

О.І. ЛАПЕНКО



**ЗАЛІЗОБЕТОННІ КОНСТРУКЦІЇ
З РОБОЧИМ АРМУВАННЯМ
НЕЗНІМНОЮ ОПАЛУБКОЮ**

О.І.Лапенко

**ЗАЛІЗОБЕТОННІ КОНСТРУКЦІЇ З РОБОЧИМ
АРМУВАННЯМ НЕЗНІМНОЮ ОПАЛУБКОЮ**

Монографія

Полтава
ТОВ «АСМІ»
2009

УДК 624.012.35

ББК 38.535

Л24

Рекомендовано до опублікування вченою радою Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка

(протокол № 3 від 30 жовтня 2009 р).

Рецензенти:

А.М. Бамбура, докт. техн. наук, с.н.с. державного науково-дослідного інституту будівельних конструкцій;

А.Я. Барашиков, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри залізобетонних і кам'яних конструкцій Київської національної академії будівництва і архітектури;

О.В. Семко, докт. техн. наук, професор, завідувач кафедри архітектури та міського будівництва Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Лапенко Олександр Іванович

Л24 Залізобетонні конструкції з робочим армуванням незнімною опалубкою: монографія / Лапенко О.І.; ПолтНТУ. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2009. – 328 с., 204 іл., 32 табл., бібліогр: 410 назв.

ISBN 978-966-182-049-3

У монографії викладено відомості про залізобетонні конструкції в незнімній опалубці, що виконує функції робочого армування. Розкрито переваги та розроблено нові технічні рішення залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці, проведено їх широкі експериментальні дослідження. Розроблено методи розрахунку сталезалізобетонних конструкцій у незнімній опалубці. На основі проектування, натурних випробувань та будівництва залізобетонних конструкцій в незнімній опалубці доведена їх техніко-економічна ефективність.

Для наукових й інженерно-технічних працівників проектних і будівельних організацій, аспірантів, магістрів та студентів.

УДК 624.012.35
ББК 38.535

ISBN 978-966-182-049-3

© Лапенко О.І., 2009
© ПолтНТУ, 2009
© ТОВ «АСМІ», оформлення, 2009

Зміст

Вступ	7
Розділ 1. Аналіз сучасного стану використання і дослідження залізобетонних конструкцій в незнімній опалубці	10
1.1. Проблеми будівництва монолітних та збірних залізобетонних конструкцій в інвентарній, стаціонарній і одноразовій опалубці.....	10
1.2. Сучасний стан використання незнімної опалубки при будівництві залізобетонних конструкцій.....	13
1.3. Сталезалізобетон як вид конструкцій, в яких сталеві профілі поєднують функції робочої арматури і незнімної опалубки	14
1.4. Стан дослідження сталезалізобетонних конструкцій	21
1.5. Класифікація залізобетонних конструкцій в незнімній опалубці.....	43
1.6. Висновки і задачі дослідження.....	46
Розділ 2. Залізобетонні стійки та колони в незнімній опалубці	48
2.1. Загальні положення.....	48
2.2. Труبوبетонні стійки та колони.....	49
2.2.1. <i>Особливості роботи труبوبетонних елементів</i>	50
2.2.1.2. <i>Надійність труبوبетонних елементів</i>	74
2.3. Стиснуті конструкції з листовим армуванням	80
2.3.1. <i>Сійки з забезпеченням сумісної роботи бетону й листів за допомогою анкерних засобів</i>	80
2.3.2. <i>Сійки з забезпеченням сумісної роботи бетону й листів за допомогою склеювання</i>	85
2.4. Сійки зі сталевих двотаврів із заповненими бетоном боковими порожнинами.....	92
2.4.1. <i>Стиснуті елементи із сталевих прокатних двотаврів із порожнинами, заповненими бетоном при забезпеченні сумісної роботи бетону і сталі за допомогою анкерних засобів</i>	92

2.4.2. Стиснуті елементи із сталевих прокатних двотаврів із порожнинами, заповненими бетоном при забезпеченні сумісної роботи бетону і сталі за допомогою склеювання.....	100
2.5. Висновки з розділу.....	104
3. Залізобетонні балки та ригелі в незнімній опалубці.....	106
3.1. Загальні положення.....	106
3.2. Експериментальні дослідження двотаврових балок зі сталезалізобетонним верхнім поясом.....	109
3.2.1. Конструкція зразків і технологія їх виготовлення.....	109
3.2.2. Методика проведення експериментальних досліджень.....	113
3.2.3. Фізико-механічні характеристики прийнятих матеріалів.....	117
3.2.4. Особливості деформування і несуча здатність згинальних елементів за нормальними перерізами.....	123
3.3. Балки з листовим армуванням.....	133
3.4. Балки зі сталевих двотаврів із боковими порожнинами, заповненими бетоном.....	140
3.5. Згинальні елементи із сталевих прокатних двотаврів із порожнинами заповненими бетоном при забезпеченні сумісної роботи бетону і сталі за допомогою склеювання.....	146
3.6. Висновки з розділу.....	153
4. Залізобетонні плити в незнімній опалубці.....	155
4.1. Загальні положення.....	155
4.2. Залізобетонні плити по профільному настилу.....	157
4.2.1. Залізобетонні плити по профільному настилу з забезпеченням сумісної роботи бетону й сталі за допомогою склеювання.....	157
4.2.2. Залізобетонні плити по профільному настилу з забезпеченням сумісної роботи бетону й сталі за допомогою анкерів.....	161
4.3. Залізобетонні плити зі сталевим обрамленням.....	166
4.3. Висновки з розділу.....	172

5. Наскрізнi конструкції.....	174
5.1. Загальні положення	174
5.2. Програма та методика проведення експериментальних досліджень наскрізних сталезалізобетонних конструктивних елементів.....	179
5.3. Результати експериментальних досліджень наскрізних сталезалізобетонних елементів	189
5.3.1. Елементи, що випробувані на згинання	189
5.3.2. Елементи, що випробувані на стиск.	193
5.4. Висновки з розділу	198
6. Розрахунок несучої здатності й переміщень залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці	200
6.1. Загальні положення	200
6.2. Труробетонні конструкції.....	201
6.3. Стиснуті елементи з листовим армуванням	208
6.4. Розрахунок стиснутих елементів зі сталевих двотаврів із порожнинами заповненими бетоном	223
6.5. Розрахунок згинальних конструкцій з листовим армуванням	241
6.6. Розрахунок балок зі сталевим залізобетонним верхнім поясом за граничними станами	257
6.7. Розрахунок міцності перерізів, похилих до поздовжньої осі згинальних елементів	259
6.8. Розрахунок переміщень сталевих залізобетонних елементів	262
6.9. Розрахунок анкерів сталевих залізобетонних балок	264
6.10. Висновки з розділу	265
7. Питання стійкості при розрахунку залізобетонних конструкцій в незнімній опалубці	267
7.1. Загальні положення	267
7.2. Основні рівняння теорії пружності стосовно пластин	267

7.3. Вирішення рівняння стійкості за Б.М.Броуде	274
7.4. Перевірка стійкості за методикою Eurocode 4	278
7.4.1. Перевірка стійкості стінки балки	278
7.4.2. Перевірка стійкості комплексних стійок	278
7.5. Розрахунок стійкості пластин на пружній основі	281
7.6. Розрахунок стійкості стиснутих елементів за приведеним перерізом	285
7.7. Висновки з розділу	290
8. Проектування, будівництво й випробування несучих залізобетонних конструкцій в незнімній опалубці та їх техніко-економічна ефективність	292
8.1. Загальні положення	292
8.2. Проектування трубобетонних колон і стійок	292
8.3. Стиснуті конструкції з армуванням сталевими листами та прокатними профілями	296
8.4. Балки із зовнішнім листовим армуванням	302
8.5. Розробка й випробування нового полегшеного сталевих залізобетонного ригеля покриття промислової будівлі	314
8.6. Техніко-економічна ефективність залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці	321
8.7. Висновки з розділу	323
Загальні висновки	325
Література	327

ВСТУП

Актуальність теми. Одним із недоліків залізобетону є необхідність застосування опалубки і риштувань при зведенні несучих конструкцій, що значно підвищує їх вартість, витрати матеріалів, трудовитрати та енерговитрати. З цим недоліком провадиться постійна боротьба, наприклад, бетонування в незнімній залізобетонній опалубці, застосування збірно-монолітних конструкцій, широке виробництво збірного залізобетону. Це не дає бажаного результату, тому що в усіх цих випадках все одно доводиться в тому чи іншому вигляді застосовувати опалубку, а іноді й риштування.

Нині широке застосування дістали сталезалізобетонні конструкції, які в своєму складі поєднують бетон, арматурні стрижні та сталеві прокатні профілі. Поряд з добрими техніко-економічними показниками при будівництві цих конструкцій у багатьох випадках удається повністю позбавитися необхідності застосовувати опалубку і риштування, тому що як опалубку можна використовувати сталеві прокатні профілі й листи, а робоча арматура з прокатних профілів із успіхом виконує функції риштувань.

Викладене дозволяє зробити висновок про актуальність дослідження, проектування та впровадження у будівництво залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці, функції якої виконує арматура із прокатних сталевих профілів.

Мета роботи – створення, дослідження і впровадження в будівництво залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці зі сталевих прокатних профілів, які одночасно виконують роль робочої арматури, що забезпечує значний техніко-економічний ефект; розроблення методики їх розрахунку.

Задачі дослідження:

1. Запропонувати нові типи залізобетонних конструкцій, які можна будувати в незнімній опалубці зі сталевих прокатних профілів, що одночасно виконують функції робочої арматури.
2. Експериментально дослідити особливості роботи елементів залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці.
3. Виявити закономірність зміни напружено-деформованого стану перерізів залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці залежно від стадії будівництва, при дії експлуатаційних навантажень та дослідити характер їх руйнування.
4. Дослідити необхідність та вплив анкерних засобів на сумісну роботу бетону й незнімної опалубки зі сталевих профілів, яка одночасно виконує роль робочої арматури.
5. Розробити теорію й інженерну методику розрахунку досліджуваних конструкцій у незнімній опалубці з урахуванням особливостей сумісної роботи бетону та арматури зі сталевих профілів.

6. Дослідити проблеми втрати стійкості армування із тонких сталевих листів в умовах сумісної роботи з бетоном у залізобетонній конструкції в незнімній опалубці.

7. Упровадити результати досліджень у практику проектування й будівництва, провести натурні випробування запропонованих конструкцій.

8. Установити техніко-економічну ефективність залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці порівняно зі звичайними залізобетонними конструкціями.

Об'єкт дослідження – залізобетонні конструкції в незнімній опалубці зі сталевих прокатних профілів, що одночасно виконують функції робочої арматури.

Предмет дослідження – несуча здатність та деформативність залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці зі сталевих прокатних профілів, що одночасно виконують функції робочої арматури.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Уперше запропоновані та досліджені нові типи залізобетонних конструкцій, у яких суміщена незнімна опалубка з функціями робочого армування.

2. Створені нові типи залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці зі сталевих листів і прокатних профілів, що одночасно виконують функції робочої арматури.

3. Отримані нові експериментально визначені дані про деформативність та несучу здатність залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці.

4. Уперше розроблений і випробуваний спосіб забезпечення сумісної роботи бетону та сталі в залізобетонній конструкції в незнімній опалубці за допомогою склеювання під час виготовлення замість використання металевих анкерів.

5. Виявлені особливості напружено-деформованого стану залізобетонних елементів у незнімній опалубці за умов сумісної роботи зі сталевими профілями, що одночасно виконують функції опалубки й арматури.

6. Розроблені методи розрахунку залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці з урахуванням сумісної роботи бетону й арматури в сталезалізобетонній конструкції.

7. Розроблені методи розрахунку місцевої стійкості сталевих листів, що працюють у складі залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці.

8. Отримані нові експериментальні дані про деформативність та несучу здатність залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці при їх випробуванні у виробничих умовах.

9. Розроблені рекомендації щодо розрахунку та проектування залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці з урахуванням сумісної роботи бетону й арматури зі сталевих профілів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в створенні нових типів залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці, яка одночасно виконує функції робочої арматури, в адаптації існуючих типів сталезалізобетонних конструкцій до вимог, що ставляться до залізобетонних конструкцій, що будуються без застосування опалубки й риштувань, у розробленні проектів, випробуванні у виробничих умовах та широкого застосування в будівництві досліджуваних конструкцій. Доведена висока техніко-економічна ефективність конструкцій у незнімній опалубці порівняно зі звичайними залізобетонними.

Запропонована увазі читача робота буде корисною науковим та інженерно-технічним працівникам проектних і будівельних організацій, аспірантам, магістрам та студентам будівельних спеціальностей.

Розділ 1

Аналіз сучасного стану використання і дослідження залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці

1.1 Проблеми будівництва монолітних та збірних залізобетонних конструкцій в інвентарній, стаціонарній і одноразовій опалубці

Одною із суттєвих переваг залізобетону є можливість при проектуванні й будівництві надання конструкції будь-якої форми. Користуючись цим, архітектори та конструктори створили найрізноманітніші обриси залізобетонних конструкцій, у тому числі оболонки і просторових систем. Можливість створення із залізобетону різноманітних форм значно вплинула на розвиток архітектури. Але для надання будь-якої форми для залізобетонних конструкцій необхідне влаштування опалубки.

Існують й інші суттєві переваги залізобетону, що забезпечили його масове використання в будівництві. Це довговічність, висока міцність, малі експлуатаційні витрати, можливе використання місцевих матеріалів, надійний опір атмосферним впливам.

Поряд зі значними перевагами залізобетон має і суттєві недоліки. Насамперед це велика вага, що пояснюється не тільки високою щільністю самого матеріалу, але й тим фактором, що в несучих конструкціях не враховується робота бетону на розтяг, до того ж у розтягнутій зоні з'являються тріщини. Недоліком є велика трудоемність при виготовленні та необхідність витримки після бетонування. Боротьба із цими недоліками здійснюється за різними напрямками: це зменшення щільності за рахунок застосування легких бетонів і конструювання несучих елементів так, щоб виключити наявність бетону в розтягнутій зоні.

Ще одним суттєвим недоліком бетону є необхідність використання опалубки та рихтування при його виготовленні й будівництві. Це однаковою мірою стосується як монолітного, так і збірного залізобетону.

При виготовленні та будівництві залізобетонних конструкцій проблемам застосування опалубки завжди приділялася необхідна увага [69, 138, 199, 342]. Історично склалося так, що в нашій країні здавна використовувалася практично одноразова дерев'яна опалубка. Для отримання належної поверхні залізобетонної конструкції, яка б не потребувала додаткового опорядження, для влаштування опалубки доводилося застосовувати дорогі за вартістю стругані дошки або проводити додаткові заходи для отримання доброї поверхні бетону. Влаштування цієї опалубки потребує багато деревини, причому при влаштуванні власне опалубки потрібні пиломатеріали високої якості. Іноді вартість дерев'яної опалубки перевищує вартість залізобетонної конструкції. Слід урахувати те, що в наших умовах будівництва практично неможливе

повторне використання дерев'яної опалубки. Цей фактор значно підвищує загальну вартість залізобетонних конструкцій.

Останніми роками при будівництві монолітних залізобетонних конструкцій, зокрема висотних будівель, застосовується інвентарна опалубка, яка використовується багато разів. Це, звичайно, значно прогресивніше, ніж використання дерев'яної опалубки. Але ця опалубка має високу вартість, а швидке її обертання стримується часом, необхідним для набуття бетоном необхідної міцності.

При виробництві збірних залізобетонних конструкцій у заводських умовах використовується стаціонарна металева опалубка. Існувала ціла індустрія виготовлення цієї опалубки, до якої ставилися дуже високі вимоги. Це й простота її монтажу та демонтажу, і можливість багаторазового повторення, й сприйняття значних зусиль у випадках, коли необхідно створювати попереднє напруження. З метою підвищення інтенсивності обертання опалубки застосовується термічна обробка бетону для зменшення строків його тужавіння. Металева опалубка й необхідність термічної обробки значно підвищують вартість залізобетонних виробів. Стаціонарна опалубка дуже дорога за вартістю, для її виготовлення потрібно багато сталі. Її застосування економічно можна виправдати тільки тоді, коли вона обертається при виготовленні збірних залізобетонних конструкцій не менше ніж 500 разів.

За даними [159], при зведенні залізобетонних монолітних конструкцій і споруд трудомісткість опалубки становить 35-40%, а вартість 15-25% від загальних витрат на конструкцію. Враховуючи високу вартість та величезні витрати на влаштування провадилися роботи з типізації та індустріалізації опалубки. Заходи для вдосконалення опалубки розділялися на два великі напрями: опалубка для монолітних й опалубка для збірних конструкцій.

Пропозиції щодо вдосконалення опалубки для монолітних залізобетонних конструкцій були дуже різноманітними. Головний напрям – це надання можливості застосовувати одну й ту ж опалубку багато разів. Для цього було розроблено багато видів типових щитів для влаштування опалубки. Приділялась виняткова увага обробці поверхні цих листів, щоб запобігти прилипанню бетону до опалубки. Для цього, крім змашування, застосовуються плівки, наприклад на основі паперу, просоченого фенолформальдегідною смолою. Використовуються плити з поліефірними покриттями. За даними [342] завдяки якісній обробці поверхні обертання опалубки можна збільшити в 20 разів.

Промислового виготовлення набула опалубка з деревоволокнистих плит.

Для будівництва монолітних залізобетонних конструкцій, застосовується інвентарна металева опалубка. Приклад зведення будівлі із застосуванням інвентарної опалубки наведено на рисунку 1.1. Зрозуміло, що вона має винятково велику вартість, а її застосування може бути виправдане тільки при багаторазовому використанні.

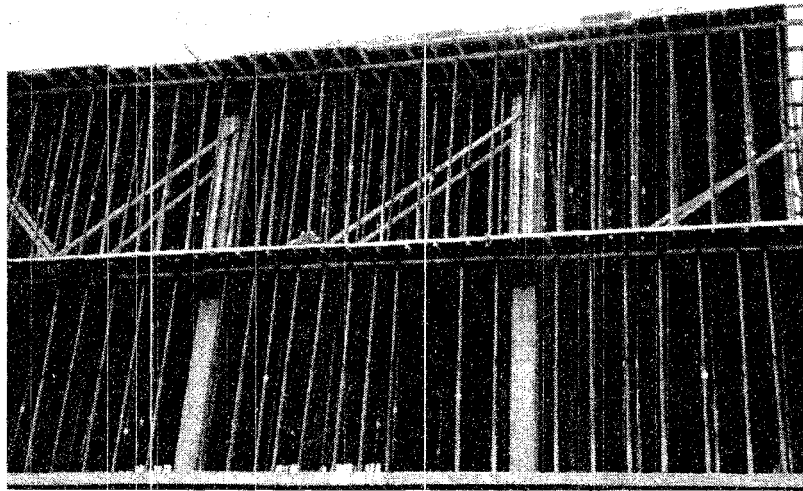


Рисунок 1.1 - Приклад зведення будівлі в знімній опалубці

Крім власне опалубки, при зведенні монолітного залізобетону необхідні відповідні підтримуючі конструкції. Сюди, крім дерев'яних, у першу чергу належать інвентарні сталеві стійки різної конструкції, в тому числі й телескопічні, висота яких може змінюватися залежно від потреби. Є зайвим нагадувати, що підтримуючі конструкції мають високу вартість, а багаторазове їх обертання з різних причин не завжди можливе.

Не простішою є проблема застосування опалубки для виробництва збірних залізобетонних конструкцій. Відомо, що від її конструктивних особливостей, точності виготовлення, правильної експлуатації залежить якість залізобетонних виробів. Згідно з [159] форми становлять половину ваги технологічного обладнання заводів збірних залізобетонних конструкцій. Загальна вага форм у колишньому СРСР досягала 1 млн. тонн, а щорічна потреба на заміну зношених форм становила 200 тис. тонн [69].

Сталеві форми для заводів залізобетонних конструкцій виготовлялися на заводах різного профілю: машинобудівних, шляхового машинобудування, ремонтно-механічних.

Форми для виготовлення збірних залізобетонних конструкцій дуже складні й залежать від способу виробництва, виду армування та силового впливу арматури, способу ущільнення бетонної суміші, положення виробу при формуванні. На конструкцію опалубки впливають способи переміщення та установки форм: конвеєрний, агрегатно-поточний, стендовий. Також впливає, яка прийнята арматура: ненапружена чи попередньо напружена, спосіб її натягнення – термічний чи за допомогою гідродомкратів. Впливає також положення виробу при формуванні, яке може бути як горизонтальним, так і

вертикальним. Для отримання якісного залізобетону, до сталевих форм при їх проектуванні та виготовленні ставляться дуже високі вимоги. Все це говорить про великі проблеми, які виникають при виготовленні збірних залізобетонних конструкцій у зв'язку з використанням сталевих опалубки.

Увесь період розвитку залізобетону характеризувався боротьбою із цим недоліком – необхідністю застосування опалубки при зведенні конструкцій. Одним із прикладів, що характеризують цю проблему, є застосування збірно-монолітних конструкцій [67]. При будівництві збірно-монолітних конструкцій є можливість відмовитися від застосування риштувань та опалубки на будівельному майданчику, але залишаються всі проблеми, пов'язані з виготовленням збірних складових елементів. Таким чином, застосування збірно-монолітних конструкцій не в повній мірі виключає проблеми, пов'язані з використанням опалубки при будівництві залізобетонних конструкцій.

Поряд із залізобетонними вже понад сто років застосовуються сталезалізобетонні конструкції [114, 142, 263, 305], що поєднують у собі залізобетон та сталеві прокатні профілі. Ці конструкції надзвичайно різноманітні: це стояки й колони, балки й ригелі, плити покриттів і перекриттів, просторові конструкції. Вони застосовуються при будівництві згинальних і стиснутих конструкцій, їх використовують при зведенні різноманітних споруд. Сталезалізобетонні конструкції мають багато переваг, але, на нашу думку, основна з них – це можливість у багатьох випадках виробляти та будувати залізобетонні конструкції без використання спеціальної опалубки, тому що її функції може успішно виконувати арматура зі сталевих профілів.

Слід зазначити, що будівництво залізобетонних конструкцій можливе при застосуванні армування не тільки зі сталевих листів, але й при використанні інших профілів: труб, двотаврів, кутиків тощо.

Ураховуючи вищесказане, необхідно вивчити конструкції ті, що є та запропонувати нові види залізобетонних конструкцій, які б не потребували взагалі використання спеціальної опалубки при їх виготовленні та будівництві, а її функції виконувало б робоче армування. Якраз цим вимогам і відповідають деякі типи сталезалізобетонних конструкцій, у яких профільна робоча арматура може одночасно виконувати функції опалубки.

1.2. Сучасний стан використання незнімної опалубки при будівництві залізобетонних конструкцій

Враховуючі складнощі, пов'язані з виготовленням і будівництвом опалубки та риштувань, вже давно виникла ідея про застосування незнімної опалубки. Ця опалубка знайшла досить широке застосування і виготовлялася з найрізноманітніших матеріалів. Глибокий аналіз проблем, пов'язаних із застосуванням незнімної опалубки, міститься в [69, 156, 159, 317].

Широке будівництво монолітних залізобетонних конструкцій, враховуючи високу вартість як дерев'яної, так і металевої опалубки, привело до необхідності застосовувати різні типи незнімної опалубки. Основні з них такі:

1. Опалубка із залізобетонних плит, які після бетонування працюють у складі монолітної конструкції.
2. Незнімна опалубка з азбоцементних плит.
3. Армоцементна опалубка.
4. Незнімна опалубка з уніфікованих пустотних бетонних блоків.
5. Незнімна опалубка зі склоцементних листів.
6. Фібробетонна незнімна опалубка.
7. Сітчаста незнімна опалубка.
8. Незнімна опалубка для масивних залізобетонних конструкцій зі сталевих листів.

Як видно з цього переліку, існуюча незнімна опалубка є досить різноманітною. Загальною позитивною якістю перелічених типів опалубки є те, що вона дозволяє позбутися необхідності застосовувати одноразову опалубку, що дозволяє економити значні кошти. При цьому сама опалубка включається в роботу залізобетонної конструкції і сприймає якусь частку навантаження, що діють на неї.

Але перераховані типи незнімної опалубки мають суттєві недоліки. З досвіду її застосування [159] встановлено, що її раціонально використовувати при будівництві масивних монолітних конструкцій, наприклад гідротехнічних споруд, гребель і т.п. При виготовленні збірних конструкцій такі типи опалубки не застосовуються взагалі. Другим недоліком є труднощі, пов'язані з забезпеченням сумісної роботи залізобетонного масиву та незнімної опалубки при дії зовнішнього навантаження.

Аналіз техніко-економічної ефективності застосування незнімної опалубки, що наведений в [159], показав, що порівнюючи з інвентарною опалубкою працевитрати знижуються на 19-66% при деякому зростанні собівартості. Якщо незнімну опалубку одночасно використовувати в якості гідроізоляції, то трудомісткість робіт знижується в 2-2,5 рази при зменшенні собівартості на 30-40%.

Таким чином перелічені типи незнімної опалубки на даний час мають обмежене застосування і не можуть конкурувати з одноразовою та інвентарною опалубкою.

1.3. Сталезалізобетон як вид конструкцій, в яких сталеві профілі суміщують функції як арматури, так і незнімної опалубки

Нині значного розповсюдження набули залізобетонні конструкції, що армовані стрижнями [14, 15, 20, 126, 135, 136, 188, 191-194, 237]. У цих конструкціях бетон та арматура працюють сумісно, при цьому арматура повністю сприймає напруження розтягнення, хоч її робота в стисненій зоні

також є ефективною. Сталева арматура в залізобетоні захищена від корозії. Відома висока вогнестійкість залізобетону.

Та традиційні залізобетонні конструкції мають суттєві недоліки. Один із них – нераціональне використання бетону в розтягненій зоні, де він фактично не працює і навіть не враховується при розрахунках несучої здатності [236]. А тим часом через вимушене застосування бетону в розтягненій зоні значно збільшується вага конструкції. Дорогою за вартістю й такою, що нераціонально використовується, є опалубка як для збірних, так і для монолітних залізобетонних конструкцій. Недолік традиційного залізобетону – наявність проблеми тріщиностійкості. У збірному залізобетоні гостро стоїть питання стиків, що пов'язано із застосуванням великої кількості закладних деталей [235].

Відомі недоліки сталевих конструкцій [26, 115, 140, 160, 161, 195, 235, 243]. Серед них – погана робота на стиснення через втрату загальної та місцевої стійкості, надзвичайно низька вогнестійкість і необхідність захисту від корозії [24, 37, 45, 204].

Враховуючи вказані та багато інших недоліків залізобетонних і сталевих конструкцій, варто реалізувати ідею про застосування сталезалізобетонних конструкцій. Сталезалізобетонними називають комплексні конструкції, у яких сумісно працюють і сталеві, і залізобетонні елементи. При цьому залізобетон використовується в основному для сприйняття зусиль стиску, а сталь – для сприйняття зусиль розтягу. У зв'язку з ефективною роботою сталезалізобетонних конструкцій будівельники приділяють їм велику увагу, а з точки зору розроблення нових комбінацій різних матеріалів для сумісної роботи ці конструкції не мають аналогів.

При проектуванні сталезалізобетонних конструкцій ставиться завдання позбутися недоліків сталевих і залізобетонних конструкцій. Слід докласти зусиль щоб у сталезалізобетонній конструкції бетон працював на стиск, а сталь – на розтяг. Як показує досвід проектування сталезалізобетонних конструкцій, у багатьох випадках цю вимогу вдається задовольнити. І дійсно, незважаючи на прогрес у розвитку, залізобетонні конструкції завжди будуть залишатися важкими, а сталеві конструкції відрізнятимуться підвищеною металоємністю. А відомо, що вимога щодо економії витрат металу завжди буде актуальною. Багато видів сталезалізобетонних конструкцій можна виготовляти без опалубки, тому що її роль виконує профільна чи листову робоча арматура.

Сталезалізобетонні конструкції доволі різноманітні. Їх можна класифікувати за призначенням, за видом використаного матеріалу, за способом зведення. В окрему групу, на наш погляд, необхідно виділити сталезалізобетонні конструкції, які можна будувати без застосування будь-якої опалубки. На сьогодні в будівництві застосовують такі основні види сталезалізобетону [263, 290]:

- 1) балки та ригелі (рисунок 1.2):
 - із внутрішнім жорстким армуванням;

- із зовнішнім армуванням (стрічкове армування листами, поздовжня арматура із кутиків, складені балки з використанням замкнутих профілів, заповнених бетоном і т.п.);

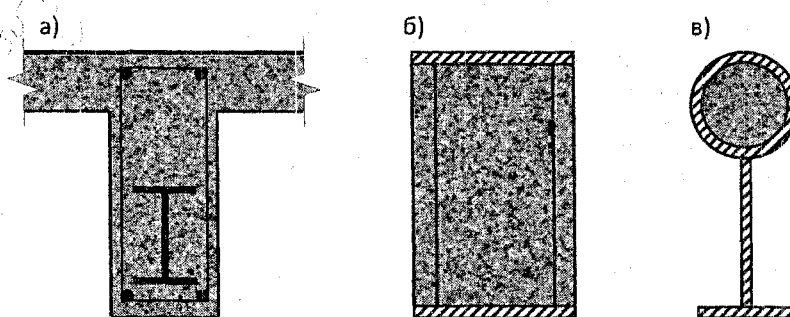


Рисунок 1.2 - Поперечні перерізи сталезалізобетонних балок і ригелів:
а) з внутрішнім жорстким армуванням; б) із зовнішнім стрічковим армуванням; в) складене з використанням сталевих труб, заповнених бетоном

2) центрально та позацентрово стиснені колони і стійки (рисунок 1.3):

- із зовнішнім армуванням (трубобетонні, коробчасті, з листами вповодж граней і кутиками вповодж ребер);

- у вигляді сталевих профілів із забетонованими міжпоясними порожнинами;

- складені колони із сталезалізобетонних гілок.

3) монолітні та збірні плити (рисунок 1.4):

- по сталевому профільному настилові;

- по сталевій ортотропній плиті.

4) ферми:

- із залізобетонною плитою, що включена в роботу;

- із сталезалізобетонних поясів і розкосів;

- із залізобетонними стиснуто-зігнутими кроквами та гнучкими розтягненими сталевими елементами;

- 5) каркаси багатоповерхових будівель;

- 6) конструкції великопролітних будівель (балкові, аркові, рамні тощо.);

- 7) пролітні будови мостів;

- 8) спеціальні споруди (резервуари, очисні колодязі, тунелі, фундаменти, захисні конструкції атомних реакторів і т.п.);

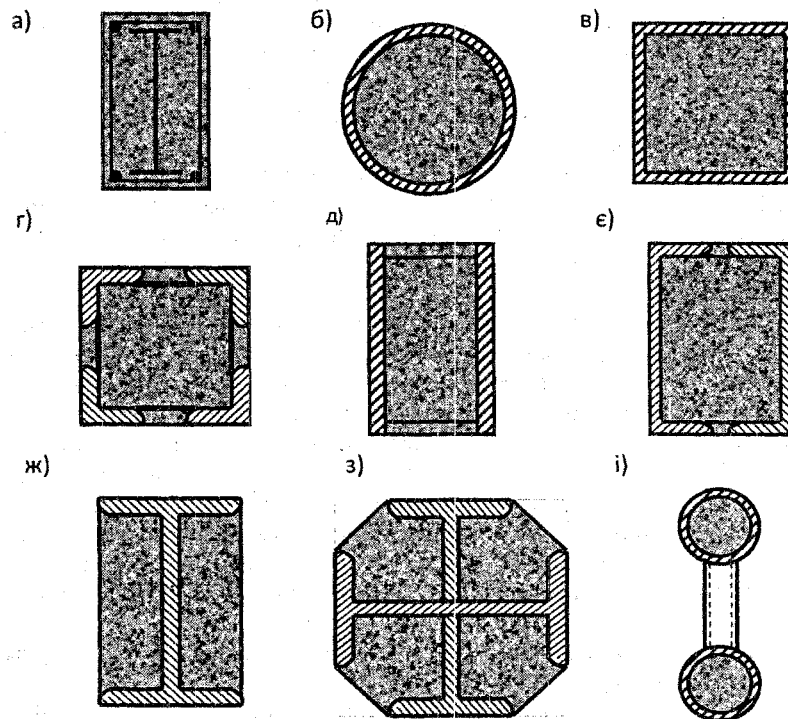


Рисунок 1.3 - Поперечні перерізи сталезалізобетонних колон:
 а) з внутрішнім жорстким армуванням; б), в) трубобетонні з круглих та квадратних труб; г), д) із кутиками і листами вповдовж граней; е), ж), з) у вигляді сталевих профілів із заповненими порожнинами; і) складені з трубобетонних гілок

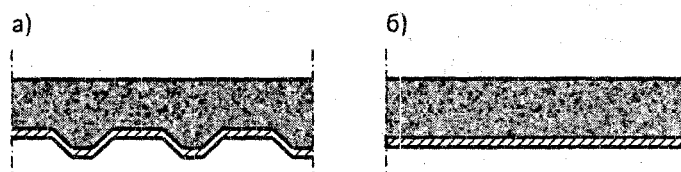


Рисунок 1.3 - Поперечні перерізи сталезалізобетонних плит:
 а) по сталевому профнастилу; б) по ортотропній плиті

Із цього переліку видно, що сталезалізобетонні конструкції доволі різноманітні. Це й залізобетонні плити, які об'єднані зі сталевими балками, і залізобетонні плити, які об'єднані зі сталевими листами, і конструкції зі збірних

залізобетонних плит, поєднаних зі сталевими фермами чи балками. Вони можуть бути плоскими й просторовими. До просторових конструкцій належать сталезалізобетонні оболонки, зокрема залізобетонні оболонки з металевими контурними фермами, короткі циліндричні оболонки при включенні в роботу залізобетонних плит, що вкладаються по ставевих фермах.

Особливе місце серед просторових конструкцій посідають структурні металеві покриття, у яких верхні пояси замінені залізобетонними плитами [262, 267, 268, 273, 288, 291, 292]. Перевага цих конструкцій у тому, що є можливість зекономити метал за рахунок розміщення в стиснутій зоні елементів із залізобетону. При цьому зберігаються всі позитивні якості структурної металевої конструкції.

Ефективним варіантом конструкції є такий, коли в ній суміщаються несучі та огорожувальні функції, наприклад у часторебристих перекриттях [269, 274, 284, 285]. Така конструкція, як правило, є просторовою. У цьому випадку вдається домогтися суттєвої економії бетону й сталі. Важливим є також принцип концентрації матеріалів, скорочення ланок на шляху силового потоку. При цьому необхідно враховувати як вимоги міцності, так і умови виготовлення й експлуатації конструкції. При визначенні висоти просторової конструкції необхідно задовольняти не тільки вимоги будівельної механіки, а й намагатися зменшення будівельного об'єму будівлі, витрати матеріалів, можливість використання міжфермового простору, вимоги архітектурної виразності.

Згідно [263] при розробленні несучої конструкції слід дотримуватися багатьох важливих умов, зокрема таких:

- збірні елементи конструкції повинні мати такі розміри, щоб їх можна було перевозити;
- кількість типів збірних елементів у конструкції повинна бути мінімальною;
- мають бути витримані відповідні габарити збірного елемента конструкції;
- елементи конструкцій належить виготовляти за технологією, властивою для існуючої будівельної індустрії;
- елемент конструкції повинен бути універсальним і підходити для зведення як промислових, так і цивільних будівель;
- несучу сталезалізобетонну конструкцію необхідно будувати без застосування будь-якої опалубки.

Ідеально вимогам залізобетонних конструкцій у незнімній опалубці відповідає труботетон [107, 131, 141, 181, 192, 208, 231, 246, 250, 253, 308], що являє собою сталеві труби, заповнені бетоном.

На рисунку 1.5 наведені характерні перерізи труботетонних елементів. Із рисунка видно, що труботетонні елементи можуть бути досить різноманітними.

У труботетонних конструкціях ефективно використовуються специфічні особливості застосованих матеріалів [250]. Це дає змогу отримати значну

економію сталі та цементу, приводить до зменшення поперечного перерізу елементів конструкцій і як наслідок - до зниження їх ваги і транспортних витрат.

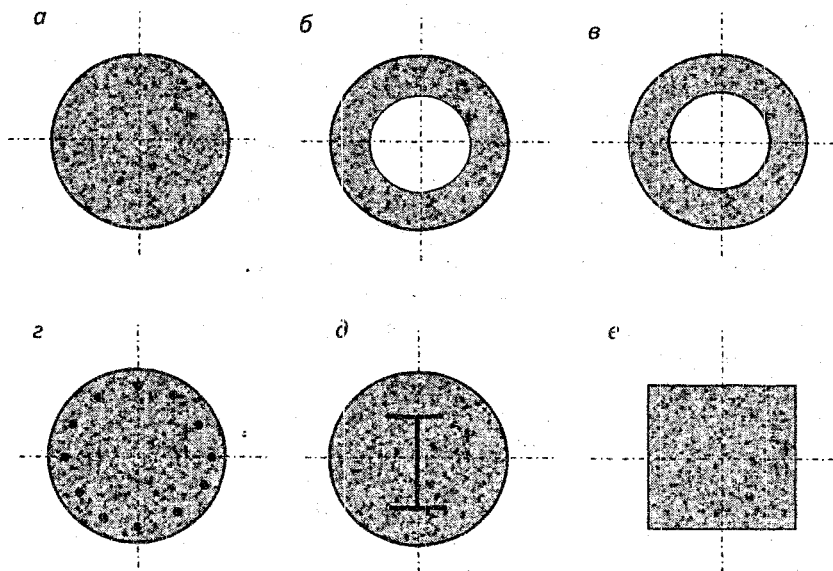


Рисунок 1.5 - Характерні перерізи трубобетонних елементів:

а) трубобетонний елемент суцільного перерізу; б) елемент «труба в трубі»; в) трубобетонний елемент із ядром із центрифугованого бетону; г) елемент із ядром, армованим стрижневою поздовжньою арматурою; д) елемент із ядром, армованим прокатним профілем; е) елемент у вигляді труби квадратного перерізу, заповненої бетоном

Металева труба — оболонка в трубобетоні - виконує одночасно функції як поздовжнього, так і поперечного армування. Вона сприймає зусилля за всіма напрямками й під будь-яким кутом. Боковий тиск труби протидіє інтенсивному розвитку мікротріщин розриву в бетонному осерді, яке в умовах всебічного тиску витримує напруження, що значно перевищує призову міцність. Водночас сталева труба, заповнена бетоном, виявляється значною мірою захищеною від утрати місцевої й загальної стійкості.

Трубобетонні конструкції дуже надійні в експлуатації. У граничному стані вони не втрачають несучу здатність миттєво, як залізобетонні, а досить тривалий час можуть витримувати навантаження, зазнаючи значних деформацій.

Трубобетонні елементи мають усі переваги раціональних трубчастих металевих конструкцій, котрі все ширше застосовуються у практиці

будівництва. Трубчастий профіль у наш час розглядається як найпрогресивніший для умов будівництва, що потребує мінімальної кількості зварних робіт та додаткових елементів. Внутрішня поверхня труб надійно захищена від корозії бетоном, що там знаходиться.

Порівняно із залізобетонними трубобетонні конструкції є найіндустріальнішими при виготовленні й монтажі. Вони в цілому легкі і транспортабельні, добре протистоять механічним пошкодженням, мають гарний зовнішній вигляд. При їхньому виготовленні не потрібні опалубка, арматурні каркаси і закладні деталі.

Для виготовлення трубобетонних конструкцій можна використовувати існуючі заводи залізобетонних конструкцій або бетонувати їх на місці зведення споруди без застосування спеціальної опалубки. Заповнення труб бетоном не викликає технологічних труднощів. Добре ущільнення бетону забезпечується завдяки відсутності арматурних каркасів. З'єднання трубобетонних елементів між собою забезпечується за допомогою електрозварювання або болтів. Із трубобетонних стрижнів легко створювати просторові решітчасті системи різної конфігурації. Вузлові спряження можна здійснювати без фасонки.

Технологічні вимоги практично не обмежують галузі використання трубобетону, який може працювати при складному температурно-вологісному режимі в умовах агресивного середовища, при великих прольотах та висотах будівель, в умовах значної кількості виробництв, де звичайні сталеві або залізобетонні конструкції використовувати недоцільно.

Робота трубобетонних конструкцій під навантаженням значно відрізняється від роботи сталевих та залізобетонних конструкцій. Це пояснюється тим, що сталь і бетон у трубобетонній конструкції знаходяться в умовах об'ємного напруженого стану. Ці особливості роботи трубобетонних конструкцій потребують відповідних вимог до їх розрахунку й конструювання [250].

Сталезалізобетонні конструкції застосовуються в багатьох галузях будівництва [281]. Найвигідніше використовувати сталезалізобетон в елементах, що сприймають великі навантаження. Ефективними є сталезалізобетонні колони промислових та цивільних споруд, стиснені елементи великопролітних арок і ферм, опори й пролітні будови мостів, стійки в будівлях рамної конструкції, у житлових та громадських будівлях, в опорах ЛЕП, у радіотелевізійних щоглах тощо.

Важливою перевагою сталезалізобетонних конструкцій із внутрішнім армуванням є їх підвищена несуча здатність. При застосуванні листової арматури майже завжди вдається її використовувати як опалубку. Ефективними в роботі та дешевими при будівництві є монолітні залізобетонні плити по сталевому профільному настилові [122, 287].

Сталезалізобетонні конструкції мають деякі недоліки. Основний із них – нижча, порівнюючи зі звичайним залізобетоном, вогнестійкість. Іншим

суттєвим недоліком є те, що зовнішню металеву поверхню доводиться захищати від корозії.

1.4. Стан дослідження сталезалізобетонних конструкцій

Відомо, що в сталезалізобетонних конструкціях для раціональної сумісної роботи в одне ціле поєднані бетон, сталеві профілі та стрижнева арматура. Враховуючи, що різних сталевих профілів за геометрією поперечного перерізу дуже багато, то, як це було показано в 1.3, сталезалізобетонні конструкції дуже різноманітні. Крім класифікації за призначенням, вони можуть розділятися в залежності від місця виготовлення: безпосередньо при спорудженні будівлі («монолітний» варіант) чи в заводських умовах або на будівельному майданчику (збірні конструкції). Сталезалізобетонні конструкції чітко поділяються на елементи із зовнішнім і внутрішнім армуванням.

Сталезалізобетонні конструкції з внутрішнім жорстким армуванням прокатними профілями здобули досить широке розповсюдження, особливо при будівництві каркасів висотних споруд. Їх перевагою є висока несуча здатність та захист прокатних профілів від високих температур на випадок пожежі. Але вони ніяк не задовольняють вимогам, що ставляться до залізобетонних конструкцій в незнімній опалубці, тому в цій роботі не розглядаються.

Сталезалізобетонні конструкції можна розділити на дві великі групи:

1. Конструкції, в яких завдяки особливостям поєднання бетону та сталі виникає об'ємний напружений стан у ядрі. До цієї групи в першу відносяться трубобетонні конструкції.

2. До другої групи відносяться сталезалізобетонні конструкції в складових якої, бетону та сталі, об'ємний напружений стан не виникає.

Особливості роботи трубобетонних елементів. Проблеми, пов'язані з роботою трубобетонних конструкцій, їх виникненням та дослідженням, глибоко проаналізовані в роботах [51, 250]. Трубобетонним конструкціям вже більше ста років. Перші експериментальні дослідження конструкцій з зовнішнім армуванням на початку ХХ століття проводили Геспер, Консідер (1902 р.), Рабю (1915 р.). В Радянському Союзі перші дослідження були здійснені в ЛенЦІС Г.П. Передерієм [181], в 1933–1944 роках – О.О. Гвоздєвим [57], Н.Б. Добудогло, в 50–ті роки вагомий вклад у розвиток трубобетону внесли В.А. Росновський [208], А.Ф. Ліпатов [139]. Особливо активні науково-пошукові роботи по дослідженню трубобетону проводяться в нашій країні останні сорок років. Були засновані цілі наукові школи під керівництвом О.А. Долженка [77,78], Р.С. Санжаровського [107, 214-216], Л.К. Лукші [141-143], Л.І. Стороженка [244-253, 255, 259-261, 276, 289], Е.Д. Чихладзе [330-334], якими накопичений великий дослідний та теоретичний матеріал, що дозволяє судити про особливості роботи оболонки та ядра в трубобетоні та про причини підвищення несучої здатності трубобетонних елементів, де бетон знаходиться в об'ємному напруженому стані. За кордоном

останнім часом також ведуться активні дослідження трубобетонних елементів [108, 124, 157, 326, 349, 351, 352-354, 357-359, 367, 368, 372, 380-384, 387, 388, 391, 394-396, 399, 400, 402, 406-410], які супроводжуються їх широким застосуванням у будівництві.

Починаючи з 1964 року в КГРІ, а з 1986 року в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка, під керівництвом Л.І. Стороженка проводяться глибокі експериментально-теоретичні дослідження трубобетонних конструкцій. В наукових працях В.І.Барбарського [22], В.В. Васюти [43], В.Б. Васюта [42], О.П.Воскобійник [49-52], Г.В.Головка [65], Д.А. Єрмоленка [79-81], В.І.Єфіменка [83-85], А.О.Кальченка [99], П.Г.Кортушова [128], О.І. Лапенка [134], В.І.Маракуци [147-149], М.В.Микули [154, 155], О.В.Назарова О.І. [171], В.Ф. Пенца [180], О.В.Семка [221-229], В.М.Спільчука [238], В.М. Сурдіна [307-310], О.Л.Тарановського [311], О.І. Тесьолкіна [311], В.М.Тимошенка [315], П.Г.Туржанського [318], С.О.Харченка [322], Б.Т.Шарифа [339], С.В. Шкіренка [341], І.С.Ярового [345] та інших на основі об'ємних експериментів досліджувалися питання розрахунку центрально та позацентрово стиснутих звичайних та армованих стрижневою арматурою трубобетонних елементів; робота трубобетонних елементів на кручення та кручення зі згином; вивчалися властивості центрифугованого трубобетону; запропоновані методи розрахунку стиків трубобетонних конструкцій; досліджувались згинальні попередньо напружені трубобетонні елементи; вирішувались питання оптимізації трубобетону.

На сьогодні досить добре вивчені особливості роботи трубобетонних елементів в залежності від їх геометричних характеристик, фізико-механічних властивостей бетону осердя та матеріалу оболонки, напружено-деформованого стану, способу прикладання навантаження та його тривалості [1, 2, 27, 36, 54, 73, 82, 86, 103-106, 120, 132, 144, 150, 151, 166-169, 172, 177, 185, 210, 220, 230, 240, 272, 316, 320, 321]. Питання вогнестійкості трубо бетону досліджені в [176].

Доведено [3, 76, 96, 107, 141, 250, 307], що в трубобетоні бетон та сталь значно підвищують несучу здатність один одного. Труба виконує функції як поздовжнього так і поперечного армування. При цьому робота труби в поперечному напрямку перешкоджає розвитку поздовжньо напрямлених мікротріщин розриву в бетоні, завдяки чому ядро може сприймати поздовжні напруження, які значно перевищують призову міцність. Сталева оболонка в трубобетоні володіє підвищеною як місцевою, так і загальною стійкістю, при цьому вона виявляється здатною отримувати значні поздовжні деформації без втрати несучої здатності. Бетон внаслідок сприятливих умов твердіння в об'ємі не має деформацій усадки, а його міцність та однорідність значно підвищується.

Але існує ціле коло питань, які мають неоднозначне трактування. Так не має узгодженості між різними дослідниками про визначення граничних станів

трубобетонних елементів [250]. Відомо, що після досягнення матеріалом оболонки межі плинності трубобетонний елемент може сприймати ще близько 20–40% навантаження, хоча при цьому спостерігаються значні деформації. Зруйнувати трубобетонний елемент у прямому сенсі цього слова неможливо, за виключенням зразків з дуже тонкостінних труб, коли при досить великих деформаціях з'являються поздовжні тріщини в оболонці. В інших випадках трубобетонний зразок деформуються в „гармошку”, але продовжує сприймати навантаження.

Отже, в трубобетонних елементах, згідно [250], можна відмітити три стадії напружено-деформованого стану, за якими в тій чи іншій мірі можна судити про їх несучу здатність:

- досягнення поздовжніми деформаціями якоїсь заданої максимально можливої величини деформації;
- досягнення в трубі-оболонці напружень плинності;
- повна втрата несучої здатності трубобетонного елемента.

Обмежити несучу здатність центрально-стиснутих трубобетонних елементів граничною деформацією $\varepsilon_{\text{нозд}}=220 \times 10^{-5}$ (приблизно в цей момент сталь переходить у стан текучості) запропонував В.А. Росновський [208]. В роботах В.Ф. Мареніна [150] за граничний стан приймається момент досягнення поперечними напруженнями оболонки межі текучості, а при виведенні розрахункових формул використовується одна з теорій міцності бетону. Недоліком такого підходу є наближеність опису дійсної роботи бетонного ядра будь-якою теорією міцності бетону, а також недовикористання міцності при застосуванні високоміцних сталей. Р.С. Санжаровським в [215] запропоновано трактувати граничний стан як досягнення поздовжньою деформацією стержня деформацій початку текучості матеріалу оболонки на діаграмі $\sigma - \varepsilon$. А для сталі, які не мають явно вираженої площадки текучості, приймати $\varepsilon_m = \sigma_y / E + 0,02$. Але як показують досліді [250] у зразках, заповнених високоміцним бетоном, спостерігається відсутність плинності елемента в цілому при досягненні значних поздовжніх деформацій.

Вести розрахунок трубобетонних елементів, приймаючи за граничний стан руйнуюче навантаження, з використанням розрахункових характеристик матеріалів і навантажень запропоновано в роботі [141]. В той же час рекомендується враховувати і умови, в яких обмежуються деформації трубобетонного елемента (досягнення сталевією трубою межі текучості), але вже з використанням нормативних характеристик матеріалів та навантажень. При вирішенні питання, який стан трубобетонних елементів вважати граничним при розрахунках на міцність, на думку В.П. Митрофанова [165-167], керівним фактором є суттєва пластична робота таких елементів в стадії граничного стану (повної втрати несучої здатності трубобетонного елемента), що свідчить про можливість розгляду цього стану як пластичного та застосування теорії пластичності.

З визначенням граничного стану досягненням текучості металом труби-оболонки погоджується цілий ряд дослідників: Л.І. Стороженко [250], В.М. Кебенко [103], В.М. Сурдін [307], Л.К. Лукша [141] та інші. Але при випробуванні трубобетонних зразків досить важко точно зафіксувати цей момент, який характеризується появою ліній Людерса-Чернова. За даними експериментальних досліджень граничні поздовжні деформації складають $\epsilon_{\text{позд}}=200...250 \times 10^{-5}$. Тому в роботі [250] запропоновано вважати умовою-параметром визначення граничного стану трубобетонних елементів граничну величину відносної деформації, що призначається з умов експлуатації.

Також неоднозначно трактується і питання про вплив різних параметрів (міцності оболонки й ядра) на несучу здатність. Якщо усі дослідники погоджуються, що вплив міцності сталі на міцність трубобетону суттєвий, то щодо питання міцності бетону погляди розділяються. Так О.А. Долженко [78], Л.І. Стороженко, Сурдін В.М. [244] вважають, що в трубобетоні більш ефективно застосовувати бетони невисоких класів, а Ю.В. Сітніков [230] навпаки вважає більш ефективним використання високих класів бетону та сталей низької міцності. Щодо відносної товщини стінки, то тут погляди різних дослідників не співпадають: більшість авторів вважають, що чим тонша стінка труби, тим ефективніше робота трубобетону, але протилежної думки дотримуються автори роботи [320].

Основні методи розрахунку трубобетонних елементів. Нині теорія розрахунку залізобетонних конструкцій досягла великого розвитку. В роботах Є.М.Бабича [9-13], В.М.Байкова [15, 16], А.М.Бамбури [17, 18], А.Я.Барашикова [19-21], О.Я.Берга [28], З.Я.Бліхарського [31], Г.І.Бердичевського [29], В.М.Бондаренка [32], М.С.Боришанського [34], О.О.Гвоздева [57-61], Ю.В.Зайцева [87], Ю.П.Гуші [88], О.С.Залесова [89], М.І.Карпенка [101], Ю.А.Климова [116-118], В.П.Митрофанова [164], А.М.Павлікова [179], В.Г.Піскунова [181], С.І.Рогового [205-207], К.В.Сахновського [218], М.І.Тимофєєва [314], О.Ф.Яременка [343, 344] та інших на основі експериментальних досліджень розроблені глибокі теорії, що дозволили розробити надійні інженерні методи розрахунку залізобетонних конструкцій. Перспективи подальшого розвитку теорії залізобетону окреслені в [175, 197, 198]. Існують вітчизняні та міжнародні документи щодо проектування залізобетонних конструкцій [121, 326] та практичні вказівки щодо розрахунку залізобетону [146, 162, 163, 188]. Таким чином існуючі теорії розрахунку дають можливість проектувати надійні залізобетонні конструкції з урахуванням дійсних фізико-механічних властивостей складових матеріалів. При цьому існує однозначне трактування граничного стану залізобетонних елементів: його руйнування.

Неоднозначне трактування дослідниками граничного стану й специфіки роботи трубобетонних елементів та відсутність нормативних документів, присвячених проектуванню конструкцій з трубобетону, призвело до появи великої кількості методик його розрахунку. В залежності від основних

передумов, які закладались різними авторами в основу розрахункових формул, відомі методи розрахунку можна поділити три групи.

I-ша група. До цієї групи можна віднести розрахункові пропозиції Г.П. Передерія, В.А. Росновського, А.Ф. Ліпатова, Н.Ф. Скворцова, А.І. Кікіна, Р.С. Санжаровського, В.А. Трулли, Л.І.Стороженка [107, 139, 181, 208, 231, 250]. Всі вони побудовані на принципі суперпозицій, тобто несуча здатність трубобетонного елемента складається з суми двох зусиль – в бетонному ядрі та в трубі, яка працює лише в осьовому напрямку, а підвищення несучої здатності враховується введенням коефіцієнтів ефективності роботи. Узагальнено формулу для визначення несучої здатності стиснутого трубобетонного елемента можна представити у вигляді:

$$N_{тб} = \alpha R_b A_b + \beta R_y A_s, \quad (1.1)$$

де $R_b A_b$, $R_y A_s$ – несуча здатність бетонного ядра та сталеві оболонки відповідно;

α та β – коефіцієнти ефективності роботи сталі та бетону.

Згідно рекомендаціям Г.П. Передерія [181] $\alpha = R_{28}/R_b$, $\beta = 2,2$. За даними В.А. Росновського та А.Ф. Ліпатова [139, 208] $\alpha = 1 + 180/R_b$, $\beta = 1$. Н.Ф. Скворцов [231] пропонує приймати також $\beta = 1$, а коефіцієнт ефективності роботи бетону визначати за формулою $\alpha = K_D + K_M - 1$. Коефіцієнт $K_D \geq 1$ залежить від довжини елемента та визначається за графіком, що наведений в [231], згідно якого для коротких зразків складає від 3,4 (для марки бетону 100) до 1,9 (для марки бетону 500). Коефіцієнт поперечних розмірів K_M залежить від діаметру труби, тобто масштабного фактору та змінюється в межах від 0,75 до 2.

В [107] запропоновано розрахунковий опір бетону в трубобетоні визначати залежно від коефіцієнту однорідності бетону та статистичної залежності σ_b від кубикової міцності бетону, а β приймати рівним 1.

II-га група. Друга група методик базується на гіпотезі, що несуча здатність трубобетонного елемента обумовлюється міцністю ядра, а роль труби зводиться лише до створення реактивного бічного тиску. В цьому випадку вважається, що труба не чинить опір в осьовому напрямку. Такої думки притримуються О.О. Гвоздев, О.Н. Алперіна, А.Ф. Маренін, А.Б. Ренський, Я.П. Семененко, В.М. Фонов, І.Г. Людковський [3, 57, 150, 192, 202, 220, 320].

Розрахункова формула В.Ф. Мареніна [150] отримана з умови міцності О.Я. Берга [28] та умови початку пластичності Губера–Мізеса–Генки, вплив обойми автором пропонується визначати за допомогою коефіцієнта β , що залежить від класу бетону: $\beta = 0,65 + 0,002 R_b$. Також В.Ф. Маренін рекомендує і формулу (1.1) з коефіцієнтами $\alpha = 1$ та $\beta = 1,4 - 2,6$ (для марок бетону M100 – M600).

Розрахункові пропозиції Я.П. Семененко [220] в загальному вигляді описуються формулою (1.1), в якій $\alpha = 1$, а $\beta = \ln(D/d) \operatorname{tg}^2 \alpha$, при цьому $\operatorname{tg}^2 \alpha = 2,6 - 6,15$ для бетонів $M35 - M800$ відповідно.

За пропозиціями О.О. Гвоздева [57] розрахункова формула для визначення несучої здатності негнучкого трубобетонного елемента має вигляд:

$$N = A_b R_b + 2 A_s R_y, \quad (1.2)$$

Формула (1.2) рекомендована для тонкостінних труб.

Аналогічна формула запропонована і в роботі [320]:

$$N = A_b R_b + \alpha A_s R_y, \quad (1.3)$$

де $\alpha = \sqrt{1 + \frac{(K-1)^2}{3}}$, K – коефіцієнт ефективності обтиску бетону

обоймою, який визначається за залежністю:

$$K = 4,8 D^{-0,18} (0,03 \mu^{-0,72} + 1). \quad (1.4)$$

Використання формули (1.4) обмежене наступними інтервалами зміни геометричних та міцнісних параметрів: $0,01 \leq \mu \leq 0,14$, $100 \text{ мм} \leq D \leq 1220 \text{ мм}$, $B20 \leq B \leq B60$.

III-тя група. Третя група базується на допущенні, що в опорі осьовому зусиллю приймають участь бетонне ядро, яке зміцнене поперечним тиском оболонки на бетон, та сталевая труба, що працює як у трансверсальному, так і в осьовому напрямку. Така концепція закладена в формулах О.А. Долженка, Ю.В. Сітнікова, Л.К. Лукші, В.М. Сурдіна, В.М. Кебенка, Л.І. Стороженка та інших [78, 103, 141, 230, 250].

О.А. Долженком [78] рекомендовано два методи розрахунку, один з яких ґрунтується на постійному значенні коефіцієнта $\alpha = 1$ та змінному значенні $\beta = 1,4 - 3$, що є функцією від співвідношення несучої здатності N_b / N_{mp} , яка отримана дослідним шляхом та представлена в табличній формі. В основу іншого методу закладені змінні коефіцієнти формули (1.1), отримані з теорії міцності Бельтрамі, що застосовується як до ядра, так і до оболонки:

$$\alpha = \nu \frac{N_T}{N_b} + \sqrt{(\nu^2 + 0,5\nu - 0,5)(N_{mp}/N_b) + 1} \approx 1,2 - 5$$

$$\beta = \nu \left[1 - 2 \frac{\delta}{d} + \sqrt{1 - 4(1 + 1/\nu)\delta/d} \right] \approx 1 - 2,$$

де ν – коефіцієнт поперечної деформації трубобетону в граничному стані, значення якого рекомендується визначати за формулою:

$$\nu = 0,55 + 0,1 \frac{N_{mp}}{N_b}.$$

Л.К. Лукша [141] для розрахунку трубобетонних елементів рекомендує формулу:

$$N = (R_b + K|\sigma_0|)A_b + \sigma_z^s A_s, \quad (1.5)$$

де σ_0 – бічний тиск сталеві труби на бетонне ядро, який обчислюється за формулою:

$$\sigma_0 = -\frac{\sigma_y + nR_b}{n(K - 2\nu_b) - 1} \left[1 - \frac{l}{\beta_m} \frac{n(K - 2\nu_b) - 1}{l + \nu_m} \right]; \quad (1.6)$$

σ_z^s – розрахунковий осьовий опір труби:

$$\sigma_z^s = \sigma_y - \frac{|\sigma_0| \beta_s}{\beta_s - 1}, \quad (1.7)$$

β_s – відносна товщина стінки;

K – коефіцієнт ефективності бокового тиску, для визначення якого в [141] запропонована залежність:

$$K = 10 - 100 \sigma_0 / (R_b + 15 \sigma_0). \quad (1.8)$$

При використанні формули (1.7) треба мати на увазі, що розрахунки повинні виконуватись з великим ступенем точності (тобто геометричні параметри трубобетонного елемента повинні вираховуватись до 0,01 мм), інакше можна отримати від'ємне значення осьового опору. Ця передумова значно ускладнює розрахунки за даною методикою.

В. П. Митрофановим [166, 167] запропонована методика розрахунку міцності трубобетонних елементів варіаційним методом. В основу розрахунку покладено варіаційний метод теорії пластичності з потенціалом Баландіна-Генієва [62] для бетону та Мізеса-Губера-Генкі для сталі труби. Цікавою також є методика розрахунку стиснутих трубобетонних елементів на основі дискретної моделі деформованого твердого тіла, запропонована В.Н. Рудаковим [210].

В роботах Л.І. Стороженка та інших [250] запропонована наступна методика розрахунку трубобетонних елементів. Для визначення коефіцієнтів α та β розглядається напружений стан бетонного ядра та сталеві оболонки в момент досягнення трубобетонним елементом граничного стану. Аналітичним виразом міцності ядра прийнято рівняння міцності О.Я. Берга [27], а для труби-оболонки – умова пластичності Генкі-Мізеса. Несуча здатність трубобетонного елемента визначається за формулою:

$$N = \gamma_{bs} (R_b^* A_b + \gamma_{s2} R_s A_s), \quad (1.9)$$

де γ_{bs} – коефіцієнт, що враховує умови роботи бетону та сталі в трубобетоні, що приймається рівним 1,10;

γ_{s2} – коефіцієнт, що враховує зниження розрахункового опору сталі при складному напруженому стані;

R_b^* – розрахунковий опір бетону в трубобетоні, який визначається залежністю:

$$R_b^* = 0,65 B(1 + 16,1\mu \beta). \quad (1.10)$$

В [250] для визначення ефективності роботи бетону в об'ємі та трубобетонних елементів в цілому з урахуванням об'ємного напруженого стану бетону запропоновано використовувати коефіцієнт ефективності роботи бетону η та коефіцієнт ефективності роботи трубобетонного елемента в цілому m :

$$\eta = \frac{\sigma_{b,u}}{\sigma_b}; \quad (1.11)$$

$$m = \frac{N_u}{(\sigma_y A_s + \sigma_b A_b)}, \quad (1.12)$$

де $\sigma_{b,u}$ – поздовжні напруження в бетоні в момент руйнування зразка;

N_u – несуча здатність елемента.

В [250] запропонована емпірична залежність коефіцієнта η від співвідношення товщини стінки δ та діаметра труби d :

$$\eta = 35,64 \frac{\delta}{d} + 1,4. \quad (1.13)$$

Коефіцієнт m на основі статистичної обробки результатів чисельних експериментів запропоновано визначати:

$$m = \frac{\delta d}{(0,733 \frac{\delta}{d} + 9,00173)}. \quad (1.14)$$

Не дивлячись на багаторічні дослідження, які супроводжувались інтенсивним впровадженням сталезалізобетону у будівництво, вітчизняні нормативні документи не містять вказівок щодо розрахунку таких елементів. Зараз в Україні діють застарілі нормативні документи, в яких зовсім не висвітлене питання проектування конструкцій з трубобетону: СНиП 2.03.01 – 84* „Бетонные и железобетонные конструкции” [236], СНиП 2.05.03–84 „Мосты и трубы” [237], „Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой” [211]. Ці нормативні документи дуже застарілі і не охоплюють все різноманіття сполучення бетону та сталевих прокатних профілів для їх сумісної раціональної роботи. Особливо не пощастило в цьому відношенні трубобетону, на проектування конструкцій з якого відсутні навіть галузеві нормативні документи.

У діючих нормах СНиП 2.03.01 – 84* „Бетонные и железобетонные конструкции” [236] та „Пособие по проектированию бетонных и

железобетонных конструкций из тяжелых и легких бетонов без предварительного напряжения арматуры (к СНиП 2.03.01 – 84*)” [188] висвітлене питання розрахунку залізобетонних елементів з непрямым армуванням, до яких певним чином можна віднести трубобетон.

Розрахунок таких елементів за [188] виконується як і для звичайних залізобетонних згідно з вимогами [236], підставляючи в розрахункові формули замість R_b приведену призову міцність бетону $R_{b,red}$, яка дорівнює:

$$R_{b,red} = R_b + 2\mu_{cir} R_{s,cir} \left(1 - \frac{7,5e_0}{d_{ef}} \right), \quad (1.15)$$

де $R_{s,cir}$ – розрахунковий опір арматури;

μ_{cir} – коефіцієнт армування.

При цьому слід мати на увазі, що залізобетонні елементи з непрямым армуванням це, перш за все, елементи, армовані спіральною або кільцевою арматурою. Трубобетон до такого типу конструкцій можна віднести лише умовно. Окрім цього при використанні розрахункової формули (1.15) існують обмеження – коефіцієнт армування слід приймати не більшим за 4%.

Варто також зауважити, що ряд дослідників пропонують удосконалити формулу (1.15). Так, наприклад враховувати ефект обойми при підсиленні залізобетонних елементів хомутами рекомендується обчислюючи приведену призову міцність за формулою:

$$R_{b,red} = R_b + m_x \varphi \mu_{xy} R_s, \quad (1.17)$$

де $m_x = 0,7$ – коефіцієнт ефективності непрямого армування попередньо-напруженими хомутами.

За результатами експериментальних досліджень [53, 64, 312, 327] підвищення міцності за рахунок „ефекту обойми” становить до 48%, а в [250] – до 64%.

В [239] запропонована наступна формула для визначення приведенної призової міцності для елементів з непрямым армуванням:

$$R_{b,red} = nR_b + \mu_{cir} R_s, \quad (1.18)$$

де

$$n = \frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + p}; \quad q = 1 - \frac{R_{bt}}{R_b};$$

$$p = \left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right) \frac{3\mu_{cir} R_{s,cir}}{R_b} + \frac{R_{bt}}{R_b}.$$

За кордоном в різних країнах світу існують національні норми розрахунку сталезалізобетону [356, 360, 361], в той же час у Європі вже більше десяти років

діє міжнародний нормативний документ Eurocode 4 [363], присвячений проектуванню сталезалізобетонних конструкцій. Згідно [п. 4.8.3.3, 363] ефект об'єми враховується лише для трубобетонних елементів, для яких допускаються пластичні деформації сталеві труби. У цьому разі замість $0,85 f_{ck}$ – нормативного значення циліндричної міцності бетону – допускається прийняти f_{ck} без врахування понижуючого коефіцієнту $0,85$. Підвищення міцності бетону в трубі враховується лише для коротких трубобетонних елементів з відносною гнучкістю $\bar{\lambda} \geq 0,5$.

Тоді пластична гранична нормальна сила при напруженнях стиску у трубобетоні дорівнює:

$$N_{pl.Rd} = A_a \eta_2 \frac{f_y}{\gamma_{M_a}} + A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \left(1 + \eta_1 \frac{t}{d} \frac{f_y}{f_{ck}} \right), \quad (1.19)$$

де A_a , A_c – площі поперечного перерізу сталі та бетону відповідно;

f_y , f_{ck} – межі міцності відповідно сталі і бетону;

γ_{M_a} , γ_c – коефіцієнти надійності складових в граничному стані за несучою здатністю.

Коефіцієнти η_1 та η_2 при ексцентриситеті прикладання навантаження $e > d/2$ приймаються рівними нулю, а при $0 < e < d/2$ отримуються за формулами:

$$\eta_1 = \eta_{10} \left(1 - \frac{10e}{d} \right) \quad \text{та} \quad \eta_2 = \eta_{20} + (1 - \eta_{20}) \frac{10e}{d}, \quad (1.20)$$

де

$$\eta_{10} = 4,9 + 18,5\bar{\lambda} + 17\bar{\lambda}^2, \quad (\text{але} \geq 0);$$

$$\eta_{20} = 0,25(3 + 2\bar{\lambda}), \quad (\text{але} \leq 1).$$

В наукових дослідженнях Л.І.Стороженка [250, 253] була розроблена теорія об'ємного напружено-деформованого стану труби бетонного елемента з урахуванням пластичних деформацій, яка дає можливість описати роботу конструкції з моменту початку завантаження до її руйнування. В основу запропонованої методики покладені фундаментальні розробки І.Н.Ахвердова [8] з основ фізики бетону, М.І.Мухелішвілі [170] з математичної теорії пружності та А.А.Льюшина [98] з теорії пластичності. При вирішенні задач, пов'язаних зі стійкістю стиснутих гнучких елементів були враховані розробки [24, 45, 70, 204].

В роботах О.П.Воскобійик [49-52] здійснений імовірнісний аналіз роботи стиснутих трубобетонних елементів. Проведені експериментальні дослідження мінливості геометричних розмірів та фізико-механічних характеристик трубобетону, зміни цих властивостей по висоті довгих елементів при вертикальному бетонуванні та виникненні випадкових ексцентриситетів

прикладання стискаючого навантаження, викликаного фізичною та геометричною неоднорідністю таких елементів.

Під керівництвом Л.І.Стороженка проведені ряд експериментально-теоретичних досліджень по вивченню особливостей роботи трубобетонних елементів із іншими перерізами (рисунок 1.5). Так в роботах В.І.Сфіменка [41], О.Л.Тарановського [311], С.О.Тесьолкіна [313] досліджені особливості роботи трубобетонних елементів із центрифугованим ядром, при цьому використані результати дослідження центрифугованого залізобетону [24]. Виявлені позитивні якості цих елементів, зокрема економія бетону та його підвищена міцність завдяки центрифугуванню та в умовах роботи при трьохсторонньому стисненні. Роботи Г.В.Головка [62] і В.В.Васюти [42] були присвячені стиснутим конструктивним елементам із тонкостінних труб квадратного перерізу, заповнених бетоном. Були досліджені особливості роботи цих елементів як при осьовому, так і при позацентровому стисненні. Цікаву роботу виконала В.Б.Васюта [41], яка дослідила особливості роботи трубобетонних елементів із оболонками та ядрами з різних матеріалів. Ряд робіт були присвячені дослідженню роботи стиків, огловків та вузлів з'єднання з фундаментами стиснутих трубобетонних елементів [128, 180, 315].

Особливістю всіх відомих досліджень трубобетонних елементів є те, що в результаті їх проведення робиться категоричний висновок: на всіх етапах завантаження в цих конструкціях при стисненні бетон і сталь працюють сумісно, тобто в цьому випадку не треба застосовувати спеціальних анкерних засобів. Але для забезпечення сумісної роботи бетону й сталевий оболонки є цікавою пропозиція [91] про склеювання бетонної суміші та металу за допомогою спеціального клею при виготовленні конструкції.

Слід відмітити, що всі досліджені на даний час типи трубобетонних конструкцій ідеально відповідають вимогам, що ставляться до залізобетонних конструкцій в незнімній опалубці.

Особливості роботи сталезалізобетону. Науковий прогрес у галузі будівельних конструкцій серед інших факторів, полягає в пошуку нових сполучень сталі та бетону для їх спільної, раціональної роботи в будівельних конструкціях. До таких конструкцій належить сталезалізобетон, до складу якого входять прокатні профілі (сталевий лист), стрижнева арматура і бетон.

Історія розвитку сталезалізобетону свідчить про пошуки напрямків, направлених як на підвищення вихідних характеристик міцності матеріалів (високоміцні сталі й бетони), так і на виявлення найбільш раціональних форм поєднання бетону і сталі при їх сумісній роботі. Вже було доведено [250], що найбільш ефективно бетон працює в об'ємному напруженому стані, що в свою чергу призвело до різних видів відповідного армування в трубобетоні.

В нашій країні накопичений певний досвід із дослідження та впровадження сталезалізобетонних конструкцій. Побудовані несучі конструкції різних будівель і споруд із застосуванням сталезалізобетону, таких як балок та ригелів зі стрічковим армуванням, брускові конструкції, залізобетонні плити по