енергоефективності будівель.

В табл. 4.10 ми бачимо інноваційні модифікації гіпсу, що застосовуються в будівництві.

Таблиця 4.10

Інноваційні модифікації гіпсу

Напрямок	Ефект	Приклади застосування
Полімерні добавки	міцність ↑, водостійкість ↑	фасадні панелі
Наночастинки	зниження пористості	оздоблення
3D-друк	складні форми	архітектура
PCM-добавки	енергоефективність ↑	стіни, стелі

Гіпс як в'язучий матеріал має унікальне поєднання властивостей – низьку енергоємність виробництва, екологічність, достатню міцність, легкість обробки. Він не лише конкурує з цементом у ряді сфер, але й перевершує його за економічністю та екологічністю. Перспективними напрямками є розробка гіпсових композитів з модифікуючими добавками, впровадження нанотехнологій та застосування у 3D-будівництві, що робить цей матеріал ключовим елементом сучасної та майбутньої будівельної індустрії.

4.6. Вибір заповнювача для легкого бетону. Основні властивості вермикуліту

Вибір заповнювача є одним із ключових факторів у створенні легких бетонів, оскільки саме цей компонент визначає більшу частину фізико-механічних та теплотехнічних характеристик матеріалу. За статистичними оцінками, вартість заповнювачів може становити до 60–70 % загальної собівартості бетону. В умовах сучасного будівельного комплексу України, який орієнтується на зниження матеріаломісткості й енергоємності конструкцій, економічна ефективність заповнювача стає особливо значущою.

Застосування традиційних матеріалів, таких як щебінь або гравій, не дозволяє забезпечити низьку густину й високі теплоізоляційні властивості, необхідні для легких бетонів. Саме тому промисловість активно впроваджує альтернативні заповнювачі: керамзит, перліт, пемзу, туф та вермикуліт. Серед них вермикуліт займає особливе

місце завдяки своїм унікальним мінералогічним і структурним властивостям. В табл. 4.11 показано порівняння витрат на заповнювачі для легких бетонів в умовних енергетичних одиницях.

Таблиця 4.11

Порівняння витрат на заповнювачі для легких бетонів

Заповнювач	Собівартість виробництва (умовні одиниці/т)	Енерговитрати на виробництво (МДж/т)	Доступність сировини в Україні	Теплопровідність бетону (Вт/м•К)	Економічна оцінка
Керамзит	100	3500	Висока	0,30–0,45	Добра
Перліт	160	4200	Середня	0,12–0,18	Середня
Пемза	180	4000	Обмежена	0,25–0,35	Середня
Вермикуліт	140	3200	Висока	0,06–0,10	Висока

Примітка: дані наведено за узагальненими літературними джерелами та статистичними матеріалами.

Як видно з табл. 4.11, вермикуліт має оптимальне співвідношення собівартості, енерговитрат і теплотехнічних властивостей, що робить його конкурентоспроможним серед інших легких заповнювачів.

Загальні характеристики вермикуліту.

Вермикуліт належить до групи гідратованих алюмосилікатів шаруватої будови, які утворюються внаслідок глибоких процесів гідротермального та гіпергенного перетворення біотитів і флогопітів. Його назва походить від лат. *vermiculus* («черв'ячок») через характерне спучування при нагріванні, коли мінерал перетворюється на стовпчики, схожі на черв'яків.

Природний вермикуліт зазвичай має такі морфологічні ознаки:

- колір – від золотисто-жовтого до темно-бурого;
- структура – пластинчаста, блискуча, подібна до слюди;
- густина – 2,2–2,6 г/см³ у природному стані;
- здатність до термічного розширення – у 10–20 разів при нагріванні до 800–1000 °С.

Його родовища досить рівномірно розповсюджені по всьому світу, а в Україні відомі поклади на території Житомирської, Дніпропетровської та Кіровоградської областей.

Мінералогічні та кристалохімічні особливості.

Вермикуліт відноситься до шаруватих алюмосилікатів типу монтморилонітів, однак має власні відмінні риси. Його структура складається з тривимірної системи силікатних тетраедрів і октаедрів, між якими розташовані молекули води та іони Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^{+} .

Ключова властивість – здатність до гідратації та дегідратації, яка супроводжується значними об’ємними змінами.

Саме ця особливість обумовлює феномен «спучування» вермикуліту під час термообробки.

Характеристики мінералів флогопіт-біотітового ряду показані в табл. 4.12.

Таблиця 4.12

Порівняльні характеристики мінералів ряду
флогопіт – біотит – вермикуліт

Параметр	Флогопіт	Біотит	Вермикуліт
Колір	Світло-жовтий	Темно-зелений	Золотистий, бурий
Густина, г/см ³	2,8–3,0	2,7–3,2	2,2–2,6
Вміст води, %	<1	1–2	5–12
Здатність до спучування	Немає	Немає	Висока
Теплопровідність, Вт/м•К	1,5–2,0	1,2–1,8	0,06–0,10

З табл. 4.12 ми бачимо переваги вермикуліту навіть в дотичних мінералах.

Фізико-технічні властивості природного вермикуліту.

Однією з найбільш цінних властивостей є надзвичайно низька щільність після спучування. Питома маса спученого вермикуліту коливається у межах 55–300 кг/м³, що дозволяє створювати бетони з густиною 400–900 кг/м³.

Інші важливі характеристики: висока вогнестійкість (витримує до 1200 °С без втрати властивостей); негорючість і здатність поглинати звук; хімічна інертність у слабокислих і слабколужних середовищах; біостійкість. (Нижче показані фізико-технічні властивості спученого вермикуліту (табл. 4.13).

Фізико-технічні властивості спученого вермикуліту

Показник	Значення
Насипна густина, кг/м ³	55–300
Теплопровідність, Вт/м·К	0,06–0,10
Вогнестійкість, °С	до 1200
Водопоглинання, %	200–500
Звукоізоляція, дБ	18–25

Порівняння вермикуліту з іншими легкими заповнювачами.

Для оцінки придатності вермикуліту до використання у легких бетонах важливо зіставити його властивості з іншими популярними заповнювачами. Вермикуліт має найбільш вигідне поєднання щільності, теплотехнічних і екологічних властивостей, що робить його унікальним у класі легких заповнювачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14

Порівняння властивостей заповнювачів легких бетонів

Параметр	Керамзит	Перліт	Пемза	Вермикуліт
Густина, кг/м ³	250–600	75–150	400–600	55–300
Теплопровідність, Вт/м·К	0,30–0,45	0,12–0,18	0,25–0,35	0,06–0,10
Вогнестійкість, °С	до 1100	до 900	до 1000	до 1200
Біостійкість	Середня	Висока	Висока	Висока
Екологічність	Висока	Висока	Висока	Дуже висока

Технологічна цінність вермикуліту як заповнювача.

Використання вермикуліту у будівництві забезпечує низку переваг: негорючість – матеріал відноситься до групи НГ (негорючих); теплоізоляційні властивості – низький коефіцієнт теплопровідності дозволяє зменшувати товщину огорожувальних конструкцій; звукоізоляція – за рахунок пористої структури матеріал ефективно поглинає шум; екологічність – виробництво вермикуліту супроводжується мінімальними викидами CO₂; довговічність – матеріал стійкий до біологічного руйнування і корозії.

Ці властивості роблять вермикуліт не лише перспективним заповнювачем для легких бетонів, а й цінним компонентом у виробництві теплоізоляційних плит, штукатурок та вогнезахисних покриттів.

Проміжні висновки:

1. Вибір заповнювача є визначальним фактором у створенні легких бетонів, і вермикуліт демонструє найкраще поєднання фізико-технічних та економічних характеристик.

2. Мінерал має унікальну шарувату структуру, яка забезпечує здатність до спучування та низьку теплопровідність.

3. Порівняльний аналіз показує, що за більшістю ключових показників вермикуліт перевершує керамзит, перліт і пемзу.

4. Використання вермикуліту як заповнювача дає змогу суттєво підвищити енергоефективність будівель, знизити їх матеріаломісткість і забезпечити високу екологічність.

4.7. Матеріали і методи випробувань та створення оптимізованої суміші гіпсовермикулітобетону

Розробка нових теплоізоляційних і конструкційно-теплоізоляційних матеріалів вимагає чітко визначеного підходу до відбору сировини, проектування складів та методів їх дослідження. Для отримання гіпсовермикулітобетону необхідним є оптимальне поєднання в'язучого (гіпсового), легкого пористого заповнювача (спученого вермикуліту), а також модифікуючих добавок, що дозволяють досягти високих показників міцності, водостійкості та довговічності. Основна мета експериментальних досліджень полягала у визначенні впливу зернового складу та кількості вермикуліту, водо-гіпсового співвідношення, а також модифікуючих добавок на фізико-механічні характеристики отриманого композиту.

Матеріали, що застосовуються у дослідженні: гіпсове в'язуче. Як в'язуче використано будівельний гіпс марки Г-5 БІІ відповідно до ДСТУ БВ.2.7-82:2008.

Основні характеристики:

тонкість помелу – залишок на ситі №02 не більше 15 %; початок тужавлення – не менше 6 хв; кінець тужавлення – не більше 30 хв;

міцність при стиску через 2 год – не менше 5 МПа. Вермикуліт спучений: Використовувався спучений вермикуліт фракцій 0–1 мм, 1–3 мм та 3–5 мм, отриманий із сировини українських родовищ;

насипна густина – 120–150 кг/м³; *теплопровідність* – 0,08 Вт/м·К; *водопоглинання* – до 350 %; *вогнестійкість* – до 1200 °С. *Додаткові компоненти*: Пластифікатор на основі лігносульфонатів (0,2–0,4 % від маси гіпсу) – для зниження водовмісту. Гідрофобізатор (кремнійорганічна емульсія, 0,3–0,5 %) – для підвищення водостійкості. Мінеральні мікродобавки (зола-виношення, мікрокремнезем, 5–10 % від маси гіпсу) – для підвищення міцності та щільності структури.

Методика підготовки зразків.

Попередня підготовка матеріалів: гіпс просіювали через сито №02; вермикуліт висушували до постійної маси при 105±5 °С; мінеральні добавки подрібнювали до залишку на ситі №008 не більше 5 %.

Приготування сумішей здійснювалось у лабораторному змішувачі об'ємом 10 л у такій послідовності: змішування сухих компонентів (гіпс + мінеральні добавки + вермикуліт); введення частини води з розчиненим пластифікатором; доведення суміші до робочої консистенції.

Формування зразків: куби 70×70×70 мм для випробувань на міцність при стиску; призми 40×40×160 мм для випробувань на міцність при згині; циліндри Ø100×100 мм для дослідження тепло провідності та водопоглинання.

Умови твердіння: початкове витримання у формах – 2 год; розпалубка і берігання при температурі 20 ± 2 °С та відносній вологості 60 ± 5 %.

Методи випробувань. Визначення міцності – згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Випробування проводились на гідравлічному пресі з навантаженням до 1000 кН.

Фізико-технічні показники. Середня густина – визначалась за масою висушених зразків та їх геометричними розмірами. Водопоглинання – за масою зразків після 24 год занурення у воду. Морозостійкість – цикли заморожування/відтавання за методикою ДСТУ Б В.2.7-49-96. Теплопровідність – вимірювалась за допомогою тепломіра ІТП-МГ4. Мікроструктурні дослідження: скануюча електронна мікроскопія (SEM) – для аналізу структури гіпсових кристалів та

контактів із зернами вермикуліту. Рентгенофазовий аналіз (XRD) – для виявлення фазового складу та гідратаційних продуктів. Диференційно-термічний аналіз (DTA) – для оцінки термостійкості композиту. Складання та оптимізація сумішей. На першому етапі було відібрано три базові склади гіпсовермікулітобетону з різним співвідношенням компонентів. Склади гіпсовермікулітобетону ми можемо бачити в табл. 4.15.

Таблиця 4.15

Базові склади гіпсовермікулітобетону (на 1 м³ суміші)

Компонент	Склад 1	Склад 2	Склад 3
Гіпс, кг	600	550	500
Вермикуліт, кг	150	200	250
Мінеральні добавки, кг	50	70	100
Вода, л	400	380	360
Пластифікатор, %	0,25	0,30	0,35
Гідрофобізатор, %	0,30	0,40	0,50

Оптимізація складів.

Для оптимізації застосовано метод повного факторного експерименту 2³, у якому варіювали:

1. Водогіпсове співвідношення (0,55–0,65).
2. Вміст вермикуліту (150–250 кг/м³).
3. Дозування мінеральних мікродобавок (5–10 %).

Отримані результати обробляли статистичними методами із застосуванням критерію Стюдента та дисперсійного аналізу. Результати впливу наведені в табл. 4.16.

Таблиця 4.16

Вплив складу на характеристики гіпсовермікулітобетону

Параметр	Склад 1	Склад 2	Склад 3
Густина, кг/м ³	820	750	690
Міцність на стиск, МПа	6,2	7,8	8,5
Теплопровідність, Вт/м•К	0,14	0,11	0,09
Водопоглинання,	28	24	22
Морозостійкість, циклів	25	35	50

Узагальнення результатів.

Найкраще співвідношення властивостей показав Склад 3, який забезпечує міцність понад 8 МПа при теплопровідності 0,09 Вт/м·К.

– Додавання мінеральних мікродобавок сприяє ущільненню структури та зменшенню капілярної пористості.

– Використання гідрофобізаторів суттєво знижує водопоглинання і підвищує морозостійкість.

– Оптимізований гіпсовермікулітобетон може бути віднесений до конструкційно-теплоізоляційних матеріалів, придатних для використання в огорожувальних конструкціях малоповерхового будівництва.

Використання ГВБ у якості теплоізоляційних матеріалів.

В результаті проведених досліджень згідно оптимізаційних розрахунків нами була отримана дослідна партія ГВБ на низьковипальному вермикуліті Васильківського родовища з 2% добавкою ТВП зовнішній вигляд і внутрішню структуру яких ми бачимо на рис 4.1.



Рис. 4.1. Дослідна партія блоків з ГВБ.

На підприємстві ТОВ «БК УКРПРОМБУД» була випущена дослідно-промислова партія з впровадженими результатами: стінові блоки з вермикулітобетону на гіпсовому в'язучому розмірами 10 × 30 × 50 см, 20 × 30 × 50 см, щільністю 600–700 кг/м³, а також для порівняння випущена дослідно-промислова партія ГВБ без добавок за традиційною технологією. Також була проведена порівняльна характеристика теплотехнічних і міцнісних показників з найбільш використовуваними в будівництві теплоізоляційними матеріалами,

такими як перлітобетон і керамзитобетон. Результати дослідно-промислових випробувань наведені в табл. 4.17.

Таблиця 4.17

Властивості теплоізоляційних бетонів

№ з/п	Властивості	Гіпсовермикулітобетон		Традиційні теплоізоляційні бетони	
		ГВБ з ТВП	Традиційний ГВБ	керамзитобетон	перлітобетон
1	Щільність, кг/м ³	600–700	300–800	600–800	600–1200
2	Міцність, МПа	2,57–4,37	2,0–4,2	4,0–8,0	2,0–3,9
3	Теплопровідність, Вт/(м·°С)	0,12–0,22	0,1–0,22	0,20–0,28	0,12–0,29

В результаті проведеної роботи було виявлено, що отримані нами матеріали на низьковипальному вермикуліті з ТВП нічим не поступають за характеристиками міцності на традиційному бетону на вермикуліті, керамзитобетону і перлітобетону, а по теплотехнічним властивостям перевершують їх [96, 99–103], що дозволяє рекомендувати ГВБ з ТВП в якості теплоізоляційного матеріалу, а блоки з ГВБ у якості самонесучих.

4.8. Використання ГВБ у якості вогнетривких матеріалів

Спучені мінеральні наповнювачі використовуються у складах вогнезахисних паст та штукатурних розчинів готують на основі рідкого скла, будівельного гіпсу, глиноземистого і пуцоланових цементів [96–104]. Також, з волокнистих наповнювачів застосовують: каолінову вату та інші мінеральні волокна, розпушений азбест, тощо.

Від звичайних цементно-піщаних шпаклівок і розчинних штукатурних сумішей вогнезахисні паста та штукатурки відрізняються. Основною відмінністю вогнезахисних паст та штукатурок є відсутність в якості сполучного портландцементу і заповнювача у вигляді кварцового піску [99–105].

Відомо, що портландцемент при твердінні поряд з гідросилікатами, гідроалюмінатами і гідроферритами виділяє гідроксид кальцію ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), який при дії температур більше $550\text{ }^\circ\text{C}$ розкладається по реакції: $\text{Ca}(\text{OH})_2 > \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$. При гасінні пожежі водою (або просто в контакт з вологим повітрям) йде зворотна реакція, при цьому продукт гідратації збільшується в об'ємі в 2 рази [96, 108]. Гашене вапно «рве» поверхневий шар, утворюються «дутики», тріщини, які сприяють проникненню вогню всередину конструкції [97]. Склади з використанням кварцового піску теж не вогнестійкі: кристалічний кремнезем – основна складуюча природного піску, переходить при $t = 573\text{ }^\circ\text{C}$ з «бета» – модифікації в «альфа», зі збільшенням в об'ємі. В результаті шар штукатурки тріскається.

Гіпсове в'язуче є універсальною сировиною для виготовлення різноманітних будівельних виробів у вигляді блоків, сухих будівельних сумішей, при виробництві будівельних робіт та ін. [99–108].

Матеріали на основі гіпсу володіють здатністю дихати, тобто поглинати надлишкову вологу і виділяти її в навколишнє середовище при її нестачі.

Гіпс – це негорючий, вогнестійкий матеріал, який не містить токсичних компонентів. Має кислотність, аналогічну кислотності людської шкіри [96, 108]. Його виробництво і використання не робить шкідливого впливу на навколишнє середовище. Таким чином, при використанні гіпсу забезпечується екологічна чистота, сприятливий для людини мікроклімат в приміщенні.

Гіпс можна нагріти до $t\ 600\text{--}700\text{ }^\circ\text{C}$ без його руйнування. Вогнестійкість виробів з гіпсу достатньо висока. Його руйнування відбувається лише через шість – вісім годин після дії високих температур [108–112].

Також відомо, що вермікулітовмістні матеріали мають унікальні вогнезахисні властивості в силу притаманної їм низької теплопровідності і високої деформативності.

Для визначення категорії будівель, в яких можна використовувати розроблені матеріали, в роботі були проведені розрахунки вогнестійкості для виготовлених гіпсовермікулітобетонних блоків за методикою А.Ф. Мілованова Для розрахунку використовувалися наступні дані:

- товщина матеріалу – $h = 0,075\text{ м}$;
- щільність блоків – $\rho_b = 760\text{ кг/м}^3$;

- вологість бетону – $W_b = 1,5 \%$;
- вид бетону – теплоізоляційно-конструкційний гіпсовермікулітобетон;
- початкова температура – $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура на поверхні, яка не обігривається (по другому граничному стану вогнестійкості згідно з ДБН Б В.1.1-4-98: $t_{h,n} = 140 + t_0 \text{ }^\circ\text{C}$);
- середня температура для визначення теплотехнічних коефіцієнтів бетону – $t_m = 450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для оцінки коефіцієнта теплопровідності використовували формулу

$$\begin{aligned} \lambda_t &= A + B \cdot t = \\ &= 0,16 - 0,00006 \cdot 450 = 0,133 \text{ ккал/м. г. град} \end{aligned} \quad (4.1)$$

де коефіцієнти A і B приймаються за табл. 4.2 при середній температурі нагріву $t = 450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Далі була розрахована питома теплоємність бетонних блоків при заданій температурі нагріву:

$$\begin{aligned} C_t &= C + D \cdot t = \\ &= 0,13 + 0,00009 \cdot 450 = 0,17 \text{ ккал/кг. град} \end{aligned} \quad (4.2)$$

де коефіцієнти C і D приймаються по табл. 4.2 згідно матеріалу з якого виготовлена конструкція.

Щільність гіпсобетонних блоків склала в сухому стані:

$$\begin{aligned} P &= 100 \cdot P_b / (100 + W_b) = \\ &= 80000 / 101,5 = 788,17 \text{ кг/м}^3. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Приведений коефіцієнт температуропровідності:

$$\begin{aligned} \text{ared} &= \lambda_t / (C_t + 0,012 \cdot W_b) \cdot P = \\ &= 0,133 / (0,17 + 0,012 \cdot 1,5) \cdot 788,17 = 0,00921. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Вибираємо коефіцієнт обліку впливу щільності використовуваного матеріалу по табл. 4.18 по інтерполяції.

Теплотехнічні характеристики бетонів

№ з/п	Вид бетону	ρ_{dr} , кг/м ³	$\lambda_t = A + B \cdot t$, ккал/(м·Г·°С)	$C_t = C + D \cdot t$
1	На вапняковому щебені	2250	$\lambda_t = 0,98 - 0,00047t$	$C_t = 0,17 + 0,0002t$
2	Керамзитобетон	1380	$\lambda_t = 0,33 + 0,00007t$	$C_t = 0,2 + 0,000114t$
3	Гіпсовермикуліт обетон	760	$\lambda_t = 0,22 + 0,000064t$	$C_t = 0,13 + 0,00009t$
4	Газобетон	1100	$\lambda_t = 0,27$ (const)	$C_t = 0,22 + 0,00015t$
5	Перегородки і стіни з цегли керамічної	1800	$\lambda_t = 0,65 - 0,0003t$	$C_t = 0,21 + 0,0001t$
6	Перегородки і стіни з цегли силікатної	1900	$\lambda_t = 0,73 - 0,0003t$	$C_t = 0,2 + 0,0001t$

Далі освічуємо коефіцієнти щільності бетону (табл. 4.19.)

Коефіцієнт щільності бетону

Коефіцієнт щільності бетону, K, r1/2	Щільність бетону, кг/м ³
0,53	800
0,55	1000
0,58	1500
0,60	2000
0,62	2300
0,65	2450

Таким чином, коефіцієнт теплообміну на поверхні, що обігривається складатиме

$$\alpha_1 = \frac{\lambda_t}{K} \cdot \sqrt{\alpha_{red}} = \frac{0,133}{0,53} \cdot \sqrt{0,00921} = 2,66 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{С.} \quad (4.5)$$

Далі розраховуємо коефіцієнт теплообміну на поверхні, що не обігривається, відповідно до рівняння (4.6)

$$\begin{aligned}\alpha^2 &= 5,5 + 0,045 \cdot th, u = \\ &= 5,5 + 0,045 \cdot 160 = 12,7 \text{ ккал}/(\text{мгод} \cdot ^\circ\text{C})\end{aligned}\quad (4.6)$$

застосовуємо коефіцієнт Біо, який розраховують для поверхні, що обігривається:

– критерій Біо для поверхні, що обігривається:

$$Bi_1 = (\alpha_1 \cdot h) / (\lambda_t) = (2,66 \cdot 0,1) / 0,133 = 2 \quad (4.7)$$

– те саме для поверхні, що обігривається:

$$Bi_2 = \frac{F_0 \cdot h_2}{\alpha_{red}} = 9,54. \quad (4.8)$$

Відношення коефіцієнтів Біо:

Потрібно, щоб це співвідношення не перевищувало 10, в нашому випадку отриманий результат $0,209 < 10$, тобто ця умова виконується

$$Bi_1 / Bi_2 = 0,209. \quad (4.9)$$

Знаходимо додатковий комплексний параметр:

$$N = \frac{Bi_1 + Bi_2}{Bi_1 + Bi_2 + Bi_1 \cdot Bi_2} = 0,37. \quad (4.10)$$

Знаходимо безрозмірну відносну температуру:

$$\theta = \frac{t_{h,u} - t_0}{(1250 - t_0) \cdot N} = \frac{160 - 20}{(1250 - 20) \cdot 0,22} = 0,51. \quad (4.11)$$

Визначаємо комплекс Фур'є K_F по номограмі, з інтерполяцією, при знайдених вище параметрах $\theta = 0,51$; $Bi_1 = 2$:

$$K_F = 2.$$

Розраховуємо критерій Фур'є F_0 :

$$F_0 = \frac{K_F}{Bi_2^1} = 0,5. \quad (4.12)$$

Кордон вогнестійкості матеріалу по втраті теплоізолювальної спроможності – по наскрізному прогріву тильної грані при $t = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ визначається за формулою:

$$\tau_u = \frac{F_0 \cdot h^2}{\alpha_{red}} = 0,55. \quad (4.13)$$

Для того щоб оцінити в яких конструкціях ми можемо вико рис-товувати отриманий матеріал ми розглядаємо кордону вогнестійкості згідно ДБН В.2.2-15-2005.

Нормативна межа вогнестійкості самонесучого матеріалу для стін і перегородок є 150, 45 і 60 хв. Класифікація протипожежних перешкод для конструкцій будівлі показані в табл. 4.20.

Таблиця 4.20

Класифікація протипожежних перешкод для конструкцій будівлі

Протипожежні перешкоди	Тип протипожежних перешкод	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди в хв
Стіни	1	REI 150
	2	REI 60
	3	REI45
Перегородки	1	EI 45
	2	EI 15
Перекриття	1	REI 150
	2	REI 60
	3	REI 45
	4	REI 15

У табл. 4.21 наведені мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (в хв) для будівель різного ступеня вогнестійкості [97].

Таблиця 4.21

Межі вогнестійкості будівельних конструкцій в хвилинах
для різного ступеня вогнестійкості будівель

Ступінь вогнестійкості будівель	Вид стіни		
	самонесучі	Зовнішні ненесучі	Внутрішні ненесучі (перегородки)
I	REI 90 M0	E 30 хв	EI 30 M0
II	REI 60 M0	E 15 хв	EI 15 M0
III	REI 60 M0	E15 M0 E30 M1	EI 15 M1
IIIa	REI 30 M0	E 15 M0	EI 15 M1
IIIб	REI 30 M1	E 15 M0 E 30 M1	EI 15 M1
IV	REI 15 M1	E 15 M1	EI 15 M1
Iva	REI 15 M1	E 15 M2	EI 15 M1
V	Не нормуються		

Для підтвердження розрахунку необхідно дотримуватися умови відношення розрахункової і нормативної меж вогнестійкості

$$\tau_u \geq \tau_{u,n}. \quad (4.14)$$

Умова дотримується:

$$\tau_u = 55 \text{ хв} > 45 \text{ хв}. \quad (4.15)$$

Таким чином, отриманий гіпсовермикулітобетон може використовуватися в будівлях з різним ступенем вогнестійкості. Види будинків за рівнем вогнестійкості в яких може бути використаний вермикулітобетон, показані в табл. 4.22 .

На підставі отриманих даних гіпсовермикулітобетон може бути застосований в будівлях з усіма ступенями вогнестійкості, а також в якості несучих настилів і утеплювачів [97, 105–111].

Таблиця 4.22

Види споруд за рівнем вогнестійкості з використанням
вермікулітобетону

Ступінь вогнестійкості	Конструктивні характеристики
I, II	Споруди з несучими та огорожувальними конструкціями з штучних або природних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням плитних і листових негорючих матеріалів.
III	Споруди з несучими та огорожувальними конструкціями з штучних або природних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції захищені штукатуркою або негорючими листовими плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1, Г2. До елементів покриттів не висовуються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття повинні мати вогнезахисну обробку.
IIIa	Споруди переважно з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса з металевих незахищених конструкцій. Огороджувальні конструкції з металевих листів або інших негорючих листових матеріалів з негорючим утеплювачем груп горючості Г1, Г2.
IV	Споруди з несучими та огорожувальними конструкціями з деревини або інших матеріалів груп горючості Г2-Г4, захищених від дії вогню та високих температур штукатуркою або іншими листовими, плитними матеріалами.
IVa	Споуди переважно одноповерхові з каркасною конструктивною схемою. Елементи каркаса - з металевих незахищених конструкцій. Огороджувальні конструкції - з металевих профільованих листів або інших негорючих матеріалів з утеплювачем груп горючості Г3, Г4.
V	Споруди, до несучих і огорожувальних конструкцій яких не висовуються вимоги щодо межі вогнестійкості та межі поширення вогню.

Результати проведених експериментів [97–111] дозволили розробити технологію отримання ГВБ на ТВП, схема якої приведена на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Технологічна схема отримання ГВБ на ТВП.

Згідно представленої на рис. 4.2. технологічної схеми отримання ГВ на ТВП нижче наведені такі коментарі. Виділяють зерна вермикуліту розміром 5–8 мм.

1. Підготовка і отримання низьковипального вермикуліту:

На окремому посту технологічної лінії готується 1М розчин KNO_3 для обробки їм концентрату протягом 1 доби при температурі 20 ± 2 °С. Сушка проводиться при 25 °С в бункері накопичувачі з вентиляцією теплим повітрям. Порційна подача вермикуліту в піч регулюється дозатором. Порція повинна становити не більше 30% обсягу печі. Матеріал подається в піч, розігріту до 400 °С.

Час випалу встановлюється з урахуванням робочого простору печі. Критерієм можуть служити результати експрес-аналізу при оцінці ступеня спучування вермикуліту. Вивантаження через відкритий люк на піддон здійснюється механічним перекиданням печі. Охолодження здійснюється безпосередньо на піддонах при природній

циркуляції повітря з температурою 20 ± 2 °С протягом 2 годин . Підготовка тонкодисперсного вермікулітового порошку проводиться шляхом просіювання використовуваного вермікуліту крізь набір сит і додаткового подрібнення в кульовому млині ЛБ-2 до фракції 0,01 мм.

2. Поготовка гіпсового в'язучого у відповідному співвідношенні з водою, додавання ТВП і рівномірне розмішування.

3. Завантаження підготовленої суміші в форми розміром $10 \times 30 \times 50$ см та $20 \times 30 \times 50$ см.

4. Сушка в критих приміщеннях при температурі 20 °С не менше 2 діб.

5. Вивантаження з форм.

6. Складування на палети для подальшого транспортування.

Результати приймальних випробувань.

В результаті випробувань блоків з розмірами $10 \times 30 \times 50$ см та $20 \times 30 \times 50$ см були отримані такі характеристики:

Міцність на стиск:	4,0–4,4;
Щільність у сухому стані:	600–760 ;
Теплопровідність:	0,12 – 0,20;
Морозостійкість не менше	35.

Згідно з ДСТУ Б В.2.7-18-95 Бетони легкі, виготовлені блоки відносяться до теплоізоляційних та конструкційно-теплоізоляційних легких бетонів. Дані зразки бетонних блоків відповідають класу по міцності В-1–В-2,5, що характеризується маркою по міцності М15–М35. Марка за середньою густиною D600–D700. Техніко-економічні показники. Як приклад взята горизонтальна довгоканальна трубчаста прямоточна піч з осаджувальним циклоном конструкції УралНІІ-Стромпроекта. Вихідні дані були взяті з довідкової літератури.

Параметри печі:

– довжина з циклоном, м	8,5;
– внутрішній діаметр, м	0,2;
– зовнішній діаметр, м	0,6;
– вага печі, кг	2700;

витрата палива при сухій сировині:

– солярка, кг/г	32–44;
– газ природний, м ³ /г	39–51;
– витрати повітря (5–6 атм), м ³ /г	300;
– температура в печі, °С	800–1000;

- температура газів, що відходять, °С 600–700;
- продуктивність по спученому продукту, кг/г 300;
- об'ємна вага продукту, кг/м³ 95–120.

Енерговитрати на попередню сушку матеріалу розраховували для сушильного барабана при витраті $\xi = 3800$ кДж на 1 кг випарюваної води.

Витрати тепла на отримання 0,3 т/г спученого вермикуліту при 900 °С:

1. Сушка 354 кг (54 кг води при 18 % вологості вихідної сировини):

$$Q_1 = m \cdot \xi, \quad (4.16)$$

де m – кількість випаруваної води

$$Q_1 = 54 \text{ кг} \cdot 3800 \text{ кДж/кг} = 205200 \text{ кДж.}$$

2. Нагрівання сухого матеріалу $m = 300$ кг на 900 °С:

$$Q_2 = c_1 \cdot m \cdot \Delta t, \quad (4.17)$$

де c_1 – питома теплоємність сухого вермикуліту

$$Q_2 = 300 \text{ кг} \cdot 1,05 \text{ кДж/кг} \cdot 900 \text{ °С} = 283500 \text{ кДж.}$$

3. Втрати з повітрям, що відходить (300 м³/г або 387 кг/г) при температурі 900 °С:

$$Q_3 = c_2 \cdot m \cdot \Delta t, \quad (4.18)$$

де c_2 – питома теплоємність повітря

$$Q_3 = 387 \text{ кг} \cdot 1,3 \text{ кДж/кг} \cdot 800 \text{ °С} = 402489 \text{ кДж.}$$

4. Втрати через корпус теплового агрегату ($S = 40$ м², середня різниця між температурою корпусу і повітря на відстані 1,5 м = 45 °С):

$$Q_4 = \lambda \cdot s \cdot \Delta t, \quad (4.19)$$

де λ – кількості випромінюваного тепла з 1 м² поверхні печі при нагріванні на 1 °С;

s – площа поверхні, м².

$$Q_4 = 15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С} \cdot 40 \text{ м}^2 \cdot 45 \text{ °С} \cdot 3600 \text{ с} = 97200 \text{ кДж.}$$

5. Витрати на дегідратацію кристалізаційної води і спучування ($Q_{\text{хім}}$): дані витрати не розраховувалися, тому що при різних

режимах отримання спученого вермикуліту вони сумірні (дані термографії).

6. Загальні витрати:

$$Q_{1\text{заг}} = (205200 + 283500 + 402489 + 97200 + Q_{\text{хім}})\text{кДж} = \\ = (988389 + Q_{\text{хім}})\text{кДж}.$$

Витрати тепла на отримання спученого вермикуліту при 400 °С:

1. Сушка 390 кг (90 кг води при 30 % вологості хімообробленої сировини):

$$90 \text{ кг} \cdot 3800 \text{ кДж/кг} = 342000 \text{ кДж}.$$

2. Нагрівання сухого матеріалу (300 кг) на 400 °С:

$$300 \text{ кг} \cdot 1,05 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 400 ^\circ\text{C} = 126000 \text{ кДж}.$$

3. Втрати з повітрям, що відходить (300 м³/г або 387 кг) при температурі 300 °С:

$$387\text{кг} \cdot 1,3 \text{ кДж/кг} \cdot ^\circ\text{C} \cdot 300 ^\circ\text{C} = 150930 \text{ кДж}.$$

4. Втрати через корпус теплового агрегату ($S = 40 \text{ м}^2$, середня різниця між температурою корпусу і повітрям = 20 °С):

$$15 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot 40 \text{ м}^2 \cdot 20 ^\circ\text{C} \cdot 3600 \text{ с} = 43200 \text{ кДж}.$$

5. $Q_{\text{хім}}$ як і раніше не розраховувалося.

6. Загальні витрати склали:

$$Q_{2\text{заг}} = (342000 + 126000 + 150930 + 43200 + Q_{\text{хім}})\text{кДж} = \\ = (662130 + Q_{\text{хім}})\text{кДж}.$$

Енергозбереження становить різницю між [101–103]

$$Q_{1\text{заг}} \text{ і } Q_{2\text{заг}} + 326259 \text{ кДж}.$$

Економічний ефект в собівартості низьковипального вермикуліту прямопропорційний економії витраченої енергії і становить 33%.

Переваги і практичне значення гіпсовермікулітобетону

Показник / характеристика	Результат досліджень	Рівень відповідності / перевага	Практичне значення
Міцність	Відповідає вимогам до теплоізоляційно-конструктивних бетонів	Середній рівень (достатній для ненесучих конструкцій)	Можливість використання у вигляді панелей, перегородок, блоків
Теплопровідність	Нижча, ніж у більшості традиційних теплоізоляційних бетонів	Висока перевага	Забезпечення енергоефективності будівель
Вогнестійкість	Відповідає нормам; підтверджена можливість використання як вогнезахисних бар'єрів	Суттєва перевага	Підвищення пожежної безпеки споруд
Маса виробів	Зменшена за рахунок використання низьковипального вермікуліту	Перевага у 20–30% порівняно з аналогами	Спрощення транспортування та монтажу, зниження навантаження на фундамент
Екологічність	Виробництво менш енергоємне, з мінімальними викидами	Перевага	Відповідність вимогам сталого будівництва
Економічність	Собівартість нижча, ніж у аналогів, за рахунок використання низьковипального вермікуліту	Висока перевага	Конкурентоспроможність на ринку будматеріалів
Довговічність	Висока стійкість до біологічних та атмосферних впливів	Відповідає вимогам	Забезпечення надійності та тривалого терміну служби

Висновки за розділом

Проведені дослідження підтвердили ефективність гіпсовермікулітобетону (ГВБ) на основі тонкодисперсних вермікулітових продуктів як перспективного теплоізоляційно-конструктивного матеріалу з підвищеними експлуатаційними властивостями.

1. Комплекс фізико-технічних показників ГВБ свідчить про його належність до сучасних композиційних матеріалів, що поєднують малу густина, хороші теплофізичні характеристики та стабільність структури.

2. Експериментально встановлена висока вогнестійкість і негорючість матеріалу. ГВБ не підтримує горіння, не утворює токсичних продуктів і зберігає цілісність при тривалому нагріванні, що дозволяє застосовувати його у вогнезахисних та протипожежних конструкціях.

3. Низька теплопровідність підтверджує теплоізоляційну ефективність матеріалу. Комбінація пористої структури та невеликої щільності забезпечує зменшення тепловтрат і підвищує енергоефективність огорожувальних конструкцій.

4. Матеріал відзначається довговічністю та стійкістю до зовнішніх впливів. Мінеральна природа компонентів забезпечує його нечутливість до гниття, біологічного ураження та дії помірно агресивних середовищ.

5. Виробництво ГВБ є економічно та екологічно доцільним. Доступність сировини, невисока енергоємність процесу та можливість використання техногенних відходів знижують собівартість і екологічний слід матеріалу.

6. Практичні сфери застосування ГВБ є широкими. Матеріал може бути використаний у не несучих стінових конструкціях, перегородках, тришарових панелях, теплоізоляційних блоках та протипожежних елементах.

ВИСНОВКИ

У монографії представлено комплексні результати наукових і прикладних досліджень, спрямованих на вдосконалення технологій, конструкцій і матеріалів для залізобетонних та бетонних споруд. Авторський колектив обґрунтував доцільність упровадження інноваційних рішень, що забезпечують підвищення ефективності, довговічності та надійності будівельних конструкцій при одночасному зменшенні матеріало- та енерговитрат.

Зокрема:

- розроблено нові технології улаштування полегшених монолітних конструкцій із застосуванням криволінійних арматурних каркасів та пустотоутворювачів, що відкриває широкі архітектурні й інженерні можливості;

- обґрунтовано методологію раціоналізації параметрів конструктивно-анізотропних оболонок, що дозволяє підвищити надійність та довговічність споруд при оптимізації витрат матеріалу;

- доведено перспективність застосування склопластикової арматури та конструкційних пластмас у будівництві для підвищення корозійної стійкості, зменшення маси виробів і забезпечення спеціальних експлуатаційних властивостей;

- підтверджено ефективність використання гіпсовермікулітобетону як теплоізоляційно-конструктивного матеріалу з високими вогнезахисними й енергозберігаючими характеристиками.

Узагальнюючи результати, можна стверджувати, що запропоновані авторами підходи мають значний науковий та практичний потенціал. Вони спрямовані на вирішення актуальних завдань сучасного будівництва: підвищення енергоефективності, зниження собівартості, забезпечення довговічності та надійності споруд, а також розширення можливостей архітектурно-конструктивних рішень.

Монографія становить вагомий внесок у розвиток будівельної науки та може слугувати основою для подальших досліджень і впроваджень у сфері проектування й зведення сучасних будівель і споруд.

ЛІТЕРАТУРА

1. David B. South and Freda Parker. The Monolithic Dome. The Monolithic Dome Institute, May 8, 2007. (available at <http://www.monolithic.com/plan-design/monolithicdome/index.html>).

2. Hurd M.K. Concrete Homes for Disaster Victims. Inflated forms bring shelter to rural landslide victims. Concrete international. 2009. Vol. 31. No. 6. Pp. 37-40.

3. Будівельна компанія Холстрой. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.holstroy.com.ua>. Дата звернення 16.11.2017.

4. Patent USA № 4170093. Method and apparatus for erecting substantially dome-like building structures / Mario Cappellini, Dario Zucchi. Опубл. 30.09.1979.

5. Patent USA № 4324074. Building structures and method of making same / David B. South, Barry South. Опубл. 13.04.1982.

6. Авторське свідоцтво СРСР № 1796760, кл. E04G11/04. Спосіб зведення стін куполоподібних будівель / Герливанов В.В. Опубл. 23.02.1993, Бюл. 7.

7. Патент України № 48589, кл. E04G11/04. Опалубка для зведення великопролітних куполів / Бєлов Д.В., Югов А.М. Опубл. 25.03.2010, Бюл. №6, 2010 р.

8. Patent USA № 20050210767. Trilithic and/or twin shell dome type structures and method making same / Michael DeFever, Ryan DeFever. Опубл. 29.09.2005.

9. Monolithic Technology. Portfolio. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.monolithic.com>. Дата звернення 06.03.2020.

10. Patent USA № 4094110. Building system and method / Luther I. Dickens, William C. Nanny. Опубл. 13.06.1978.

11. Patent USA № 4352260. Underground house and construction method / Leroy G. Pearcey, Dale A. Pearcey. Опубл. 05.10.1980.

12. Patent USA № 5305576. Method of constructing curvilinear structures / Brian C. Giles. Опубл. 07.05.1994.

13. V. Babaev, V. Shmukler, S. Bugayevskiy, V. Nikulin. Cast Reinforced Concrete Frame of Buildings and Methods of Its Erection. Journal of Civil Engineering and Construction. September, 2016. Vol. 5. Number 2. Pp. 143–156.

14. Bugayevskiy S. Basics of modeling and technology of creating reinforced concrete elements of «Monofant» system construction /

S. Bugayevskiy, V. Gerasymenko, A. Konyukhov, V. Nikulin // MATEC Web of Conferences. Material science, Engineering and Chemistry. Transbud-2017. Vol. 116, 02009 (2017).

15. Bugaevsky S. Reinforced concrete structures of a complex geometric shape / S. Bugaevsky, N. Smirnova, A. Filatova, E. Sinkovskaya, A. Ignatenko // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. Vol. 15, № 2, January 2020. Pp. 242–257.

16. Попельнюхов С.Н., Конаков Д.В., Магер А.Н. Нова технологія будівництва малоповерхових будівель для масового будівництва. Будівельні матеріали, обладнання, технології ХХІ века. 2011. № 11. С. 27-29.

17. Сайт Проєкт Mesh Mould Metal [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/316.html>. Дата звернення 06.03.2020.

18. Mesh Mould: Robotically Fabricated Metal Meshes as Concrete Formwork and Reinforcement. June 2015.

19. Сайт компанії Branch Technology. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.branch.technology/competition>. Дата звернення 05.03.2020.

20. Сайт компанії Emerging Objects. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.emergingobjects.com>. Дата звернення 06.03.2020.

21. Jozef Jasiczak, Wtodzimierz Majchrzak, Wtodzimierz Czajka. Construction of undulating walls using dry-mix shotcrete. Expansive concrete surface creates the main spatial element inside the Museum of the History of Polish Jews in Warsaw, Poland. Concrete international. 2015. V. 37. No. 6. Pp. 31-35.

22. Jason Flanagan. Acoustic Shells. Shotcrete. 2015. V. 17. No. 1. Winter Pp. 16-19.

23. Thomas Juul Andersen, Wilson Ricardo Leal da Silva, Lars Nyholm Thrane Lessons from the TailorCrete Project. Innovative industrial methods for future digital concrete architecture. Concrete international. 2016. V. 38. No. 3. Pp. 54-61.

24. Full-scale construction prototype of the NEST HiLo shell roof, 2017. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://block.arch.ethz.ch/rg/project/full-scale-construction-prototype-nest-hilo-shell-roof>. Дата звернення 24.07.2019.

25. Пат. 89464 Україна, МПК E04B 1/18. Каркасна будівля «Монофант» / Шмуклер В.С., Бабаєв В.М., Бугаєвський С.О., Бережна

К.В., Карякін І.А., Кондращенко В.І., Сеїрські І.М. №u201311919; заявл. 10.10.2013 ; опубл. 25.04.2014, Бюл. №8.

26. Сайт Universe Architecture. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.universearchitecture.com/landscapehouse/xoskt5thlwpeykzn3f9flv3ufew1il>. Дата звернення 24.10.2020.

27. Бабаєв В.М. Чисельні та експериментальні методи раціонального проєктування і зведення конструктивних систем : монографія / В.М. Бабаєв, С.О. Бугаєвський, С.М. Євель, І.Д. Євзеров, А.І. Лантух-Лященко, В.В. Шеветовський, О.В. Шимановський, В.С. Шмуклер. Київ : Видавництво Сталь, 2017. 404 с.

28. Шмуклер В.С., Бугаєвський С.О., Нікулін В.Б. Система «Монофант» для зведення монолітних залізобетонних каркасів. Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр. Харків : ХНАДУ, 2015. Вып. 71. С. 70–84.

29. Bugayevskiy S. Use Of Wet Concrete Spraying In Building Technology Of Reinforced-Concrete Fiber Slabs According To «Monofant» System. Автомобільний транспорт : зб. наук. пр. Харків : ХНАДУ, 2016. Вып. 38. С. 126–134.

30. Ємельянова І.А., Бугаєвський С.О. Устаткування для будівництва монолітних залізобетонних конструкцій системи «Монофант» способом торкретування. Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр. Харків : ХНАДУ, 2016. Вып. 72. С. 107–117.

31. Romashkina, V. Pisarevskij, O. Zhuravlov. Rozrahnok budivli na vpliv diyi povitryanoji udarnoji hvili pryamim dina-michnim metodom z vikoristannyam PK LI-RA-SAPR. // Zbirnik naukovih prac «Bu-divelni konstrukciyi. Teoriya i praktika». Golovnij redaktor O.D.Zhuravskij. K.:KNUBA, 2024. Vipusk 14. S.147-160.

32. DBN V.2.2-5:2023. Zahisni sporudi civilnogo zahistu – [Vvedenij u diyu z 01-11- 2023].– K.: Minregion Ukrayini, 2023. – 112 s.

33. U.S. Department of the Army, the Navy and Air Force. The Design of Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions-Technical Manual (TM 5-1300).

34. U.S. Department of the Army: Washington, DC, USA, 1990. U.S. Department of Defense (DOD). Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions (UFC 3-340-02); DOD: Washington, DC, USA, 2008.

35. Cormie, D.; Mays, G.; Smith, P.D. Blast Effects on Buildings, 2nd ed.; Thomas Telford: London, UK, 2009.

36. Perelmuter A. V. Zametki o prik-ladnoj nauke //Computational Civil and Structural Engineering. – 2013. – S. 23.

37. Perelmuter A.V., Slivker V.I. Rasche-tnye modeli sooruzhenij i vozmozhnost ih analiza (izdanie 4-e pererabotannoe i dopolnennoe).- Moskva: Izd-vo: SKAD SOFT, Izd-vo: DMK Press, Izd-vo: ASV, 2011, 736 s.

38. Gorodeckij A. S., Shmukler V. S., Bon-darev A. V.. Informacionnye tehnologii rascheta i proektirovaniya stroitelnyh konstrukcij. Harkov: NTU «HPI», 2003. 889 s.

39. Mandelbrot B. Fraktalnaya geome-triya prirody. M.: Institut kompyuter-nyh issledovanij, 2002. 856 s. 1. Aleksa-ndrovskij S.V. Raschet betonnyh i zhelezo-betonnyh konstrukcij na izmenenie tem-peratury i vlazhnosti s uchetom polzuches-ti / S.V. Aleksandrovskij - M. : Strojiz-dat, 1973. - 431s.

40. Bugaevskij S. A. Sposob vozvedeniya elementov zdaniy krivolin-ejnoj formy //Naukovij visnik budivnictva. – 2015. – №. 2. – S. 116-126.

41. Gaponova, L.V. Ocenka ognestojkosti konstruktivno-anizotrop-noj zhelezobe-tonnoj plity / L.V. Gaponova, P.A. Rez-nik, S.S. Grebenchuk // Mizhvidomch. nauk.-tehn. zb. (tehnicni nauki) «Budivelne vi-robnictvo». – Kiyiv, 2017. – № 62/1. – S. 57-63.

42. Gaponova, L.V. Eksperimentalno-teoretichne doslidzhennya napruzhenodefo-rmovanogo stanu sferichnoyi obolonki pok-rittya /L.V. Gaponova, O.O. Kalmikov, S.S. Grebenchuk // Zb. nauk. prac Ukrayin-skogo derzhavnogo universitetu zaliznichnogo transportu. – Harkiv: UkrDAZT, 2015. – Vip. 157. – S. 102-113.

43. Gaponova L.V. Stress and strain behavior of reinforced concrete anisotropic shell / L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk // Academic Journal. Series: Industrial machine building, Civil Engineering / Poltava National Tech-nical Yuri Kondratyuk University – 1(48)` 2017. – C.108-120.

44. Ansys simulation software enables organizations to confidently predict how their products will operate in the real world / Ansys, Inc. www.ansys.com.

45. Oleg Kalmykov. Use of information technologies for energetic portrait construction of cylindrical reinforced concrete shells / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik* and Sergey Grebenchuk // 6th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017” (Transbud-2017) 10 July 2017.

46. Шмуклер В.С. Дослідження роботи пологих залізобетонних оболонок. [Текст] дисс. канд. техн. наук / Шмуклер В.С. – Київ. 1977. – 188 с.

47. Babaev, V. N. Analysis of Stress-Strain State of Spherical Roof Shell / V.N. Babaev, V.S. Shmukler, S.H. Feirushah, L.V. Gaponova, S.S. Grebenchuk, O.A. Kalmikov // 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016; April 12-14, 2016. – Kurdistan: Salahaddin University-Erbil, 2016. – Iraq. p. 42-49.

48. Oleg Kalmykov. Study of fire-resistance of reinforced concrete slab of a new type / Oleg Kalmykov, Ludmila Gaponova, Petro Reznik and Sergey Grebenchuk // 6 th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017” (Transbud-2017) 10 July 2017.

49. Haponova L. Information modeling in the rationalization of the parameters of iron concrete construction anisotropic shell / Haponova L., Hrebenchuk S. // Sustainable housing and human settlement: Monograph / Under the general editorship Savytskyi M. – Dnipro – Bratislava: SHEE «Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture» - Slovak University of Technology in Bratislava, 2018. – C.188-199.

50. Features of modeling of energy profile of construction (Conference Paper // Gaponova, L., Grebenchuk, S., Psurtseva, N., Kalmykov, O., Demyanenko, I. / volume 230, 16 November 2018, № 02009. 7-th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings", Transbud 2018; Kharkiv; Ukraine; 14-16 November 2018.

51. Walter Bläsi. Bauphysik. 2016. 454 p. <https://www.amazon.de/Bauphysik-Walter-Bl%C3%A4si/dp/3808542756>

52. Statistical Physics: Volume 5. 3rd Edition, 2013. L.D. Landau, E.M. Lifshitz. Elsevier. ISBN 978-0080570464.

53. Lectures on Landau Theory of Phase Transitions Department of Physics, Georgetown University Peter D Olmsted July 9, 2015. https://site.physics.georgetown.edu/~pdo7/ps_files/landau.pdf

54. Мироненко М.І. Інтегральні перетворення в теорії пружності. – Харків: РЦНІТ, 2003. – 439 с.

55. Zhenhai Guo, Xudong Shi. Experiment and Calculation of Reinforced Concrete at Elevated Temperatures / Hardbound : Elsevier. 2011. 336 p.

56. Гільчук А.В., Халатов А.А., Доник Т.В. Теорія теплопровідності. Навчальний посібник. К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 153 с.

57. Гапонова, Л. В. Компютерне моделювання анізотропних оболонки у ПК «Autodesk Inventor» / Л. В. Гапонова, О. В. Архіпов, А. В. Сумінов // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету : зб. наук. пр. / М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т ; редкол.: А. Г. Батракова (гол. ред.) та ін. – Харків, 2025.–Вип.108.–С.218-223. <https://dspace.khadi.kharkov.ua/handle/123456789/25126>

58. Chen, S.-c. Ren, A.-z. Lu, X.-z. Numerical analysis and simulation of space concrete frames under fire / Journal of Natural Disasters. 2007. P. 88-92.

59. Jie Zhao. A meso-level investigation into the explosive spalling mechanism of high-performance concrete under fire exposure / Jie Zhao, Jian-jun Zheng, Gai-fei Peng, Klaas van Breugel // Original Research Article Cement and Concrete Research. November 2014. Vol. 65. P. 64-75.

60. Hedayati M. and others. Spalling of concrete structural walls exposed to fire / Mechanics of Structures and Materials: Advancements and Challenges. CRC Press, 2016. P. 971-976.

61. G. Xotta, G. Mazzucco, V. A. Salomoni, C. E. Majorana, and K. J. Willam. Composite behavior of concrete materials under high temperatures / International Journal of Solids and Structures. 2015. Vol. 64. P. 86-99.

62. Гапонова Л.В., Резник П.А. Дослідження вогнестійкості залізобетонної плити нового типу. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017. № 4. С.7-14.

63. Практичний розрахунок елементів залізобетонних конструкцій за ДБН В. 2.6-98:2009 у порівнянні з розрахунками за СніП 2.03.01-84* і EN 1992-1-1 (Eurocode 2) / [В. М. Бабаєв, А. М. Бамбура, О. М. Пустовойтова та ін.] ; за ред. В. С. Шмуклера. – Харків : Золоті сторінки, 2015. – 208 с.

64. Сучасні тенденції архітектурного формотворення багатофункціональних громадських комплексів / В. С. Шмуклер, О. М. Дудка // Містобудування та територіальне планування : наук.-техн. зб. / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт. – Київ : КНУБА, 2017. – Вип. 63. – С. 515–521.

65. Babaev V., Shmukler V., Bugayevskiy S., Nikulin V. Cast Reinforced Concrete Frame of Buildings and Methods of Its Erection // Journal of Civil Engineering and Construction, Vol. 5, N. 2, September 2016. P. 143–156.

66. Bugayevskiy S., Gerasymenko V, Konyukhov A. and Nikulin V. Basics of modeling and technology of creating reinforced concrete elements of “Monofant” system construction // MATEC Web of Conferences. Material science, Engineering and Chemistry, v. 116, 02009 (2017). Transbud-2017.

66. Бабаєв В. М., Бугаєвський С. О., Євель С. М., Євзеров І. Д., Лантух-Лященко А. І., Шеветовський В. В., Шимановський О. В., Шмуклер В. С. Чисельні та експериментальні методи раціонального проектування і зведення конструктивних систем: монографія. К. : Сталь, 2017. 450 с.

67. Лавренюк М. Моделі механіки деформівного твердого тіла неоднорідних середовищ.: Навчальний посібник. К.: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2012. 86 с.

68. Основи лінійної теорії пружності, пластичності та повзучості: Навч. посібник / Е.Д. Чихладзе, М.А. Веревічева, Є.І. Галагурия та ін. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – 149 с.

69. ДСТУ Б В.2.6-156:2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. К.: Мінрегіонбуд України, 2011 118 с.

70. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design / European committee for standardization. 2004. 97 p.

71. Сайт «Ansys» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.ansys.com>. (дата звернення 10.02.2017).

72. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Стрелецкий Е.Б. и др. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс «Лира-Windows». К. : Факт, 1997. 137 с.

73. Шмуклер В.С. Каркасні системи полегшеного типу/В.С. Шмуклер, Ю.А. Клімов, Н.П. Бурак. Харків: Золоті сторінки, 2008. 336 с.

74. Avdeeva, A., Shlykova, I., Antonova, M., Barabanschikov, Y., Belyaeva, S. Reinforcement of concrete structures by fiberglass rods (2016) MATEC Web of Conferences, 53, art. no. 01006. <http://www.matec-conferences.org/> doi: 10.1051/matecconf/20165301006

75. Trykoz, L.V., Kamchatnaya, S.M., Pustovoitova, O.M., Atynian, A.O. The investigation of prestressed pressure pipes, reinforced with fiberglass plastic / International Journal of Engineering Research in Africa, 2018, 36, <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85048021864&origin=resultlist>

76. Trykoz, L., Pustovoitova, O., Kamchatnaya, S., Semenova-Kulich, V. Fiberglass coating of railway culvert pipes // International Scientific Conference on Transport Means / Kaunas 30 September 2020 Kauno Technologijos Universitetas, pp. 442–445 <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57190687096>

77. Колесников А.В., Семенова С.В., Вировой В.М., Олійник Т.П. Будівельні композити як об'єкти системного аналізу. Сучасне будівництво та архітектура: збірник наукових праць. 2023. № 3. с. 41-49 <http://visnyk-odaba.org.ua/2023-03/3-5.pdf>

78. Maranan, G.B., Manalo, A.C., Benmokrane, B., Karunasena, W., Mendis, P. Behavior of concentrically loaded geopolymer-concrete circular columns reinforced longitudinally and transversely with GFRP bars (2016) *Engineering Structures*, 117, pp. 422-436. <http://www.journals.elsevier.com/engineering-structures/>

79. Hegemier, G., Stewart, L. Application of fiber-reinforced polymers to reinforced concrete bridges (2016) *Innovative Bridge Design Handbook: Construction, Rehabilitation and Maintenance*, pp. 777-794. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128000588/>

80. Petro, S.H., Kemp, E.L., Gangarao, H.V.S. Saving covered bridges with glass-fiber-reinforced polymers (2004) *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*, 35 (4), pp. 27-34. <http://dx.doi.org/10.2307/4126417>

81. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Аксьонов С. Ю., Делі О. В. Застосування огороження склопластикового композитного перильного. *Дороги і мости*. 2021. Вип. 23. С. 214–224.

82. Хімічні процеси в будівельній галузі : [навч. посіб.] / Т. М. Туник, О. В. Медведєва, В. М. Кропівний, Т. Є. Кирнасовська. – Кропивницький: ЦНТУ, 2020. – 59 с. <https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/10764>

83. Nigro, E., Cefarelli, G., Bilotta, A., Manfredi, G., Cosenza, E. Fire resistance of concrete slabs reinforced with FRP bars. // Part II: Experimental results and numerical simulations on the thermal field. *Composites Part B: Engineering*, 42 (6), 2011, 1751–1763. [doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.02.026](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.02.026).

84. Schmidt-Döhl, F., Rostásy, F.S. A model for the calculation of combined chemical reactions and transport processes and its application to the corrosion of mineral-building materials. // *Cem. Concr. Res.* 29, 1039–1045 (2016) [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00087-3).

85. Teng J.G, Chen J.F. Behaviour and strength of FRP-strengthened RC structures: a state-of-the-art review // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings DOI:10.1680/ stbu.2003.156.1.51.

86. Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Nakano, K., and Asato, Y. Structural performance of beam -2elements with PVA-ECC. // Proc., High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3 (HPFRCC 3), H. W. Reinhardt and A. E. Naaman, eds., RILEM Publications S.A.R.L., Cachan, 2011 France, 531–542.

87. Shui Liu, Xin Wang, Yulin Zhou, Yahia M. S.Ali, Jian Ding, Zhishen Wu. Experimental and Numerical Study of Concrete Columns Reinforced with BFRP and Steel Bars under Eccentric Loading // Journal of Composites for Construction Volume 29, Issue 2 Jan 28, 2025. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/JCCOF2.CCENG-4849>.

88. Ruitian Xu . Zongping Chena, Fan Ning. Axial compression mechanism and numerical analysis of CFRP-PVC tube and I-shaped steel composite confined concrete column // Construction and Building Materials, Vol. 461, 31 January 2025, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061825000789>.

89. Chen Chena, Hai Fanga, Yun Mook Limb, Honglei Xiec, Jiye Chend, Ji Woon Park. Experimental and numerical studies on compressive behavior of winding FRP grid spiral stirrups confined circular concrete columns // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Volume 191, April 2025, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359835X2500003X>.

90. Mostafa Habibpour, Jafar Asgari Marnani, Abolfazl Arabzade, Abbas Ghasemi Experimental and numerical investigation of RC column strengthening by FRPs with different numbers of layer and elongation under eccentric loading. // Structural Engineering and Mechanics Volume 93, Number 2, January 25, 2025, pages 135-145.

<https://www.technopress.org/content/?page=article&journal=sem&volume=93&num=2&ordernum=5>.

91. Masoumeh Tavakol, Hassan Haji Kazemi. Comparative assessment of concrete columns reinforced with hybrid steel-GFRP, GFRP, and steel bars under cyclic lateral loading // Structures Vol. 71, January 2025, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235201242402188X>.

92. Omar Alajarmeha, Allan Manalao, Brahim Benmokraneb, Wahid Ferdousa, Ali Mohammeda, Rajab Abousninaa, Mohamed Elchalakanic, Azam Edood. Behavior of circular concrete columns reinforced with hollow

composite sections and GFRP bars // Marine Structures Volume 72, July 2020
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951833920300794>.

93. L.V. Trykoz, S.M. Kamchatnaya, O.M. Pustovoitova, A.O. Atynian. The Investigation of Prestressed Pressure Pipes Reinforced with Fiberglass // Plastic International Journal of Engineering Research in Africa ISSN No: 0976-3031, June 2018 - Vol. 36 - pp 1-11.

94. L.V. Trykoz, S.M. Kamchatnaya, O.M. Pustovoitova, A.. Atynian. Reinforcement of composite pipelines for multipurpose transportation // IX International Scientific Conference Vi International Symposium of young researchers. Transport problems - Silesia university of technology faculty of transport. – 2018 - p 69-81.

95. Атинян А.О., Кондращенко О.В. Два підходи до моделювання процесів ротаційного ущільнення бетонних сумішей. Ефективні технологічні рішення у будівництві з використанням бетонів нового покоління: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2015. – С. 34-39.

96. Атинян А.О., Буханова К.С., Баранова А.А. Енергозбереження при використанні теплоізоляційних стінових матеріалів на основі гіпсових виробів. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. – Луцьк, 2016. – Вип. 5. – С. 345-350.

97. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги: ДБН В.1.1-7:2016 [чинний від 2017-06-01]. Мінрегіонбуд України, 2017. 35 с.

98. Атинян А.О., Trykoz L., Kamchatnaya S., Pustovoitova O. Reinforcement of composite pipelines for multipurpose transportation. Transport Problems. – 2018. – Vol. 13, Issue 1. – P. 69-81.

99. Атинян А.О., Якименко О.В., Кондращенко О.В. Бетонні роботи. Харків: ХНУМГ, 2018. – 276 с.

100. Атинян А.О., Bukhanova K., Tkachenko R., Romashko O. Evaluation of vermiculite raw materials for the production of lightweight aggregates. Monograph. – Chicago, USA, 2019. – Vol. 2. – P. 309-317.

101. Атинян А.О., Bukhanova K., Tkachenko R., Manuilenko V. Energy Efficient Building Materials with Vermiculite Filler. International Journal of Engineering Research in Africa. Trans Tech Publications Ltd. – 2019. – Vol. 43. – P. 20-24.

102. Атинян А.О., Буханова К.С., Трикоз Л.В., Камчатна С.М. Дослідження впливу тонкодисперсного вермикулітового порошку на

структуру гіпсового в'язучого методом електронної мікроскопії. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. – Харків, 2020. – С. 6-15.

103. Атинян А.О., Trykoz L., Pustovoitova O., Saiapin O. Effective waterproofing of railway culvert pipes. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*. – 2019. – 14(4). – P. 473-483

104. Bhayat, M.T., Babafemi, A.J., & De Villiers, W. (2025). Development and assessment of fly ash and metakaolin blended geopolymer concrete incorporating expanded vermiculite for masonry units. *Discover Sustainability*, 6, 704.

105. Ganasen, N., Bahrami, A., & Loganathan, K. (2023). Experimental investigation and optimization of lightweight concrete bricks developed using vermiculite. *Frontiers in Materials*, 10, 1117138.

106. Xu, Y. (2024). Mortar with natural light-weight expanded vermiculite aggregate: A review. *Journal of Building Engineering*, 41, 102379.

107. Dora, S., & Saha, S.K. (2023). A novel thermal storage high-performance building material: Study on foam concrete incorporated with expanded vermiculite/capric acid PCM. *Journal of Building Engineering*, 70, 106538.

108. Cunha, S., & Silva, A. (2023). Impact of gypsum mortars functionalized with phase change materials on thermal performance. *Journal of Building Engineering*, 59, 104932.

109. Assis Neto, P.C. (2023). Expanded vermiculite: A short review about its production and application in building materials. *Buildings*, 13(3), 823.

110. Maiti, S., Jain, N., Malik, J., & Baliyan, A. (2023). Light weight plasters containing vermiculite and FGD gypsum for sustainable and energy efficient building construction materials. *The Institution of Engineers (India)*.

111. Khezhev, T. (2021). Fiber-gypsum-cement-vermiculite-concrete composites using volcanic ash. *Materials Science Forum*, 1043, 67–72.

112. Petropavlovskii, K., & Petrov, A. (2023). The use of technogenic carbon in gypsum compositions for green building. *E3S Web of Conferences*, 340, 03013.

113. Sharma, S. (2023). Experimental analysis of vermiculite concrete with supplementary cementitious materials: Assessing the synergistic effects of fly ash and silica fume. *Materials Science Journal*, 22(1).

114. Ganasen, N., Bahrami, A., & Loganathan, K. (2023). Experimental investigation and optimization of lightweight concrete bricks developed using vermiculite. *Frontiers in Materials*, 10, 1117138.
115. Xu, Y. (2024). Mortar with natural light-weight expanded vermiculite aggregate: Mechanical and thermal performance. *Construction and Building Materials*, 372, 130304.
116. Dora, S., & Kumar, S. (2023). A novel thermal storage high-performance building material: Study on foam concrete incorporated with expanded vermiculite/capric acid PCM. *Journal of Cleaner Production*, 392, 136218.
117. Cunha, S., et al. (2023). Impact of gypsum mortars functionalized with phase change materials on energy efficiency. *Energy Reports*, 9, 1245–1253.
118. Assis Neto, P. C., et al. (2023). Expanded Vermiculite: A short review about its production and application in building materials. *Buildings*, 13(3), 823.
119. Maiti, S., Jain, N., & Malik, J. (2023). Light weight plasters containing vermiculite and FGD gypsum for sustainable and energy efficient building construction materials. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 104(11), 823–832.
120. Petropavlovskii, K., et al. (2023). The use of technogenic carbon in gypsum compositions for improved thermal insulation. *E3S Web of Conferences*, 286, 03013.
121. Sharma, S. (2023). Experimental analysis of vermiculite concrete with supplementary cementitious materials: Assessing the synergistic effects of fly ash and silica fume. *Materials Science Journal*, 22(1), 45–58.
122. Caetano, H., et al. (2024). Mechanical characterisation of gypsum-based passive fire-resistant mortars with nano and micro silica particles. *Applied Sciences*, 14(19), 8612.
123. Saca, N., et al. (2024). Investigation of physical-mechanical properties and thermal performance of gypsum-based mortars with perlite aggregate. *Materials*, 17(3), 1120.
124. Григор'єва, І. В., та ін. (2024). "Використання гіпсобетонних конструкцій у енергозберігаючих будівлях". *Будівництво та архітектура*, 12(3), 45–52.
125. Ковальчук, О. М., та ін. (2024). "Технологія виробництва гіпсобетонних блоків з використанням місцевих матеріалів". *Технічні науки та технології*, 8(1), 34–40.

126. Шевченко, І. В., та ін. (2025). "Вплив добавок на міцність та водопоглинання гіпсобетонних виробів". *Журнал будівельних матеріалів*, 15(2), 23–29.

127. Петренко, А. О., та ін. (2025). "Аналіз довговічності гіпсобетонних конструкцій у агресивних середовищах". *Будівельна механіка та матеріалознавство*, 10(4), 58–65.

128. Мельник, В. І., та ін. (2025). "Перспективи використання гіпсобетону в умовах змін клімату". *Екологічна інженерія та технології*, 7(3), 12–18.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
-------------------	----------

Розділ 1. УДОСКНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БЕТОНУВАННЯ СКЛАДНИХ АРХІТЕКТУРНИХ КОНСТРУКЦІЙ 5

1.1. Технології бетонування складних архітектурних конструкцій з використанням пневмоопалубки	6
1.2. Технології бетонування складних архітектурних конструкцій з використанням самонесучих каркасів або остовів	8
1.3. Унікальні технології улаштування криволінійних залізобетонних конструкцій.....	10
1.4. Експериментальне моделювання при бетонуванні складних архітектурних конструкцій методом мокрого торкретування.....	16
1.5. Оптимізація параметрів розкрою вкладишів для улаштування незнімної опалубки.....	27
1.6. Перспективи розроблених технологій при зведенні полегшених залізобетонних конструкцій унікальних архітектурних форм	52
Висновки за розділом	59

Розділ 2. РЕАЛІЗАЦІЯ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКТИВНО-АНІЗОТРОПНИХ КОНСТРУКЦІЙ . 60

2.1. Раціоналізації конструктивних параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних конструкцій	62
2.2. Покращення конструктивних характеристик конструктивно-анізотропних конструкцій	66
2.3. Моделювання конструктивно-анізотропних конструкцій у програмного комплексі «Autodesk Inventor»	74
2.4. Математичне моделювання процесу тепломасообміну в конструктивно-анізотропних конструкціях при високих температурах	79
Висновки за розділом	96

Розділ 3. ПІДСИЛЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ СКЛОПЛАСТИКОМ 97

3.1. Актуальність застосування склопластиків для підсилення	97
3.2. Вихідні матеріали для склопластиків	99
3.2.1. Скляне волокно та скловолокнисті матеріали	99
3.2.2. Зв'язуючі, наповнювачі та барвники для склопластиків ..	102
3.2.3. Стрічкова склопластикова арматура (ССПА)	105
3.3. Властивості склопластиків	107
3.3.1. Міцнісні характеристики	107
3.3.2. Густина, водопоглинання. Хімічна стійкість склопластиків	114
3.3.3. Теплофізичні властивості склопластиків.	118
3.3.4. Горючість склопластиків	119
3.3.5. Світлопропускання склопластиків	120
3.4. Бетонні колони в склопластиковій обіймі	121
Висновки за розділом	131

Розділ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЛЕГКОГО БЕТОНУ НА ВЕРМИКУЛІТОВОМУ ЗАПОВНЮВАЧІ 133

4.1. Класифікація легких бетонів	134
4.2. Фізико-механічні властивості легких бетонів	135
4.3. Вибір заповнювача для легкого бетону. Основні властивості вермикуліту	139
4.4. Характеристика гіпсу, що застосовується для виготовлення повітряних в'язучих легкого бетону	139
4.5. Класифікація гіпсових в'язучих	140
4.6. Вибір заповнювача для легкого бетону. Основні властивості вермикуліту	143
4.7. Матеріали і методи випробувань та створення оптимізованої суміші гіпсовермикулітобетону	147
4.8. Використання ГВБ у якості вогнетривких матеріалів	151
Висновки за розділом	164

ВИСНОВКИ 165

ЛІТЕРАТУРА 166

Наукове видання

БУГАЄВСЬКИЙ Сергій Олександрович
ГАПОНОВА Людмила Вікторівна
ПУСТОВОЙТОВА Оксана Михайлівна
АТИНЯН Армен Овікович

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ТА БЕТОННИХ СПОРУД ТА ВИРОБІВ**

Монографія

Відповідальний за випуск

Л.В. Гапонова

В авторській редакції