



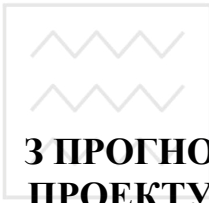
Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства та
природокористування

Л. Й. Дворкін, О. М. Бордюженко,

В. В. Житковський



Національний університет
водного господарства
та природокористування

**РЕКОМЕНДАЦІЇ
З ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА
ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ РЕАКЦІЙНО-
ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ**

Рівне-2020



Національний університет
водного господарства
та природокористування

УДК 666.9:691.32

Д24

Рецензенти:

Трач В.М., доктор техн. наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне;

Кузю М.Т. доктор техн. наук, професор Національного університету водного господарства та природокористування, м. Рівне.

Рекомендовано науково-технічною радою Національного університету водного господарства та природокористування.

Протокол № 135 від 24 листопада 2020 р.

Л. Й. Дворкін, О. М. Бордюженко, В. В. Житковський
Д24 Рекомендації з прогнозування властивостей та проектування складів реакційно-порошкових бетонів : рекомендації. – Рівне : НУВГП, 2020. – 92 с.

ISBN 978-966-327-489-8

У рекомендаціях наведена характеристика вихідних компонентів, комплекс експериментально-статистичних моделей, що дозволяє прогнозувати властивості реакційно-порошкових бетонів та проектувати їх склади.

УДК 666.9:691.32

ISBN 978-966-327-489-8 © Л. Й. Дворкін, О. М. Бордюженко,
В. В. Житковський, 2020
© НУВГП, 2020



ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	6
1.1 Реакційно-порошкові бетони – ефективний вид дрібнозернистого бетону	6
1.2. Застосування реакційно-порошкових бетонів при зведенні відповідальних конструкцій та захисних споруд	7
1.3. Основні властивості реакційно-порошкових бетонів	11
1.4. Вихідні матеріали для реакційно-порошкових бетонів	12
1.5. Особливості технології виготовлення реакційно-порошкових бетонів	14
2. РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОГЕННИХ ПРОДУКТІВ	15
2.1. Вплив технологічних факторів на властивості реакційно-порошкових бетонів	15
2.2. Проектування складу реакційно-порошкового бетону	28
2.2.1. Вибір вихідних матеріалів	28
2.2.2. Розрахунок складу РПБ з використанням номографічного методу	34
2.2.3. Розрахунок складу РПБ з використанням математичних методів	37
3. ДИСПЕРСНО-АРМОВАНІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ	39
3.1. Загальні відомості	39
3.2. Властивості	44
3.2.1. Реакційно-порошкові фібробетони	44
3.2.2. Реакційно-порошкові фібробетони із композиційним дисперсним армуванням	55
3.2.3. Реакційно-порошкові бетони з дисперсним армуванням сталевими сітками	64
3.3. Проектування складів реакційно-порошкових фібробетонів	71
3.3.1. Загальні положення з розрахунку складів РПФБ ...	71



3.3.2. Розрахунок складу РПФБ номографічним методом	75
3.3.3. Розрахунок складу РПФБ за критерієм мінімальної вартості	79
ДОДАТОК А. Цементи, що виготовляються в Україні	84
ДОДАТОК Б. Розрахунок складу реакційно-порошкового бетону за допомогою програми «FORT-RPCConcrete»	86
ЛІТЕРАТУРА	92





ВСТУП

На сучасному етапі розвитку будівельної технології все ширше застосовуються бетони нового покоління. Їх відмінністю є включення в склади бетонних сумішей суперпластифікаторів, дисперсних активних мінеральних та інших добавок, що дозволяють в широкому діапазоні регулювати їх властивості. До бетонів нового покоління належать і реакційно-порошкові бетони (РПБ), що мають ряд позитивних особливостей, і дозволяють широко застосовувати поряд з природною також техногенну сировину.

Дані Рекомендації складені за результатами досліджень, що виконані на кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства Національного університету водного господарства та природокористування. Вони дозволяють визначати необхідні технологічні параметри для отримання РПБ з заданими властивостями, проектувати склади, а також при відомих складах бетонних сумішей прогнозувати їх властивості.

Для зведення та захисту відповідальних конструкцій можуть бути застосовані дисперсно-армовані РПБ металевою, неметалевою та комбінованою фіброю, технологічні параметри яких та методика проектування складів наведені в Рекомендаціях.

В Рекомендаціях наведені конкретні приклади проектування складів реакційно-порошкових бетонів (РПБ) з заданими властивостями.

Автори сподіваються на використання Рекомендацій в будівельній практиці.



1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1. Реакційно-порошкові бетони – ефективний вид дрібнозернистого бетону

Реакційно-порошковий бетон (РПБ) (Reactive Powder Concrete (RPC)) був розроблений у Франції у 90-х роках 20 століття і є найбільш ефективним різновидом дрібнозернистого бетону, котрий володіє підвищеною однорідністю, міцністю та деформативністю. Для такого бетону типова міцність при стиску сягає 150 МПа і вище. Поряд високою міцністю для РПБ характерний також високий показник тріщиностійкості, що характеризується співвідношенням міцності при стиску до міцності при згині. Такий показник для РПБ знаходиться у межах від 3,5 до 5, тоді як у високоміцних бетонах – 8...10. Такі високі показники можуть бути корисні з позиції досягнення підвищеної ударної міцності, необхідної для використання у захисних та фортифікаційних спорудах. Поєднання надвисокої міцності та високої деформативності у реакційно-порошковому бетоні забезпечується додатково внаслідок дисперсного армування короткими сталевими волокнами.

Високі механічні характеристики РПБ пояснюються їх високою однорідністю внаслідок відсутності крупних частинок заповнювача, підвищеною щільністю, що забезпечується оптимальним зерновим складом суміші компонентів, покращенням властивостей цементуючої матриці введенням високоактивних мінеральних добавок і зниженням водов'язучого відношення за рахунок використання ефективних суперпластифікаторів.

Переваги РПБ порівняно зі звичайним бетоном:

1. Високі міцнісні властивості, які дають можливість знизити масу конструкцій, що працюють при статичних навантаженнях за рахунок виробництва більш тонких конструкцій, зручних до транспортування. Це дозволяють зменшити загальні витрати і збільшити корисну площу у висотних будівлях;



2. Висока деформативність і поглинання енергії забезпечують більшу надійність конструкції при сейсмічних впливах; здатність до поглинання енергії РПБ підвищує можливий прогин колон, шарнірних балок і стінових конструкцій;

3. Висока довговічність, що забезпечує тривалий термін служби. РПБ має високу водо- і паронепроникний, практично не піддається вилугуванню, проникненню хлоридів і сульфатів. Має підвищену стійкість до стирання, що забезпечує тривалий термін служби поверхні мостів та промислових підлог, підвищена корозійна стійкість забезпечує захист в районах із суворими кліматичними умовами;

4. Відсутність сталеві арматури зменшує затрати праці та забезпечує більші архітектурні можливості;

5. Зменшення товщини бетонних елементів призводить до економії матеріалів та зниження витрат;

1.2. Застосування реакційно-порошкових бетонів при зведенні відповідальних конструкцій та захисних споруд

Ефективність РПБ дає можливість використовувати його у відповідальних спорудах. РПБ були використані при будівництві автомобільних та пішохідних мостів. РПБ завдяки підвищеній міцності, довговічності і радіаційної стійкості може бути використаний як надійний контейнер для радіоактивних відходів атомних електростанцій. РПБ може застосовуватись для термічного захисту будівельних конструкцій, оскільки забезпечує кращу вогнестійкість, ніж високоміцний чи звичайний бетон. РПБ дозволяє розширити можливості використання бетону при виготовленні нових тонкостінних конструкцій. При використанні РПБ можливе повне або часткове усунення використання арматурних стержнів за рахунок дисперсного армування короткими сталевими волокнами; за рахунок високих механічних характеристик РПБ може бути зменшена товщина бетонних елементів.



Крім застосування РПБ при зведенні тонкостінних будівельних конструкцій, він може бути використаний як матеріал для ремонту бетонних споруд. Матеріал для ремонту повинен мати високу текучість, щоб повністю заповнити тріщини і пори. У той же час він повинен мати такий же чи вищий модуль пружності. Для використання РПБ в якості матеріалу для ремонту важливими властивостями є такі як усадка, повзучість, коефіцієнт деформації, коефіцієнт термічного розширення, міцність на розрив, адгезія і морозостійкість.

Одним із напрямків можливого застосування РПБ – є матеріали для різного роду захисту (постріли, вибухи, радіоактивні речовини тощо).

РПБ-контейнери можуть бути використані як високощільні ємності для небезпечних відходів внаслідок низької пористості РПБ, високих механічних характеристик і довговічності. РПБ може використовуватися як надійний контейнер для радіоактивних відходів АЕС завдяки відмінній міцності і довговічності. Через низьку проникність і високу стійкість до хімічних впливів РПБ може застосовуватись у якості водонепроникних контейнерів з небезпечними рідинами.

Металеві сплави або композитні конструкції, які в даний час використовуються в охоронних системах банків, не задовольняють новим вимогам безпеки і ваги. РПБ можуть забезпечити захист, який можна порівняти з дорогими сплавами.

Дисперсно-армований РПБ, відомий під комерційною назвою DUCON® використовується у захисних бетонних елементах проти динамічних впливів, таких як вибухи, бомбардування, удари або землетруси. Для використання РПБ як захисного бетону вирішальне значення має взаємозв'язок деформативних та міцнісних властивостей. За допомогою DUCON® Security можна ефективно підвищити захист будівель від руйнівних дій за рахунок використання тонкостінних елементів. На відміну від звичайного залізобетону, який є неміцним і крихким проти динамічних впливів, РПБ поводить себе надзвичайно стабільно. Такий бетон, завдяки високим деформативним властивостям значно менш чутливий до виду



вплив, що діють на будівельну конструкцію. Встановлено, що дисперсно-армований РПБ витримує вибухи, бомбардування, землетруси та їх поєднання при товщині не більше 4...5 см.



Рис. 1.1. Результат випробувань вибухом залізобетонних плит, підсилених і не підсилених за допомогою РПБ DUCON®

Властивості матеріалу, такі як висока несуча здатність у поєднанні з надзвичайною деформативністю, дозволяють поглинати найбільш динамічні впливи. Порівняно із залізобетоном, завдяки своїй підвищеній стійкості дисперсно-армований РПБ дає можливість запроектувати конструкцію стійку до руйнування, товщина і маса якої у 2 р. нижча.



Рис. 1.2. Результати випробування залізобетонної плити (а) та плити з РПБ (б) шляхом контактної детонації



Використання дисперсно-армованого РПБ дозволяє також забезпечити захист людей від уламків бетонних конструкцій, що утворюються при вибухах чи інших динамічних впливах. Великі приміщення та зали з самонесучими перекриттями, такі як спортивні зали, громадські приміщення, виробничі приміщення або будівлі з високими вимогами безпеки, такі як центри обробки даних, вимагають високих вимог до безпеки конструкцій. Стельові конструкції, виготовлені зі звичайного залізобетону, утворюють, у разі руйнування елементів (наприклад, при вибухах), небезпечні для людей та обладнання уламки. Підкріплення залізобетонних плит захисним шаром з РПБ може призвести до значного поліпшення безпеки. Випробування показали, що шари захисту від уламків, виготовлені з РПБ, можуть поглинати локальні руйнування залізобетонних елементів при товщині шару до 1,5 см. Захисний шар дисперсно-армованого РПБ діє як захисна сітка, що запобігає падінню уламків (рис. 1.1–1.3).



Рис. 1.3. Залізобетонна плита із захисним шаром РПБ, для захисту від утворення уламків при руйнуванні



1.3. Основні властивості реакційно-порошкових бетонів

Легкоукладальність. За рахунок використання дисперсних компонентів та підвищеної кількості суперпластифікатів суміш РПБ характеризується високою текучістю (близько 50...60 см за розпливом стандартного конуса).

Міцність на стиск. РПБ має міцність при стиску зазвичай від 150 до 200 МПа при змішуванні і твердінні при звичайних температурах. Висока міцність забезпечується при досягненні певного ступеня гідратації та низькому В/Ц. Частинки негідратованого цементу та мікрокремнезему (які діють як наповнювачі) сприяють покращенню механічних властивостей бетону на рівні мікроструктури. Міцність РПБ суттєво залежить від термічної обробки під час твердіння. Міцність при стиску суттєво зростає при підвищенні температури від 23 до 150° С внаслідок прискорення процесу гідратації і також підвищується при підвищенні температури від 200 і 300° С внаслідок пуцоланової реакції аморфного кварцу, що викликає утворення дуже щільних гідратів силікату кальцію (C-S-H) у вигляді ксонотліту.

Модуль пружності. РПБ має значення модуля Юнга, що перевищує 50 ГПа, і може досягати 75 ГПа для тих композицій, що мають максимальну середню густину. Модуль пружності РПБ збільшується непропорційно до міцності на стиск залежно від термінів твердіння.

Морозостійкість. Завдяки високій щільності і міцності РПБ відмінно працює в умовах заморожування і відтавання.

Усадка. У ранньому віці основними видами усадки РПБ є аутогенна, термічна і повітряна усадки. Аутогенна усадка безпосередньо пов'язана з гідратацією цементу. Це макроскопічне зменшення об'єму цементних матеріалів при гідратації цементу після первинної укладки, що починає розвиватися рівномірно і ізотропно у перші години після формування бетону (до 24 годин). Зі зниженням В/Ц і збільшенням вмісту мікрокремнезему аутогенна усадка зростає.



Під час твердіння бетону під впливом сухого середовища починає розвиватися повітряна усадка.

1.4. Вихідні матеріали для реакційно-порошкових бетонів

Для отримання РПБ використовуються дрібні порошки, такі як кварцовий пісок, мелений кварц і мікрокремнезем з розміром частинок від 0,1 до 600 мкм. Розподіл зерен різних порошків ретельно оптимізується для досягнення сумішшю підвищеної щільності матриці. Для зменшення водо-в'язучого відношення (В/Вяз) від 0,4...0,5 до 0,2 використовуються суперпластифікатори, зазвичай полікарбоксилатного чи поліакрилатного типу. Для підвищення деформативності використовуються високоміцні сталеві або неметалеві волокна (скляні, базальтові тощо).

Цемент. Вміст цементу в РПБ, як правило, досягає 700-1200 кг/м³, тому вибір цементу може бути критичним фактором, що впливає на якість РПБ. Для РПБ необхідний низькоалюмінатний чи сульфатостійкий цемент. Високий вміст цементу у складі РПБ призводить до утворення великої кількості тепла під час гідратації і до утворення термічних тріщин. Значний об'єм цементного тіста може викликати помітні усадочні деформації та набрякання при зміні вологості бетону. Для уникнення таких проблем в РПБ прийнятним рішенням може бути часткова заміна цементу мінеральними добавками.

Мікрокремнезем. Відомо, що використання високодисперсного діоксиду кремнію може значно поліпшити механічні властивості та довговічність бетону, а також мікроструктуру цементного каменю за рахунок пуцоланової реакції з гідратними продуктами. Високий вміст аморфного діоксиду кремнію SiO₂ є основними причинами його високої пуцоланової активності. Розмір частинок мікрокремнезему 0,1...1 мкм, що в 10...100 разів менше, ніж розмір зерен цементу. При гідратації він утворює низькоосновні гідросилкати



C-S-H, що є результатом його взаємодії з $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Кремнезем має в РПБ три основні функції: заповнення пустот між зернами цементу, покращення реологічних характеристик за рахунок ефекту змащення, що виникає внаслідок ідеальної сферичної форми частинок, і дозволяє отримати вторинні гідрати пуцолановою реакцією з вапном, що утворюється в результаті гідролізу клінкепних мінералів при їх гідратації.

Гідроксид кальцію, що утворюється при гідратації, займає 20...25% від об'єму продуктів гідратації. Додаткові гідросилікати кальцію (C-S-H), сформовані в цементній матриці викликають її зміцнення і ущільнення, підвищення однорідності структури бетону. Враховуючи ефект наповнювача, оптимальна частка мікрокремнезему становить близько 30% від цементу.

Мелений кварц. Наявність дрібних частинок мінеральних домішок у бетонній суміші призводить до значного покращення реологічних властивостей, таких як зв'язність і легкоукладальність. Мелений кварц, це мінеральна домішка, що допомагає зменшити водовідділення і розшарування.

Суперпластифікатори. Найбільш ефективними СП для РПБ є диспергуючі ПАР на основі поліакрилату та полікарбоксилатних ефірів. Поліакрилатні СП спричиняють деяке прискорення тужавлення і твердіння цементу, на відміну від них полікарбоксилатні добавки навпаки мають ефект сповільнення, який дозволяє подовжити життєздатність бетонних сумішей.

Дисперсне армування. Найбільшим недоліком високоміцних бетонів є висока крихкість. За рахунок включення сталевих чи інших волокон у матрицю РПБ деформативність суттєво підвищується. Додавання невеликої кількості волокон (в межах 1...6% за об'ємом) до бетонної суміші має відносно незначний вплив на міцність але суттєво підвищує ударну в'язкість бетону. Для РПБ рекомендується використовувати сталеві волокна, що мають довжину 12...15 мм і діаметром від 0,15 до 0,2 мм. З економічної точки зору оптимальною кількістю сталевих фібри є вміст близько 2% за об'ємом. Зі збільшенням вмісту сталевих волокон зростає міцність на згин відносно



міцності при стиску. При цьому позитивно впливає підвищення відношення довжини до діаметру (L/D) сталевих волокон.

1.5. Особливості технології виготовлення реакційно-порошкових бетонів

У зв'язку з тим, що РПБ містить значну кількість вискодисперсних матеріалів технологія виготовлення вимагає спеціальних способів перемішування. Найбільш ефективною є наступна технологія приготування сумішей для РПБ:

1. Змішування сухих компонентів (на низькій швидкості) протягом 1...3 хв. до досягнення гомогенної суміші;

2. Змішування сухої суміші (при високій швидкості) з половиною необхідної кількості води та суперпластифікатора протягом 3...5 хв.;

3. Додавання залишку води, суперпластифікатора, і перемішування протягом 5...8 хв (при високій швидкості). Загальний час перемішування повинен становити від 10 до 15 хв.

4. Після завершення процесу змішування РПБ виливають у сталеві форми і ущільнюють на вібраційному столі.

5. За необхідності для підвищення міцності можна застосовувати твердіння при тепловій обробці (пропарювання, витримання у гарячій воді).



2. РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОГЕННИХ ПРОДУКТІВ

2.1. Вплив технологічних факторів на властивості реакційно-порошкових бетонів

Оптимальне водов'язуче відношення для РПБ, при якому досягається максимальна міцність, залежить від виду вихідних матеріалів і технологічних параметрів отримання бетону і, як правило, дорівнює 0,2 (рис. 2.1, табл. 2.1).

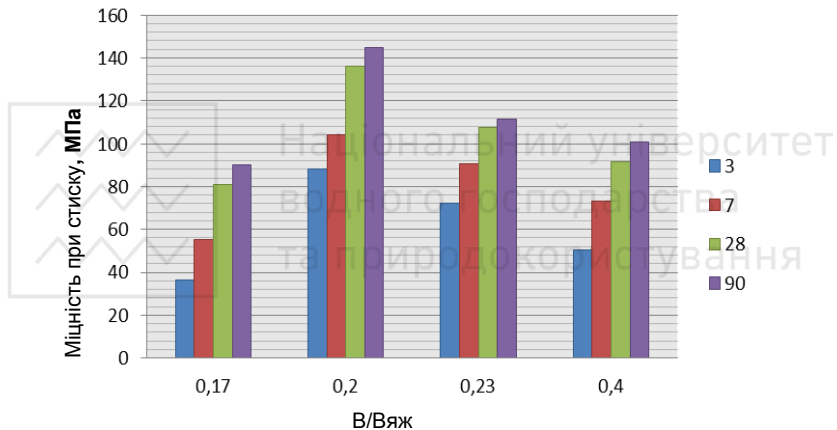


Рис. 2.1. Вплив водов'язучого відношення на міцність РПБ в різному віці (діб)

Таблиця 2.1

Вплив водов'язучого відношення на міцність РПБ
при різній рухомості бетонної суміші

Міцність РПБ при стиску у віці, МПа	Водов'язуче відношення (В/В'яз)			
	0,17	0,2	0,24	0,38
	Рухомість (по Суттарду), мм			
	10	25	30	35
3	36,4	88,1	72,1	50,4



продовження табл. 2.1

7	55,3	104,2	90,7	73,3
28	81,1	136,2	107,6	91,8
90	90,1	145,0	111,5	100,8

При $V/C = 0,2$, застосуванні кварцового піску необхідної фракції, мікрокремнезему і поліакрилатного суперпластифікатора міцність на стиск РПБ в 3-х добовому віці перевищує 80 МПа, досягаючи 60% 28-добової міцності.

Вплив виду і вмісту добавок суперпластифікаторів на міцність РПБ показано в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Вплив виду і вмісту добавок-суперпластифікаторів на міцність РПБ

№	Вид пластифікуючої добавки	Витрата пластифікуючої добавки, % від маси цементу	V/C	Розплив, см	R^1 , МПа	R^7 , МПа	R^{28} , МПа
1	Melflux	2	0,20	30	26,7	100,3	149,6
2	2651F	4	0,19	26	22,3	100,5	142,9
3	PCE-7	2	0,20	30	32,5	99,0	143,2
4		4	0,19	30	10,1	88,9	142,4
5	Muraplast	2	0,24	30	15,7	97,4	116,7
6	FK 6330	4	0,21	28	12,7	91,1	112,2
7	Dynamon	2	0,20	30	35,9	122,3	160,4
8	SP-3	4	0,18	30	17,3	102,1	151,4

Суттєве значення для досягнення максимально можливої міцності має вибір оптимального дозування суперпластифікатора (рис. 2.2).

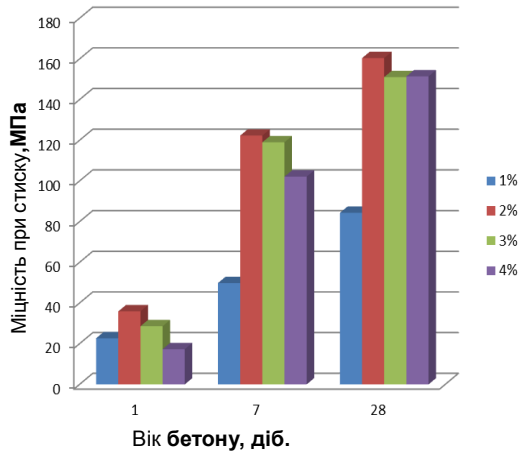


Рис. 2.2. Вплив кількості суперпластифікатора
Dynamon SP-3 на міцність РПБ у різному віці

Мікрокремнеземистий активний наповнювач у складі РПБ можна замінювати іншими високодисперсними мінеральними добавками. Порівняльні експериментальні результати впливу різних мінеральних добавок на водопотребу і міцність РПБ наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3
Вплив мінеральних добавок на водопотребу
і міцність РПБ

Мінеральна добавка	Витрата міне- ральної добавки, кг/м ³	Витрата води, л/м ³	В/Ц	Розплив- на віскози- метрі Сутгарда (см)	Міцність бетону, МПа, у віці, діб		
					1	7	28
Мікрокремне- зем (МК Sika) S=23158 см ² /г	260	240	0,29	12	$\frac{47}{10,1}$	$\frac{95}{25,6}$	$\frac{143}{29,7}$
Мелений квар- цовий пісок S=3786 см ² /г	260	240		20	$\frac{74,5}{18,6}$	$\frac{111,5}{22,3}$	



продовження табл. 2.3

Аспіраційний гранітний пил, $S=2367 \text{ см}^2/\text{Г}$	260	240	0,29	25	$\frac{5,8}{8,19}$	$\frac{71,8}{21,27}$	$\frac{104,4}{25,5}$
Доменний гранульований шлак, $S=2725 \text{ см}^2/\text{Г}$	260	240	0,29	25	$\frac{23,3}{5,83}$	$\frac{80,1}{15,66}$	$\frac{118}{18,8}$
Зола-виносу, $S=2527 \text{ см}^2/\text{Г}$	260	240	0,29	15	$\frac{31,9}{7,12}$	$\frac{81,0}{12,46}$	$\frac{112,9}{21,8}$
Метакаолін $S=10125 \text{ см}^2/\text{Г}$	260	240	0,29	10	$\frac{37,2}{8,8}$	$\frac{88,5}{27,2}$	$\frac{122,4}{26,1}$

Примітка: Над ризикою наведена міцність при стиску, під ризикою – міцність на розтяг при згині.

Заміна мікрокремнезему іншими дисперсними мінеральними добавками призводить до зниження міцності РПБ на стиск у 1 добу на 10 ... 50%, у 28 діб – на 15 ... 27%. Найбільш близькою за ефективністю до мікрокремнезему є добавка метакаолін.

У табл. 2.4–2.7 наведені коефіцієнти математичних моделей водопотреби, водоцементного відношення, та міцності на стиск та згин у віці 1, 7 та 28 діб РПБ з використанням різних видів мінеральних добавок у вигляді поліноміальних рівнянь регресії виду:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 \quad (2.1)$$

Співвідношення між кодованими та натуральними значеннями факторів наведені у табл. 2.8.

Таблиця 2.4

Коефіцієнти експериментально-статистичних моделей властивостей РПБ

Вид мінерального наповнювача: зола виносу

Властивості	Коефіцієнти рівняння регресії									
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
Водопотреба бетонної суміші, л/м ³	234,7	23	10,1	-10,1	0,2	1,7	-7,3	1,5	-1,5	0
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	7,94	0,722	0,19	0,5	0,065	0,318	0,205	-0,1	0	0,113
Міцність при стиску у віці 1 доба, МПа	35,28	3,82	-1,3	1,72	-2,2	-3,03	-1,23	0	0,075	-0,05
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	14,38	0,46	0,66	0,61	0,29	-1,06	-0,34	0,01	0,015	0,045
Міцність при стиску у віці 7 діб, МПа	64,55	4,38	1,32	2,92	1,48	-2,12	-2	0	-3,5	0,95
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	23,21	0,55	-0,25	0,14	0,4	-0,6	-0,13	0	0	0,4
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	112,9	3,1	-0,7	5,5	-1	-5,3	-3,5	0,2	0,4	0,4


 Національний університет
 водного господарства
 та природоохорони

Таблиця 2.5

Коефіцієнти експериментально-статистичних моделей властивостей РПБ

Вид мінерального наповнювача: доменний шлак										
Властивості	Коефіцієнти рівняння регресії									
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
Водопотреба бетонної суміші, л/м ³	246,3	23,3	10,4	-10,5	0,6	2,1	-8,4	1,5	-2	-0,8
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	7,21	0,56	-0,2	0,48	0,095	-0,375	-0,105	0	-0,15	-0,2
Міцність при стиску у віці 1 доба, МПа	27,16	4,2	-3,4	2,1	0,181	-5,02	-0,82	0,05	-0,1	-0,03
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	12,33	0,42	0,45	0,51	0,3	-0,91	-0,3	0,02	-0,2	0,1
Міцність при стиску у віці 7 діб, МПа	75,37	5,7	-4,1	3,1	0,84	-4,96	-0,96	0	0,35	0,95
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	23	0,651	0,35	0,2	0,46	-0,69	0,123	0	0	0,3
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	109,50	6,90	-5,20	3,25	-3,50	-6,60	-2,25	-0,10	0,25	0,30



Таблиця 2.6

Коефіцієнти експериментально-статистичних моделей властивостей РПБ

Вид мінерального наповнювача: мікрокремнезем

Властивості	Коефіцієнти рівняння регресії									
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₁	b ₂₂	b ₃₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃
Водопотреба бетонної суміші, л/м ³	246,3	23,3	10,4	-10,5	0,6	2,1	-8,4	1,5	-2	-0,8
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	11,4	0,30	0,52	0,41	-0,08	-0,17	-0,27	0,15	0,09	0,03
Міцність при стиску у віці 1 доба, МПа	45,1	1,18	2,07	1,61	-0,32	-0,69	-1,08	0,59	0,36	0,13
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	26,8	0,70	1,23	0,96	-0,19	-0,41	-0,64	0,35	0,21	0,07
Міцність при стиску у віці 7 діб, МПа	109,7	2,88	5,04	3,92	-0,79	-1,67	-2,63	1,44	0,86	0,31
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	30,9	0,81	1,42	1,11	-0,22	-0,47	-0,74	0,41	0,24	0,09
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	152,3	4,00	7,00	5,45	-1,10	-2,32	-3,65	2,00	1,20	0,43



Таблиця 2.7

Коефіцієнти експериментально-статистичних моделей властивостей РПБ

Вид мінерального наповнювача: мікрокремнезем

Властивості	Коефіцієнти рівняння регресії									
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
Водопотреба бетонної суміші, л/м ³	246,3	23,3	10,4	-10,5	0,6	2,1	-8,4	1,5	-2	-0,8
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	11,4	0,30	0,52	0,41	-0,08	-0,17	-0,27	0,15	0,09	0,03
Міцність при стиску у віці 1 доба, МПа	45,1	1,18	2,07	1,61	-0,32	-0,69	-1,08	0,59	0,36	0,13
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	26,8	0,70	1,23	0,96	-0,19	-0,41	-0,64	0,35	0,21	0,07
Міцність при стиску у віці 7 діб, МПа	109,7	2,88	5,04	3,92	-0,79	-1,67	-2,63	1,44	0,86	0,31
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	30,9	0,81	1,42	1,11	-0,22	-0,47	-0,74	0,41	0,24	0,09
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	152,3	4,00	7,00	5,45	-1,10	-2,32	-3,65	2,00	1,20	0,43





Таблиця 2.8

Співвідношення між значеннями факторів рівняння (1),
табл. 2.4...2.7 у натуральних та кодованих одиницях

№	Фактори		Рівні варіювання		
	Кодований вид	Натуральний вид	-1	0	+1
1	X ₁	Витрата цементу (Ц), кг/м ³	720	840	960
2	X ₂	Відношення мінеральної добавки (наповнювача) до цементу (Н/Ц)	0,2	0,3	0,4
4	X ₃	Витрата суперпластифікатора (СП) Дупамон SP-3, %	1	1,5	2

Графічні залежності, які ілюструють вплив технологічних факторів на водоцементне відношення та міцність бетону на стиск та згин у віці 1 та 28 діб нормального твердіння наведені на рис. 2.3, 2.4, 2.5, 2.6.

Збільшення витрати цементу та витрати пластифікуючої добавки призводить до зменшення водоцементного відношення РПБ виготовлених із застосуванням, як золи виносу ТЕС так і доменного гранульованого шлаку. При збільшенні вмісту даних речовин у складі РПБ зменшення В/Ц в середньому складає 1...12%. До зростання В/Ц також призводить збільшення вмісту наповнювача, що пов'язано із зменшенням загальної кількості цементу у в'язучому. При використанні золи виносу ТЕС, в якості активного мінерального наповнювача РПБ спостерігається зниження В/Ц в середньому на 5–7% у порівнянні із доменним гранульованим шлаком.

Збільшення витрати цементу та добавки суперпластифікатора Дупамон SP-3 призводить до суттєвого збільшення міцності бетону як на стиск так і на розтяг при згині. Також до деякого зростання міцності призводить збільшення кількості активного мінерального наповнювача в діапазоні від 20 до 30 % від маси в'язучого.

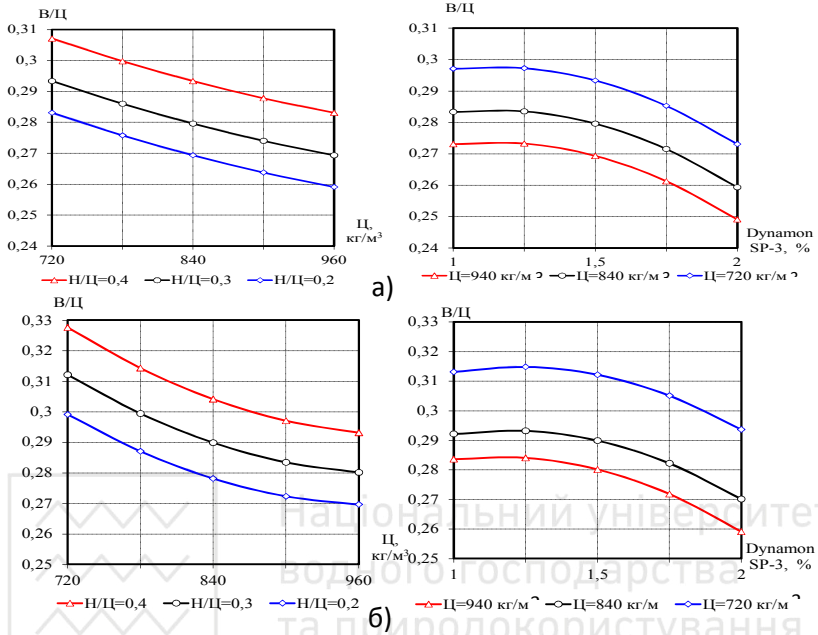


Рис. 2.3. Вплив технологічних факторів на водоцементне відношення РПБ виготовленого із застосуванням:
а) золи виносу ТЕС; б) доменного гранульованого шлаку

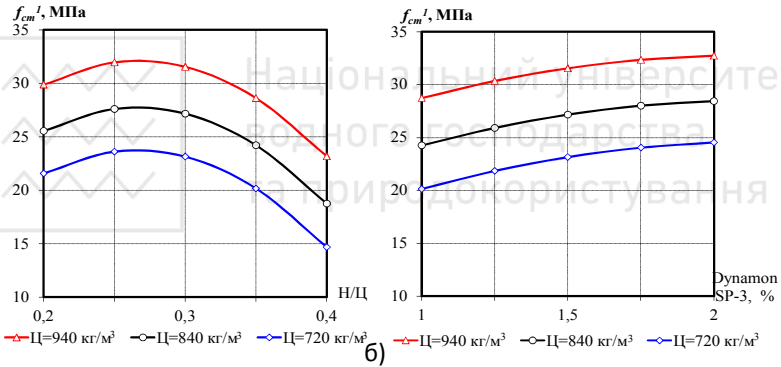
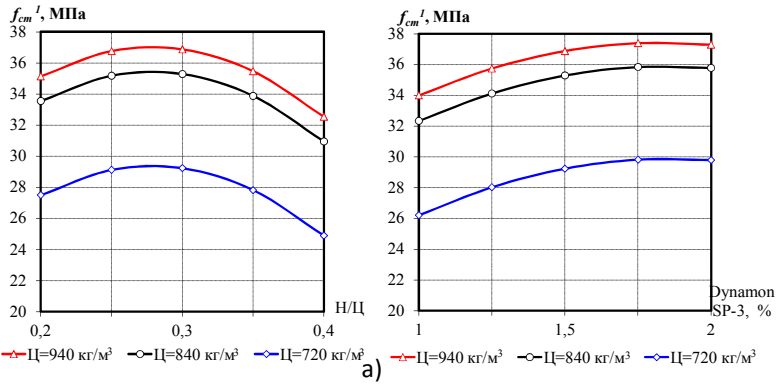


Рис. 2.4. Вплив технологічних факторів на міцність при стиску РПБ у віці 1 доба: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

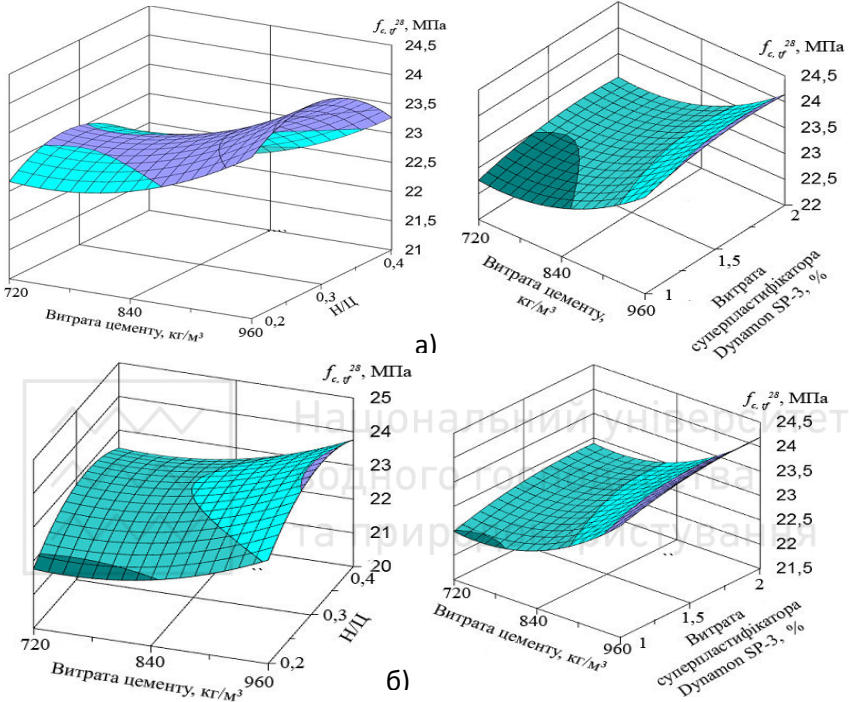


Рис. 2.5. Вплив технологічних факторів на міцність при згині РПБ у віці 28 діб: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

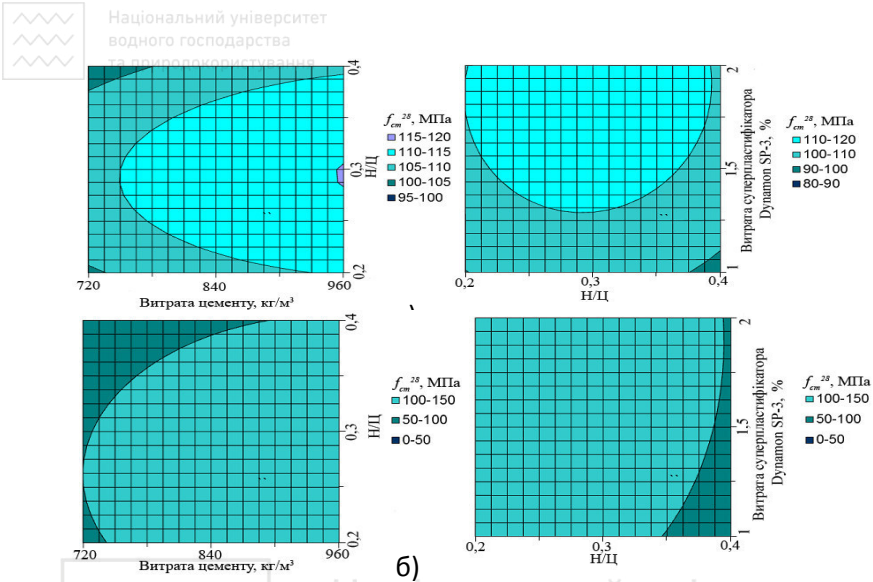


Рис. 2.6. Вплив технологічних факторів на міцність при стиску РПБ у віці 28 діб: а) РПБ із застосуванням золи виносу ТЕС; б) РПБ із застосуванням доменного гранульованого шлаку

Більш ефективним активним мінеральним наповнювачем (із двох досліджуваних) для виготовлення реакційно-порошкових бетонів є зола виносу ТЕС. Внаслідок того, що основна маса золи представлена частиками сферичної форми, при введенні її до складу бетону спостерігається деякий пластифікуючий ефект який призводить до зниження В/Ц і відповідного збільшення міцності. Заміна доменного гранульованого шлаку золою виносу ТЕС при однаковій кількості добавки призводить в середньому до збільшення міцності зразків на 2...5%. При цьому максимальна міцність при стиску 115,2 МПа та при згині 24,1 МПа РПБ досягається при витраті цементу на максимальному рівні – 960 $\text{кг}/\text{м}^3$, вмісті мінеральної добавки – 30%, витраті поліакрилатного суперпластифікатора Dynamon SP-3– 2% від маси в’язучого.



2.2. Проектування складу реакційно-порошкового бетону

2.2.1. Вибір вихідних матеріалів

Задача вибору вихідних матеріалів є техніко-економічною задачею, що значною мірою визначає ефективність складів бетону і досягнення ним необхідних властивостей.

Цемент. Основними технічними показниками при виборі виду цементу є його хіміко-мінералогічний і речовинний склад; активність і марка або клас; міцність, яка досягається через визначений час тверднення в т.ч. при необхідності й в умовах тепловологісної обробки; нормальна густина, строки тужавлення і тонкість помелу; ряд інших показників, обумовлених проектними вимогами до бетону, умовами його роботи в конструкціях і спорудах.

Для бетонів, що тверднуть у природних умовах бажано застосовувати портландцементи I і II типів (ДСТУ БВ.2.7-46-2010, що виробляють на цементних заводах України (Додаток А).

Дрібний заповнювач (пісок). Для реакційно-порошкового фібробетону в якості дрібного заповнювача застосовують пісок за ДСТУ Б В.2.7-32-95. Рекомендована фракція піску 0,16...0,63 (1,25) мм. Застосовуваний пісок повинен характеризуватись безперервною гранулометриєю, що забезпечує максимальну щільність упаковки зерен.

Якість піску залежить від вмісту пиловидних, глинистих, а також інших шкідливих домішок. До пиловидних відносять частинки крупністю понад 0,005 до 0,05 мм, до глинистих і мулистих – менше 0,005 мм. Вміст часток, що відмулюються у природному піску допускається до 3%, у збагаченому – 2%, у подрібненому до 5%. Вміст глини в грудках не повинен перевищувати 0,5%.

Наповнювачі

Мелений пісок. Рекомендується питома поверхня меленого піску – наповнювача не менше 300...350 кг/м². Частка меленого піску для забезпечення хороших реологічних властивостей бетонних сумішей марок за пластичністю Р4-Р5 і більше



(самоущільнюваних) може істотно змінюватися в залежності від витрати цементу. Тому вона повинна регламентуватися за вмістом. Але можна здійснити часткову або повну заміну меленого піску тонкою складовою піску-заповнювача, що містить фракцію 0,16–0,63 мм.

Для такої заміни необхідно знати гранулометричний склад піску-заповнювача і вміст у ньому фракції 0,16–0,63 мм. Можливо використовувати фракцію 0–0,63 мм, якщо вміст глинистих, мулистих і пилюватих частинок в піску не перевищує 0,5–1,0%.

Зола-виносу ТЕС. Зола-виносу є ефективною добавкою для реакційно-порошкових бетонів, що забезпечує підвищену когезію і знижену чутливість до змін водовмісту. Однак, високі витрати золи-виносу можуть привести до утворення в'язкої пасти з дуже високою когезією, що знизить показники легкоукладальності. Залежно від області застосування золу згідно ДСТУ Б В.2.7-205:2009 поділяють на види: I – для залізобетонних конструкцій і виробів; II – для бетонних конструкцій і виробів; III – для конструкцій гідротехнічних споруд, а також на класи – для важкого (А) і легкого (Б) бетону.

Питома поверхня золи класу А повинна бути не менше 800 см²/г, а золи класу Б – знаходиться в інтервалі 1500...4000 см²/г. Залишок на ситі № 008 для золи класу А не повинен перевищувати 15% за масою. Хімічний склад і вологість золи повинні відповідати вимогам, зазначеним у табл. 2.9.

Таблиця 2. 9

Вимоги до золи як добавки в бетон

Показники	Значення показників для золи виду(класу)		
	I (А і Б)	II (А і Б)	III (А)
Вміст SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , % за масою, не менше, для золи: антрацитової і кам'яновугільної	70	Не нормується	70
	50	Те ж саме	50



продовження табл. 2.9

Вміст сірчаних і сірчаноокислих сполук у перерахунку на 80з, % за масою, не більше	3	3,5	3
Вміст вільного оксиду кальцію (СаО), % за масою, не більше	3	5	2
Вміст оксиду магнію (MgO), % за масою, не більше	5	5	5
Втрати при прожарюванні,% за масою, не більше, для золи: антрацитової	15	20	5
кам'яновугільної	7	10	5
буровугільної	5	5	3
Вологість, % за масою, не більше	3	3	3

Мікрокремнезем. Представляє собою конденсований аерозоль, що вловлюється фільтрами систем газоочистки плавильних металургійних печей. Дуже високий рівень дисперсності і практично сферична форма зерен мікрокремнезему (кремнеземистого пилу) забезпечує належну когезію і підвищену стійкість до сегрегації. Однак, мікрокремнезем також істотно знижує водовідділення в бетонній суміші, що може приводити до проблеми забезпечення якості поверхні у зв'язку з швидким утворенням поверхневої кірки, яка ускладнює виконання операцій з доведення виробів. Враховуючи високу відносну вартість мікрокремнезему, доцільно його частково або повністю замінювати іншими наповнювачами.

Метакаолін. Високодисперсний алюмосилікат, що володіє пуцолановою активністю та утворюється в результаті випалу каолінових глин в температурному діапазоні 650-750° С. Додавання метакаоліну сприяє збільшенню міцності цементного каменю, адгезії цементного гелю до частинок заповнювача,



зниженню пористості і зменшенню проникності, підвищенню стійкості матеріалу до циклічного замерзання відтавання, а також до корозійних впливів. Вплив метакаоліну на гідратацію цементу і формування структури цементного каменю обумовлений високою дисперсністю частинок і його пуцолановими властивостями. Однак, дана мінеральна добавка відрізняється високою дисперсністю, що призводить до зростання водопотреби цементних систем. Для зниження цього негативного фактора необхідно використовувати суперпластифікатори, що відрізняються високим водоредуруючим ефектом.

Мелений доменний гранульований шлак

Мелений доменний гранульований шлак (МДГШ) містить тонкодисперсні реакційно здатні фракції з низькою теплою гідратації. МДГШ вже присутній в деяких типах цементу (ПЦ II або ШПЦ III), але також може окремо використовуватися як наповнювач до реакційно-порошкових бетонів. При цьому слід враховувати, що високий вміст МДГШ може впливати на легкоукладальність бетонних сумішей, а його дуже повільна гідратація збільшує ризик сегрегації і водовідділення. Питома поверхня шлаку після помелу повинна бути не менше 400 см²/г.

Вода

Для замішування бетонної суміші використовується вода що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-273:2011. У воді обмежується до 10 мг/л вміст органічних ПАВ, цукру та фенолу, не допускаються плівки нафтопродуктів, водневий показник не повинен бути меншим 4 і більшим 12,5. У воді замішування обмежується вміст розчинних солей, іонів SO₄²⁻ та Cl⁻, а також зважених частинок.

Фібра

Сталева фібра. Для фібрового армування виробів та конструкцій з реакційно-порошкових бетонів слід застосувати сталеву фібру. Найкращим варіантом такої фібри є мікрофібра діаметром 0,2...0,3 мм та довжиною 10...15 мм. Характеристика найбільш розповсюджених на території України видів сталеві фібри наведена в табл. 2.10. Мінімальний опір



розтягу фібри для реакційно-порошкових фібробетонів повинен бути не менше 800 МПа.

Модуль пружності всіх видів фібри приймається 190000 МПа.

Базальтова фібра. Базальтову фібру виготовляють на основі базальтового грубого волокна діаметром 50...80 мкм, яке повинно відповідати вимогам ТУ 023.005-89 та ТУ У В.2.7-26.8-32673353-001.

Фізико-механічні показники базальтової фібри представлені в табл. 2.10.

Таблиця 2.10

Фізико-механічні показники базальтової фібри

Найменування показників	Норми для волокна марки		
	БГВ-100	БГВ-150	БГВ-250
Діаметр, мм	100±50	150±50	250±75
Довжина, мм	75±25		
Міцність на розтяг, МПа	200	150	100
Лугостійкість, %, не менше	90		
Вологість, %, не більше	1		

За величину міцності грубого базальтового волокна на розтяг, МПа, приймають середнє арифметичне результатів випробувань не менше п'ятнадцяти зразків.

Пластифікуючі добавки (суперпластифікатори).

Добавка повинна забезпечувати скорочення витрати води замішування і запроектовані показники легкоукладальності. У той же час, добавка повинна підтримувати свій диспергуючий



ефект протягом часу, необхідного для транспортування і укладання реакційно-порошкового фібробетону. Необхідний рівень збереження рухливості залежить від області застосування. Бетон для збірних виробів і конструкцій вимагає меншої тривалості збереження рухливості, ніж для монолітного будівництва.

В табл. 2.11 наведено порівняльну ефективність пластифікуючих добавок у разі застосування їх для зниження витрати води при збереженні рухомості суміші і підвищення ранньої міцності. Найбільшу водоредукуючу здатність мають добавки поліакрилатного та полікарбоксилатного типів (Mapei Dynamon SP3, Melflux 2651 F), що дають можливість забезпечити максимальне підвищення ранньої міцності.

Таблиця 2.11

Порівняльна ефективність добавок-пластифікаторів при використанні в реакційно-порошкових фібробетонах

Добавка	Витрата, % від маси цементу (на суху речовину)	Водоредукуюча здатність, %	Усереднене збільшення ранньої міцності, %
С-3	0,7	16...18	15...30
	1,0	18...20	25...35
	1,5	22...25	35...40
Mapei Dynamon SP3	0,5	30...35	42...60
	1,0	40...45	60...90
	1,5	45...50	65...95
Mapei Dynamon SR3	0,5	22...28	38...52
	1,0	30...35	38...55
Melflux 2651 F	0,5	30...35	40...60
	1	40...45	57...80
Sika VK 225	0,5	25...30	35...40



2.2.2. Розрахунок складу РПБ з використанням номографічного методу

На основі отриманих експериментально-статистичних моделей (табл. 2.4-2.7) побудовано номограми водопотреби бетонної суміші та міцності реакційно порошкових бетонів (рис. 2.7-2.8), виготовлених із застосуванням в якості активного мінерального наповнювача золи виносу ТЕС та доменного гранульованого шлаку. Дані номограми в сукупності з комплексом отриманих моделей, можуть бути використані для проектування складів реакційно порошкових бетонів із заданою міцністю та рухомістю.

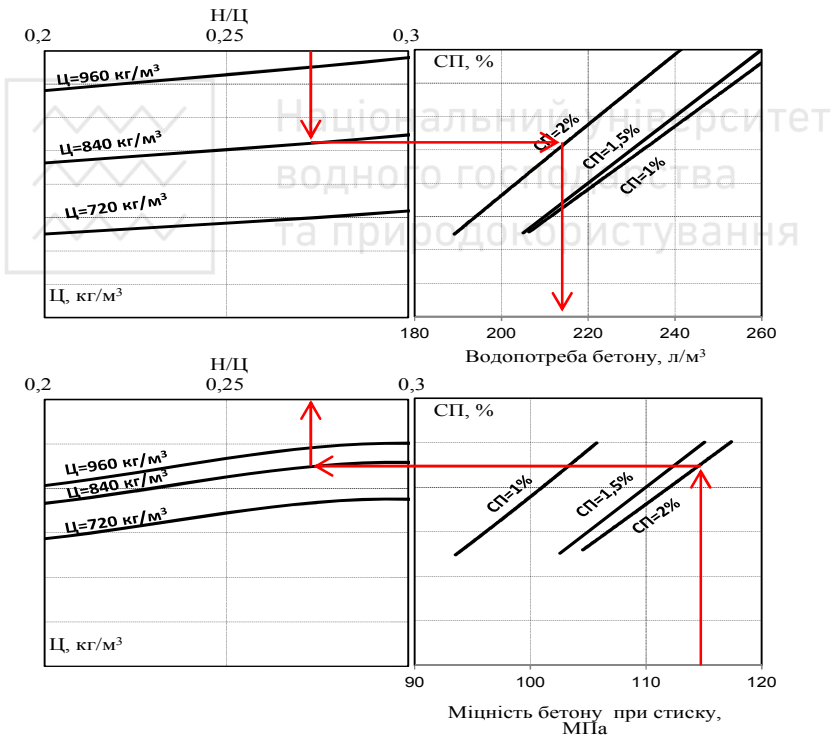


Рис. 2.7. Номограма водопотреби та міцності при стиску РПБ, виготовлених із використанням золи виносу ТЕС

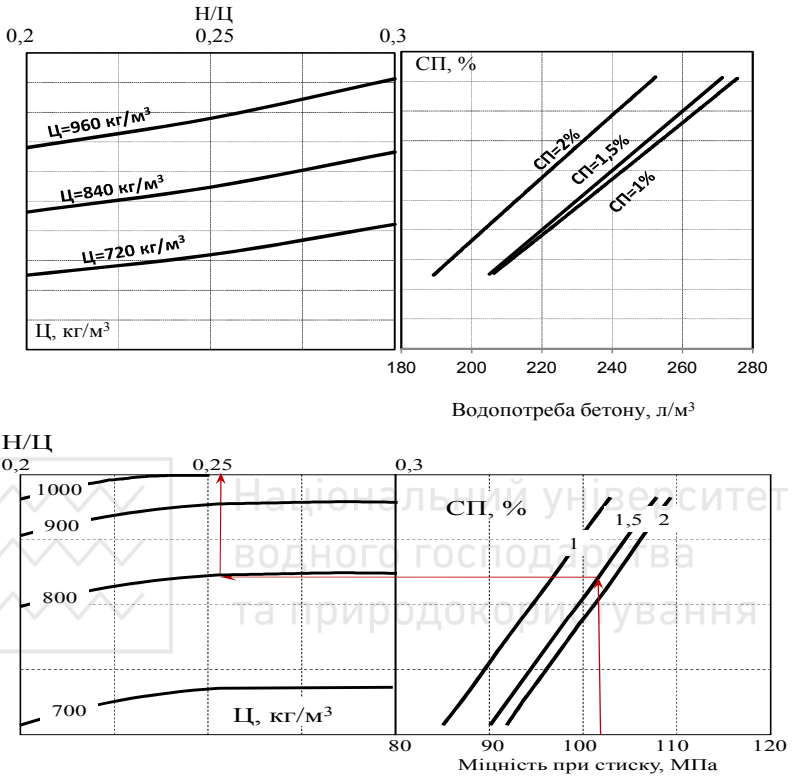


Рис. 2.8. Номограма водопотреби та міцності при стиску РПБ виготовлених із використанням доменного гранульованого шлаку

1. Використовуючи номограму міцності при стиску наведену на рис. 2.7 або 2.8, залежно від виду використаного наповнювача, почергово визначаємо визначаємо витрату суперпластифікатора, витрату цементу та вміст наповнювача, які будуть забезпечувати задану міцність РПБ на стик у віці 28 діб.



2. Використовуючи номограму водопотреби наведену на рис. 2.7 або 2.8, в залежності від виду використаного мінерального наповнювача, при попередньо визначених витраті суперпластифікатора, цементу та наповнювача, встановлюємо витрату води яка буде забезпечувати отримання бетонної суміші з рухомістю 25...30 см по віскозиметру Суттарда.

3. Витрату заповнювачів можна розрахувати, знаючи об'єм цементного тіста ($V_{ц.т}$) в бетонній суміші.

Об'єм цементного тіста, л/м³

$$V_{ц.т} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{Н}{\rho_{н}} + В \quad (2.2)$$

Об'єм піску, л/м³

$$V_{п} = 1000 - V_{ц.т} \quad (2.3)$$

Маса піску $П$, кг/м³

$$П = \rho_{п} V_{п} \quad (2.4)$$

Маса мінерального наповнювача, кг/м³:

$$Н = Ц \cdot Н / Ц \quad (2.5)$$

У наведених вище формулах $\rho_{ц}$, $\rho_{н}$, $\rho_{п}$ – дійсна густина відповідно цементу ($\rho_{ц} \approx 3,1$ кг/л), наповнювача та піску.

У випадку, коли неможливо досягнути заданих характеристик при наявних ресурсах вводиться додаткова опція у вигляді додавання до бетону сталеві фібри, котра суттєво розширює діапазон можливих характеристик бетону спеціальних споруд.

Приклад. Розрахувати склад РПБ, виготовленого із застосуванням в якості активного мінерального наповнювача золи виносу ТЕС, з 28-добовою міцністю на стиск 115 МПа та рухомістю 25...30 см по віскозиметру Суттарда. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор Дупатон SP-3. Дійсна густина цементу $\rho_{ц}=3,1$ г/см³, дійсна густина золи виносу ТЕС $\rho_{н}=2,8$ г/см³, дійсна густина піску $\rho_{п}=2,65$ г/см³.



1. Використовуючи номограму міцності при стиску наведену на рис. 2.7, графічним методом встановлюємо, що для забезпечення заданої міцності при стиску 110 МПа мінімально можлива витрата цементу складатиме – 840 кг/м³, частка наповнювача – 0,275, витрата суперпластифікатора DYNAMON SP-3 – 2% від маси в'язучого.

2. Використовуючи номограму водопотреби наведену на рис. 2.7 встановлюємо, що при такому компонетному складі бетону мінімально можлива кількість води, при якій буде забезпечена задана рухомість бетонної 25...30 см по віскозиметру Суттарда буде складати – 215 л/м³.

3. Витрата наповнювача (зола виносу):

$$H = \frac{C \cdot N}{C} = 840 \cdot 0,275 = 231 \text{ кг/м}^3.$$

4. Витрату заповнювачів розраховуємо, знаючи об'єм цементного тіста ($V_{ц.т}$) в бетонній суміші.

Об'єм цементного тіста, л/м³

$$V_{ц.т} = \frac{C}{\rho_c} + \frac{H}{\rho_n} + B = \frac{840}{3,1} + \frac{231}{2,8} + 215 = 568,5 \text{ л/м}^3.$$

Об'єм піску, л/м³:

$$V_n = 1000 - V_{ц.т} = 1000 - 568,5 = 431,5.$$

Витрата піску P , кг/м³ :

$$P = \rho_n V_n = 2,65 \cdot 431,5 = 1143 \text{ кг/м}^3.$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: цемент – 840 кг/м³, зола виносу – 231 кг/м³, вода – 215 л/м³, пісок фракції 0,16...1,25 – 1143 кг/м³. Витрата суперпластифікатора DYNAMON SP-3 складає 2% від маси в'язучого.

Розрахунковий склад бетону підлягає обов'язковому лабораторному коректуванню.

2.2.3. Розрахунок складу РПБ з використанням математичних методів

Отримані математичні моделі механічних і технологічних властивостей високоміцного реакційно-порошкового бетону



дають можливість здійснити оптимізацію його складу з метою забезпечення комплексу необхідних властивостей за умови мінімізації ресурсів. Для вирішення таких задач досить зручно використовувати програмний комплекс MS Excel з надбудовою «Пошук рішення» («Solver»). Приклади застосування такого способу для розрахунку складу реакційно-порошкового бетону більш детально показані у п. 3.3.3.

Реалізація вирішення задачі проектування складу реакційно-порошкового бетону з використанням комплексу математичних моделей (табл. 2.4–2.7) також можлива з застосуванням спеціально розроблених комп'ютерних програм-калькуляторів, що використовують відомі методи математичної оптимізації. Приклад програми для реалізації задач такого типу та принцип її роботи наведений у додатку Б.





3. ДИСПЕРСНО-АРМОВАНІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ

3.1. Загальні відомості

Використання реакційно-порошкових бетонів в якості матриці для фібробетонів дозволяє:

1. Зменшити довжину фібри до 6-12 мм без побоювання висмикування дроту значно раніше, ніж настане межа текучості сталі;

2. Відмовитися від використання довгої фібри з $l > 5-15$ см і виключити комкування і нерівномірний розподіл з відсутністю недоармованих і переармованих зон, а також зменшити діаметр сталеві фібри до 0,2-0,4 мм і аж до мікрорівня (0,01-0,04 мм);

3. Зменшити вплив фібри на зниження легкоукладальності;

4. Зменшити величини зростання середньоквадратичних відхилень міцності на згин і на осьовий розтяг зі збільшенням ступеня армування;

5. Підвищити частку заповнювача з найбільшою крупністю зерен 5 мм до 60-65% в суміші заповнювачів.

Для фібробетонів важливим техніко-економічним показником є витрата фібри на одиницю приросту міцності на розтяг при згині і осьовий розтяг в порівнянні з бетоном аналогічного складу, але без фібри. Це дозволяє здійснювати порівняння як економічності витрати фібри, переваг її геометричних параметрів, так і досягнення технічних властивостей фібробетонів.

Питому витрату фібри та ефективність її використання необхідно оцінювати за співвідношенням

$$\Phi_{\Delta R_{32}}^{num} = \frac{M_{\phi}}{R_{32}^{\phi} - R_{32}^{\bar{\phi}}}, \quad (3.1)$$

де M_{ϕ} – маса фібри, кг/м³;

R_{32}^{ϕ} – міцність на розтяг при згині фібробетону;

$R_{32}^{\bar{\phi}}$ – міцність на розтяг при згині бетону.



Густина бетону в фібробетоні:

$$\Phi_{\Delta R_{32}}^{mit} = \frac{M_{\text{фб}} - \mu \cdot \rho_{\text{ф}}}{V_{\text{фб}} \cdot (1 - \mu)}, \quad (3.2)$$

де μ – об'ємна ступінь дисперсного армування бетону в долях одиниці,

$V_{\text{фб}}$ – об'єм фібробетону, рівний 1000 л.

Для фібробетону зі сталевую фібрую $\rho_{\text{б}}$ буде:

$$\rho_{\text{б}} = \frac{M_{\text{фб}} - \mu \cdot 7800}{1000 \cdot (1 - \mu)}. \quad (3.3)$$

Використовуючи формулу (3.3), можна за експериментальними значеннями густини фібробетону встановити фактичну густину бетонної матриці.

Для збільшення ступеня використання механічних властивостей фібри на розрив вона виготовляється з плоским або овальним перерізом, або з анкерною поверхнею (періодичного профілю, зигзагоподібна, хвилеподібна), або з напівзагнутими анкерними кінцями (Wirand, Dramix).

Альтернативою сталевій фібрі можуть слугувати мінеральні та синтетичні волокна, що володіють високими фізико-хімічними та експлуатаційними властивостями. Найбільшого поширення набули скляні, базальтові і полімерні волокна, зважаючи на їх доступність і прийнятну вартість. Основні властивості і показники металічних та неметалічних волокон наведені в табл. 3.1–3.2.

Таблиця 3.1

Види фібри, що використовуються для виготовлення фібробетону

Фібра (волокно)	Густина, г/см ³	Міцність на розтяг, R _f , МПа × 10 ³	Модуль пружності, E _f , МПа × 10 ³	Подов- ження при розриві, %
Металева				
Сталева	7,8	0,5-1,50	190-210	2-6



продовження табл. 3.1

Фібра (волокно)	Густина, г/см ³	Міцність на розтяг, R _f , МПа × 10 ³	Модуль пружності, E _f , МПа × 10 ³	Подов- ження при розриві, %
Неметалева високомодульна				
Азбестова	2,6	0,9-3,1	68-70	0,6-1
Скляна	2,6	1,8-3,9	70-80	1,5-3,5
Базальтова	2,6	1,6-3,2	100-130	1,4-3,6
Арамідна	1,4	2,9-3,5	75-110	1,4
Вуглецева	2	2,5-4	200-700	1,0-1,6
Карбонова	1,63	1,2-4,0	280-380	2-2,2
Полімерна низькомодульна				
Поліамідна	0,90	0,72-0,9	1,9-5	5-20
Поліпропіленов а	0,9	0,4-0,77	3,5-8	10-25
Нейлонова	1,1	0,77-0,84	4,2-4,5	16-20
Віскозна	1,20	0,66-0,7	5,6-5,8	14-16



Види фібри: основні характеристики

Основні показники	Вид фібри				
	Хвилеподібна Ф1	Анкерна із загнутими кінцями Ф2	Базальтова фібра Ф3	Поліпропіленова фібра Ф4	Сталева мікрофібра Ф5
Довжина (L), мм	60,0 ± 6,0	60,0 ± 6,0	12,0 ± 0,5	12,0 ± 0,3	13,0 ± 1
Діаметр (d), мм	1,0 ± 0,1	1,0 ± 0,1	(16±0,2)·10 ⁻³	20-33·10 ⁻³	0,25 ± 0,01
$\Lambda=L/d$	60	60	750	600	52
Тимчасовий опір розриву, МПа не менше	1335	1335	1800	400	2000
Температура плавлення, °С	1480	1480	1450	170	1485
Середня густина (ρ), г/см ³	7,86	7,86	2,65	0,91	7,85

Високомодульна фібра є одночасно високоміцною, і вона здатна забезпечити значне зміцнення фібробетону по відношенню до вихідного бетону-матриці при значному підвищенні тріщиностійкості (за утворенням і шириною розкриття тріщин) як за рахунок високого співвідношення модулів пружності фібри і бетону $E_f/E_b \sim 7...30$, так і за рахунок високого співвідношення їх міцностей (близько 100 для міцності на розтяг). Фібробетон на основі високомодульної фібри



забезпечує також підвищену ударну стійкість, морозостійкість, водонепроникність, стираниність.

Друга за жорсткістю група – низькомодульна фібра виготовляється на полімерній основі. Поліпропіленове фіброволокно виготовляється безперервним методом з гранул чистого поліпропілену шляхом екструзії і витяжки при нагріванні. Вона має модуль пружності $(2...10) \cdot 10^3$ МПа, що нижче за жорсткість фібри першої групи приблизно на два порядки. Ця фібра чинить мінімальний позитивний вплив на статичну міцність, але забезпечує в значній мірі зниження усадки, підвищує ударну в'язкість і морозостійкість бетону, забезпечує водоутримуючу здатність бетонної суміші.

Базальтове волокно є одним з ефективних різновидів мінеральних волокон для дисперсного армування бетонів. Воно характеризується високою міцністю на розтяг 1600...3200 МПа (табл. 3.1). Основними особливостями фібробазальтобетону є його висока міцність при всіх видах напружених станів і здатність витримувати значні деформації в пружному стані. При цьому відносна деформація цементного каменю без утворення тріщин досягає 0,7...0,9%, що в 35...45 разів перевищує граничне видовження неармованого каменю. Значне збільшення деформативності і міцності цементного каменю відбувається за рахунок усунення базальтовими волокнами впливу концентрації напружень в місцях, ослаблених структурними дефектами (раковинами, мікротріщинами).

Базальтове волокно хімічно інертне, тому бетони, армовані базальтовими волокнами, застосовують при будівництві морських споруд, в архітектурному і декоративному бетонах. У дорожніх покриттях волокно захищає бетон і арматуру від проникнення агресивних речовин, а також підвищує залишкову міцність і стійкість до заморожування-відтавання, підвищує шорсткість поверхні.

Використання базальтових волокон, для дисперсного армування фібробетонів є актуальним у зв'язку з високими фізико-механічними властивостями одиничних волокон і більш низькою густиною цих волокон в порівнянні зі сталевими.



3.2. Властивості

3.2.1. Реакційно-порошкові фібробетони

Вибір виду фібри для РПФБ. В табл. 3.3 приведені коефіцієнти математичних моделей міцності при стиску та при згині для реакційно-порошкового фібробетону наступного складу: кг/м³: портландцемент ПЦ 500 I – 600; мелений кварцовий пісок ($S_{\text{пит}} = 250 \text{ кг/м}^2$) – 360; кварцовий пісок (0,16...1,25 мм) – 1230. Використані види сталеві фібри – хвилеподібна (Ф1), анкерна із загнутими кінцями Ф2 та мікрофібра (Ф5) (табл. 3.2). Витрата фібри складала 80 кг/м³ ($\mu = 1,0\%$). В бетонні суміші вводиться добавка суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651f в кількості, що необхідна для забезпечення рухомості ОК = 20 см.

Математична модель має вигляд

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2,$$

де X_1 – вид фібри: (-1 – хвилеподібна; +1 – мікрофібра);

X_2 – В/Ц = 0,3...0,35;

X_3 – витрата цементу Ц = 500...600 кг/м³.

Таблиця 3.3

Коефіцієнти математичних моделей міцності з порівнянням видів фібри для РПБ

Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}
Міцність на розтяг при згині у віці 1 доба, МПа	5,3/4,84	-1,65/-2,05	-1,2/-1,3	0,6/0,2	1,6/0,18
Міцність на стиск у віці 1 доба, МПа	40,3/41,7	-1,3/-1,8	-4,3/-3,3	0,4/0,8	0,5/1,2
Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб, МПа	7,32/6,8	-2,3/-1,7	-1,1/-1,3	0,15/0,2	0,15/0,9
Міцність на розтяг при згині у віці 28 діб, МПа	10,2/11,3	-2,1/-0,8	-0,9/-1,2	0,3/0,4	0,26/-0,3



Вихідні параметри	Значення коефіцієнтів*				
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	64,1/ 64,9	-1,35/ -0,25	-5,7/ -4,1	1,2/ 0,95	1,1/ 0,9
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	80,1/ 77,8	-2,2/ -5,1	-4,2/ -3,2	0,9/1,2	3,5/ 0,8

*- над рискою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням мікрофібри Ф5 та хвилястої Ф1; під рискою вказані коефіцієнти моделі з порівнянням мікрофібри Ф5 та анкерної фібри із загнутими кінцями Ф2.

На рис. 3.1–3.3 наведені графічні залежності, що отримані відповідними розрахунками по моделях, які характеризують залежність міцності РПФБ на розтяг при згині ($f_{c,tf}$) і стиску (f_{cm}) у віці 1, 7 та 28 діб від В/Ц при використанні різних видів сталевих фібри.

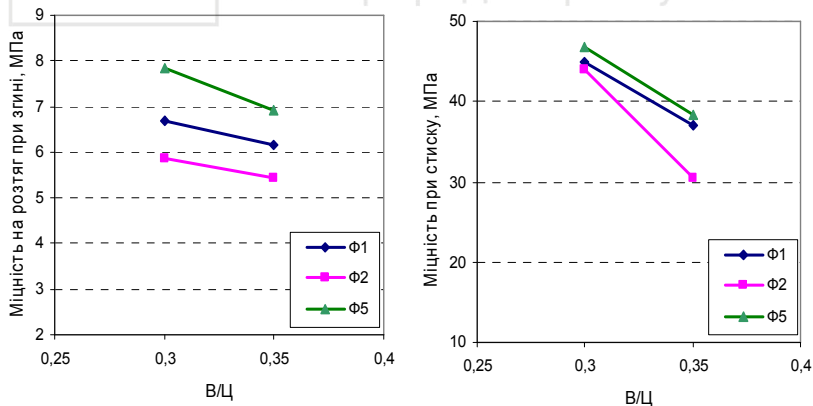


Рис. 3.1. Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 1 доба від В/Ц

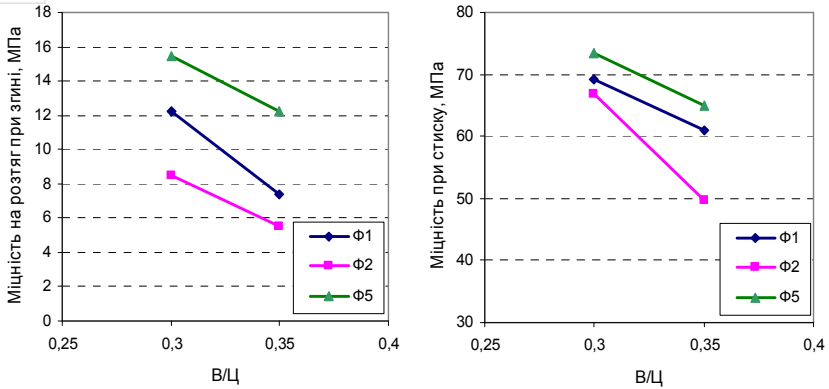


Рис. 3.2. Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 7 днів від В/Ц

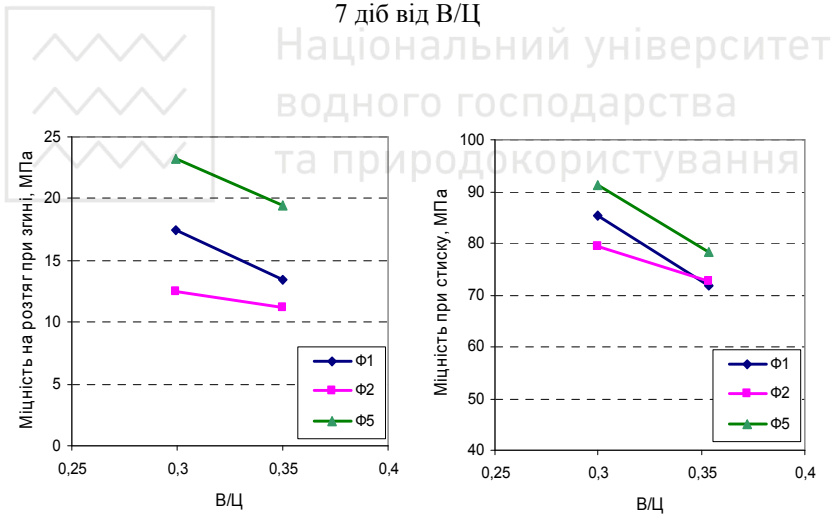


Рис. 3.3. Розрахункові залежності міцності на розтяг при згині та стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 днів від В/Ц при використанні різних видів фібри



Використання сталеві мікрофібри в усіх випадках забезпечує найвищі значення міцності при стиску та на розтяг при згині. В реакційно-порошкових бетонах, в зв'язку з наявністю більшої кількості тонкодисперсних контактів і більшого обсягу тонкодисперсної фази, адгезійне зчеплення з поверхнею різних видів фібри і, особливо мікрофібри, є значно вищим.

При тій же об'ємній витраті, що і для інших видів фібр, сумарна площа поверхні мікрофібри, а і відповідно площа поверхні контакту її з реакційно-порошковою матрицею є більшою.

Порівняльні діаграми міцності фібробетонів з використанням всіх видів фібри, включаючи базальтову (Ф3) та поліпропіленову (Ф4) та без неї наведено на рис. 3.4. В усіх випадках об'ємна витрата фібра однакова ($\mu = 1,0\%$), $V/C = 0,35$, витрата цементу 500 кг/м^3 .

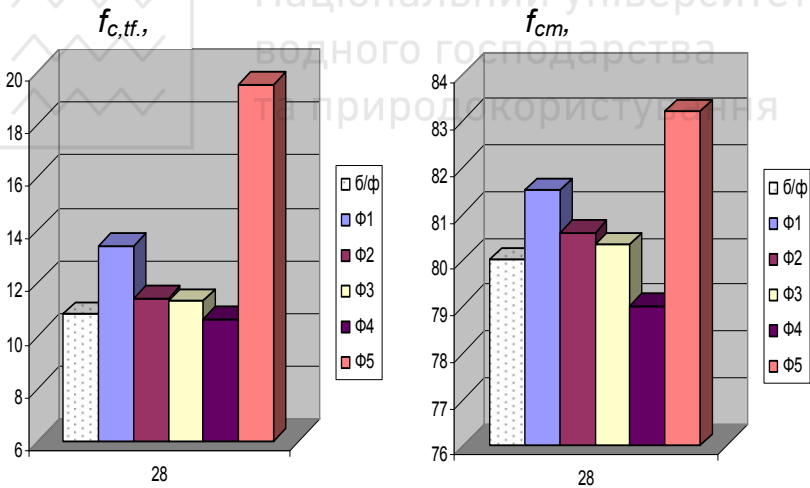


Рис. 3.4. Вплив виду фібри на значення міцності на розтяг при згині та стиску реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 діб ($\mu = 1,0\%$)



Базальтова фібра (Ф3) дає деякий приріст міцності на розтяг при згині у порівнянні із базовим складом, але значно поступається хвилястій фібрі Ф1 і, особливо, сталевій мікрофібрі Ф5. Поліпропіленова фібра Ф4 дає найгірші результати і практично не змінює міцність при стиску та на розтяг при згині порівняно із базовим складом.

Основний ефект від дисперсного армування реакційно-порошкових бетонів проявляється у збільшенні співвідношення $f_{c,ff} / f_{cm}$. На рис. 3.5 відображені відносні коефіцієнти ефективності дисперсного армування різними видами фібри. За одиницю прийняте співвідношення $f_{c,ff} / f_{cm}$ для реакційно-порошкового фібробетону з використанням фібри Ф5. Для всіх видів фібри коефіцієнт ефективності є більший ніж для бетону, не армованого фіброю.

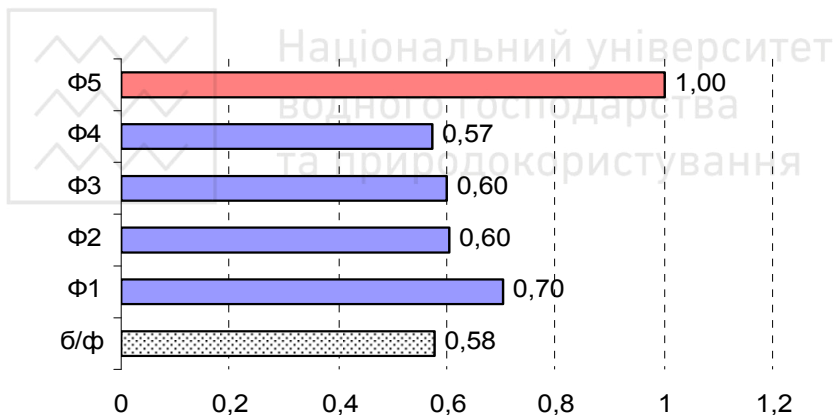


Рис. 3.5. Значення відносного коефіцієнта ефективності дисперсного армування при використанні різних видів фібр для реакційно-порошкового бетону

Тонка фібра діаметром 0,25 мм, при однаковому об'ємному вмісті дозволяє отримати досить насичений дисперсно-армований композит в порівнянні з дискретно-армованим матеріалом з використанням товстої фібри діаметром 1 мм.



При однаковому ступені армування бетонів фіброю з діаметрами D і d розрахункова кількість волокон в них співвідноситься як D^2/d^2 , а відстані між поверхнями сусідніх фібр співвідносяться як D/d . Якщо замість фібри діаметром 0,8 мм використовувати фібру 0,15 мм, то D^2/d^2 рівне 28,4. Одна фібра $D = 0,8$ мм замінюється 28 волокнами діаметром 0,15 мм.

Сталева мікрофібра є найбільш ефективною для отримання реакційно-порошкових фібробетонів із високим значенням міцності на розтяг при згині.

Вибір оптимального вмісту фібри. З підвищенням об'ємної концентрації дисперсного армування фізико-механічні характеристики фібробетону зростають до певного рівня, після досягнення якого характеристики починають знижуватись. Тому необхідно забезпечувати певне співвідношення об'ємів волокна й матриці, при яких фізико-механічні характеристики фібробетону будуть мати максимальне значення.

Оптимальне значення вмісту сталеві мікрофібри визначається з урахуванням забезпечення максимального значення міцності на розтяг при згині РПФБ.

В табл. 3.4 приведені математичні моделі міцності при стиску та при згині для реакційно-порошкового фібробетону залежно від факторів витрати цементу, В/Ц та витрати сталеві мікрофібри.

Таблиця 3.4
Математичні моделі міцнісних параметрів реакційно-порошкових фібробетонів

Вихідний параметр		Математичні моделі
Міцність при стиску у віці:	1 доба	$f_{cm}^1 = 41,4 + 1,4 \cdot X_1 - 8 \cdot X_2 + 0,3 \cdot X_3 - 0,2 \cdot X_1^2 + 0,2 \cdot X_2^2 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2$ (3.4)
	7 діб	$f_{cm}^7 = 87,5 + 3,3 \cdot X_1 - 11,6 \cdot X_2 + 0,1 \cdot X_3 - 0,9 \cdot X_1^2 - 1,2 \cdot X_2^2 - 0,9 \cdot X_3^2 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,6 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,1 \cdot X_2 \cdot X_3$ (3.5)
	28 діб	$f_{cm}^{28} = 107,4 + 12,9 \cdot X_1 - 18,1 \cdot X_2 + 3,6 \cdot X_3 - 5,8 \cdot X_1^2 + 5,1 \cdot X_2^2 - 4,1 \cdot X_3^2 - 2,2 \cdot X_1 \cdot X_2$ (3.6)



Вихідний параметр		Математичні моделі
Міцність на розтяг при згині	1 доба	$f_{c,tf}^1 = 9,4 + 0,26 \cdot X_1 - 0,91 \cdot X_2 + 0,6 \cdot X_3 + 0,077 \cdot X_1^2 + 0,07 \cdot X_2^2 - 1,02 \cdot X_3^2 - 0,43 \cdot X_1 \cdot X_2$ (3.7)
	7 діб	$f_{c,tf}^7 = 16,6 + 0,61 \cdot X_1 - 1,72 \cdot X_2 + 1,5 \cdot X_3 + 0,333 \cdot X_1^2 + 0,407 \cdot X_2^2 - 2,8 \cdot X_3^2 - 0,86 \cdot X_1 \cdot X_2 - 1,128 \cdot X_1 \cdot X_3$ (3.8)
	28 діб	$f_{c,tf}^{28} = 29,3 + 2,41 \cdot X_1 - 3,12 \cdot X_2 + 1,92 \cdot X_3 - 1,52 \cdot X_1^2 - 0,47 \cdot X_2^2 - 2,81 \cdot X_3^2 - 0,59 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,44 \cdot X_1 \cdot X_3$ (3.9)

Примітка: X_1 (витрата цементу) = 600 ± 100 кг/м³; X_2 (В/Ц) = $0,3 \pm 0,05$; X_3 (витрата фібри) = 180 ± 60 кг/м³. Використаний портландцемент ПЦ 500 І; мелений кварцовий пісок ($S_{\text{пит}} = 250$ кг/м²); кварцовий пісок (0,16...1,25 мм). В бетонні суміші вводиться добавка суперпластифікатора поліакрилатного типу Dypamon SP3 в кількості, що необхідна для забезпечення рухомості ОК = 20 см.

На рис. 3.6–3.8 наведені графічні залежності міцності на розтяг при згині реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 діб.

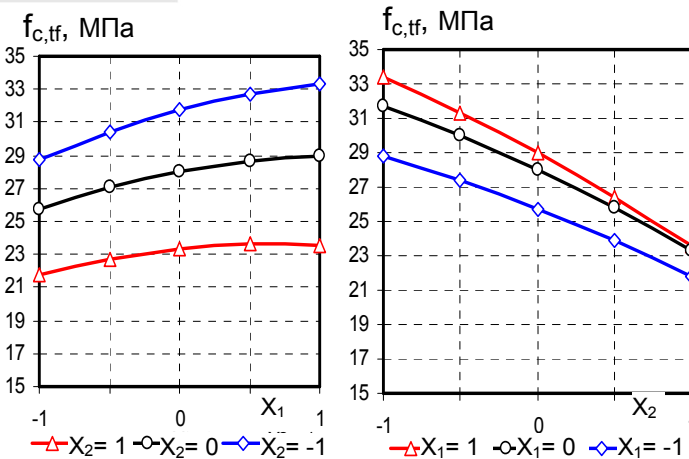


Рис. 3.6. Залежність міцності на розтяг при згині реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 діб від витрати цементу (X_1) та В/Ц (X_2)

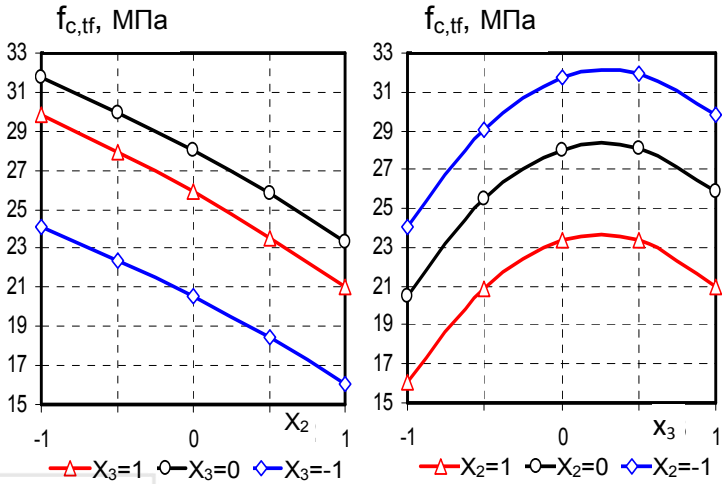


Рис. 3.7. Залежність міцності на розтяг при згині реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 днів від В/Ц (X_2) та витрати фібри (X_3)

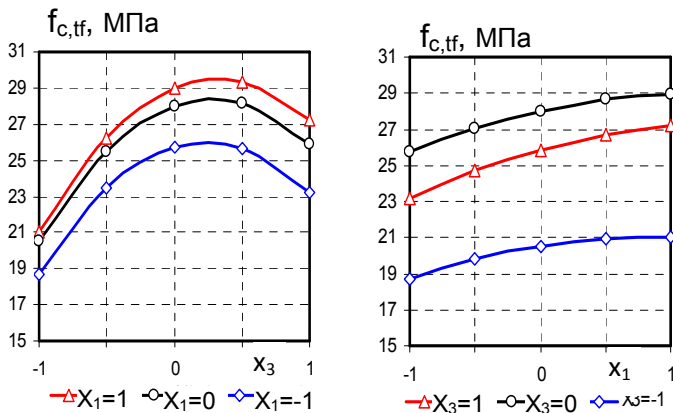


Рис. 3.8. Залежність міцності на розтяг при згині реакційно-порошкового фібробетону у віці 28 днів від витрати цементу (X_1) та витрати фібри (X_3)



Найбільш суттєвий вплив на міцність реакційно-порошкового фібробетону на розтяг при згині чинить вміст фібри, причому вплив даного фактору носить екстремальний характер. Збільшення вмісту фібри від 120 до 180...200 кг/м³ призводить до збільшення міцності на розтяг при згині в середньому на 40...50%, подальше ж збільшення кількості сталеві мікрофібри суттєво не впливає на міцність РПФБ на розтяг при згині.

Найбільш суттєвим фактором, який впливає на міцність при стиску реакційно-порошкового фібробетону, у різні терміни твердіння, є водоцементне відношення, зменшення, якого від $V/C=0,35$ до $V/C=0,25$ призводить до збільшення міцності на 45% у віці 1 доби, на 40% у віці 7 діб та на 35% у віці 28 діб. Вплив даного фактору носить майже лінійний характер і він складає близько 60% впливу всіх інших факторів. Збільшення витрати цементу також позначається на міцнісних показниках, хоча і спостерігається тенденція до досягнення оптимального значення витрати цементу (близько 700 кг/м³) за даних умов.

Збільшення витрати фібри при постійному водоцементному відношенні суттєво не впливає на міцність фібробетонів.

Оптимальний вміст сталеві мікрофібри становить 180...200 кг/м³, що відповідає об'ємному вмісту 2,3...2,5%. Такий вміст забезпечує максимальну міцність фібробетону на розтяг при згині. Подальше збільшення вмісту дисперсної арматури призводить до зниження міцності, що обумовлено складністю підтримання заданої рухомості суміші а також зменшенням товщини матричного шару, в результаті чого фібробетонна суміш проявляє схильність до розшарування навіть при невеликих навантаженнях.

За оптимальних значень факторів складу можливе отримання РПФБ, що характеризується міцністю при стику понад 130 МПа, при забезпеченні міцності при згині майже 30 МПа.



Введення фібри у бетонну суміш. Введення фібри в бетонну суміш можна здійснювати двома основними способами (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Процедури введення компонентів бетонної суміші

Спосіб	Послідовність введення компонентів	
	Перший етап	Другий етап
1. «Класичний»	Пісок+наповнювач+цемент+(СП+ вода) <i>перемішування</i>	Фібра <i>Перемішування</i>
2. «Сухий»	Пісок+ наповнювач+фібра+цемент <i>перемішування</i>	Вода+СП <i>Перемішування</i>

Відповідно до першого способу попередньо до перемішаних сухих компонентів бетону, додається необхідна кількість води із суперпластифікатором. На другому етапі в приготовлену таким чином суміш, при безперервному перемішуванні, вводиться необхідна кількість просіяної крізь сито фібри.

За другим способом до перемішаних сухих компонентів (заповнювача і наповнювача) вводиться необхідна кількість попередньо просіяної крізь сито фібри. Далі в суміш додається цемент, необхідна кількість води з пластифікатором і продовжується перемішування до отримання однорідної фібробетонної суміші.

В табл. 3.6, 3.7 наведені значення міцності реакційно-порошкових сталевіфробетонів у віці 3, 7 та 28 діб при різних способах введення фібри та різному її вмісті.



Таблиця 3.6

Перший спосіб введення фібри (класичний)

ОК, см	Міцність при стиску, МПа у віці			Міцність на розтяг при згині, МПа у віці		
	3 доби	7 діб	28 діб	3 доби	7 діб	28 діб
РПФБ1						
15	44,5	79,0	98,8	6,8	12,1	15,1
20	45,6	81,0	101,3	10,8	19,2	24,0
25	45,2	80,3	100,4	11,9	21,2	26,5
РПФБ2						
15	47,0	83,6	104,5	9,7	12,2	15,2
20	49,2	87,4	109,3	18,9	23,6	29,5
25	49,3	87,6	109,5	20,5	25,6	32,0

Таблиця 3.7

Другий спосіб введення фібри ("сухий")

ОК, см	Міцність при стиску, МПа у віці			Міцність на розтяг при згині, МПа у віці		
	3 доби	7 діб	28 діб	3 доби	7 діб	28 діб
РПФБ1						
15	43,3	77,0	96,2	6,3	11,2	14,0
20	44,9	79,8	99,7	9,1	16,2	20,2
25	44,4	78,9	98,6	10,9	19,4	24,3
РПФБ2						
15	46,2	82,2	102,7	6,7	8,4	10,5
20	48,4	86,1	107,6	17,1	21,4	26,7
25	48,1	85,4	106,8	18,9	23,6	29,5

Примітка: Склад реакційно-порошкових фібробетонах (в $\text{кг}/\text{м}^3$):

– РПФБ1: цемент – 700; мелений пісок – 360; пісок – 1130; фібра – $120 \text{ кг}/\text{м}^3$ ($\mu = 1,54\%$); – РПФБ2: цемент – 700; мелений пісок – 360; пісок – 1130; фібра – $200 \text{ кг}/\text{м}^3$ ($\mu = 2,56\%$). В/Ц = 0,3. Задані значення рухомості суміші забезпечуються необхідною кількістю добавки пластифікатора Dypamon SP3.



Існує чітка тенденція по ускладненню досягнення рівномірного розподілення фібри в бетоні при зменшенні рухомості суміші. При ОК=15 см важко досягнути однорідності фібробетонної суміші, оскільки в ній утворюються комки фібри (т.зв. «їжаки») і, відповідно, створюються окремі ділянки неармованого бетону. Це приводить до суттєвого зниження міцності на розтяг при згині, значення якого майже не перевищує міцності неармованих зразків бетону. Міцність при стиску знижується не так значно, проте це зниження також відбувається внаслідок неоднорідності структур и бетону.

Реакційно-порошкові фібробетони, з меншим вмістом фібри менш схильні до комкування волокон фібри при невисоких значеннях рухомостей. Порівняно невисокий вміст фібри дозволяє їй легше розподілятися в структурі бетонної суміші, що приводить до збільшення однорідності останньої і, тим самим, міцнісних показників.

При збільшенні рухомості суміші до 20...25 см навіть при високому вмісті фібри стає можливим забезпечувати достатньо високу однорідність фібробетонної суміші.

Класичний, і "сухий" способи приготування дають співставні результати з незначним переважанням класичного способу (переважно для високорухомих сумішей з ОК = 20...25 см), що пояснюється більшою загальною тривалістю перемішування компонентів суміші для нього у порівнянні із "сухим" способом.

3.2.2. Реакційно-порошкові фібробетони із композиційним дисперсним армуванням

Покращення структури і властивостей фібробетонів можна досягти в результаті композиційного дисперсного армування при оптимальному поєднанні двох і більше видів фібр різного складу, з різними розмірами, міцністю і пружно-пластичними характеристиками.

Метою композиційного армування є створення такого матеріалу, який зберігаючи позитивні особливості, виключав би недоліки, що мають місце у варіанті моноармування.



Переваги композиційного дисперсного армування (поліармування):

- забезпечення більшої однорідності структури фібробетону, що в свою чергу створює передумови для досягнення більших значень міцності, ніж у випадку моноармування;
- уникнення або суттєве зменшення розшарування фібробетонної суміші в процесі її приготування, транспортування та укладання;
- цілеспрямоване регулювання комплексу фізико-механічних властивостей фібробетону в більш широких межах, ніж при моноармуванні;
- можливість покращення показників довговічності та експлуатаційних характеристик фібробетону.

Вплив вмісту та співвідношення металевої та неметалевої фібри на міцність РПФБ. В табл. 3.8 наведені значення міцності РПФБ на основі сталеві та базальтової фібри при різних комбінаціях полідисперсного армування.

Таблиця 3.8

Міцність фібробетонних зразків з різним вмістом та співвідношенням сталеві та базальтової фібри

Витрата сталеві фібри, кг/м ³	Витрата базальтової фібри, кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка базальтової фібри в загальному об'ємі армування n	Міцність при стиску у віці 7 діб f_{cm}^7 , МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,fl}^7$, МПа
Базальтова фібра ($l = 12$ мм)					
120	0	1,54	0,00	96,8	21,6
	2	1,61	0,05	97,8	25,4
	4	1,69	0,09	100,7	26,0
	6	1,76	0,13	99,3	21,4
200	0	2,56	0,00	113,6	27,9
	2	2,64	0,03	113,1	31,1
	4	2,72	0,06	117,6	31,3
	6	2,79	0,08	111,2	24,2



продовження табл. 3.8

Витрата сталевих фібри, кг/м ³	Витрата базальтової фібри, кг/м ³	Загальний вміст волокон за об'ємом, μ , %	Частка базальтової фібри в загальному об'ємі армування n	Міцність при стиску у віці 7 діб $f_{cm, 7}$, МПа	Міцність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{ctf, 7}$, МПа
Базальтова фібра ($l = 24$ мм)					
120	0	1,54	0,00	96,8	21,6
	2	1,61	0,05	100,8	23,1
	4	1,69	0,09	94,7	20,2
	6	1,76	0,13	94,2	13,7
200	0	2,56	0,00	113,6	27,9
	2	2,64	0,03	116,6	28,2
	4	2,72	0,06	107,3	25,1
	6	2,79	0,08	104,9	16,6

Примітки:

1. Базовий склад реакційно-порошкового фібробетону, кг/м³: Портландцемент – 700; пісок кварцовий 0,16...1,25 мм – 1130; зола – 275; метакаолін – 75. В/Ц суміші 0,27. Необхідна рухомість суміші 23...25 см досягається за рахунок введення добавки суперпластифікатора Dyanon SP3.

2. Використана сталева мікрофібра Ф5 в кількостях 120 і 200 кг/м³ бетону. Для отримання поліармованої композиції використовується базальтова фібра довжиною 12 і 24 мм та поліпропіленова фібра довжиною 12 та 18 мм.

Приготування фібробетону із композиційним дисперсним армуванням проводиться в такій послідовності. У розчин пластифікатора вводиться базальтова або поліпропіленова фібра і перемішується в лабораторному змішувачі з вертикальним валом протягом 40–50 с. У розпушене таким чином волокно додається цемент і знову здійснюється перемішування до отримання однорідної суспензії. Потім в отриману суспензію додається заповнювач відповідно до прийнятого дозування. Нарешті на останньому етапі, при безперервному перемішуванні



суміші, вводиться необхідна кількість просіяної крізь сито сталеві фібри. Така технологія дозволяє виключити комкування волокон і забезпечити необхідну однорідність композиційного дисперсноармованого бетону.

Введення базальтової фібри позитивно впливає перш за все на міцність на розтяг при згині. Середнє збільшення міцності на розтяг при згині в залежності від довжини волокна та його вмісту складає від 7 до 20%.

Використання базальтової фібри з довжиною волокон 24 мм менш ефективно ніж довжиною 12 мм. При збільшенні вмісту базальтової фібри максимальне падіння міцності може досягати 40%.

Зменшення міцності фібробетону при збільшенні довжини використовуваних волокон обумовлено зменшенням процентного вмісту волокна в площині перетину руйнування і зниженням міцності зчеплення на границі «волокно – цементна матриця». Крім того, волокна довжиною 24 мм гірше розподіляються в масиві фібробетону, що позначається в подальшому на особливостях його структури.

Оптимальний вміст частки базальтової фібри в загальному об'ємі армування складає 2 кг/м^3 ($n = 0.07$) при витраті сталеві фібри 120 кг/м^3 і $2..4 \text{ кг/м}^3$ ($n = 0.05...0.09$) при витраті сталеві фібри 200 кг/м^3 . Подальше збільшення вмісту базальтової фібри приводить до збільшення питомої поверхні дисперсної арматури, що в свою чергу приводить до збільшення кількості води, необхідної для отримання бетонних сумішей із заданою рухомістю.

В табл. 3.9 наведені значення міцності РПФБ на основі сталеві та поліпропіленові фібри при різних комбінаціях полідисперсного армування.



Таблиця 3.9

Міцність зразків РПФБ з різним вмістом та співвідношенням
сталеві та поліпропіленові фібри

Витра- та сталев ої фібри, кг/м ³	Витрата поліпропі- ленової фібри, кг/м ³	Загаль- ний вміст волокон за об'ємом, μ, %	Частка поліпропі- ленової фібри в загальному об'ємі армування <i>n</i>	Міц- ність при стиску у віці 7 діб f_{cm}^7 , МПа	Міц- ність на розтяг при згині у віці 7 діб $f_{c,t}^7$, МПа
Поліпропіленова фібра (<i>l</i> = 12 мм)					
80	0	1,03	0,00	96,8	21,6
	1	1,14	0,10	96,3	21,2
	2	1,25	0,18	96,9	19,7
120	0	1,54	0,00	100,2	27,9
	1	1,65	0,07	102,3	26,7
	2	1,76	0,13	101,0	25,4
Поліпропіленова фібра (<i>l</i> = 18 мм)					
80	0	1,03	0,00	96,8	21,6
	1	1,14	0,03	94,8	20,6
	2	1,25	0,06	94,4	18,1
120	0	1,54	0,00	100,2	27,9
	1	1,65	0,07	101,0	22,3
	2	1,76	0,13	98,9	16,4

Оптимальний вміст поліпропіленової фібри довжиною 12 мм та – 1 кг/м³.

Використання в якості компонента композиційного армування поліпропіленової фібри дає дещо гірший ефект у порівнянні з базальтовими волокнами. Це пов'язано із гіршим розподіленням в структурі бетону поліпропіленових волокон, що не сприяє рівномірному розподіленню сталевих волокон. Такі суміші при приготуванні та формуванні більш схильні до розшарування. Також наявна гірша адгезія поліпропілену з цементною матрицею.



Базальтова фібра, яка за густиною та пружними характеристиками ближча до бетонної матриці ніж поліпропіленова, при оптимальній витраті та співвідношенні із сталевую фіброю утворює своєрідний несучий каркас, який утримує сталеву фібру, попереджає розшарування суміші та сприяє рівномірному розподіленню дисперсної арматури в структурі бетону. Все це, відповідно, позначається на міцнісних характеристиках фібробетонів.

Вплив факторів складу на міцність РПФБ з композиційним дисперсним армуванням. Основними факторами, що чинять вплив на міцнісні характеристики РПФБ з композиційним дисперсним армуванням є витрати цементу, водоцементне відношення, вмісту та об'ємне співвідношення двох видів фібри.

В табл. 3.10 приведені математичні моделі міцності при стиску та при згині для реакційно-порошкового фібробетону з композиційним дисперсним армуванням залежно від факторів витрати цементу, В/Ц, витрати сталеві мікрофібри та базальтової фібри.

Таблиця 3.10
Математичні моделі міцнісних параметрів РПФБ з композиційним дисперсним армуванням

Вихідний параметр		Математичні моделі
Міцність при стиску у віці:	1 доба	$f_{cm}^1 = 32,7 + 2,7 \cdot X_1 - 5,8 \cdot X_2 - 0,2 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_4 - 0,6 \cdot X_1^2 + 0,1 \cdot X_2^2 + 0,3 \cdot X_3^2 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,3 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,4 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (3.10)$
	7 діб	$f_{cm}^7 = 66,1 + 3,6 \cdot X_1 - 11,3 \cdot X_2 - 0,2 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_4 - 0,7 \cdot X_2^2 - 2,4 \cdot X_4^2 - 0,4 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,5 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,2 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,3 \cdot X_2 \cdot X_4 - 0,4 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (3.11)$
	28 діб	$f_{cm}^{28} = 117,6 + 7,5 \cdot X_1 - 21,3 \cdot X_2 - 0,15 \cdot X_3 + 1,5 \cdot X_4 - 1,58 \cdot X_1^2 - 0,91 \cdot X_2^2 - 1,06 \cdot X_3^2 - 1,96 \cdot X_4^2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,2 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,35 \cdot X_2 \cdot X_3 \quad (3.12)$



Вихідний параметр		Математичні моделі
Міцність на розтяг при згині у віці:	1 доба	$f_{c,tf}^1 = 7,47 + 0,31 \cdot X_1 - 0,82 \cdot X_2 + 0,46 \cdot X_3 + 0,43 \cdot X_4 - 0,18 \cdot X_1^2 - 0,33 \cdot X_3^2 + 0,12 \cdot X_4^2 - 0,36 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,1 \cdot X_3 \cdot X_4$ <p style="text-align: right;">(3.13)</p>
	7 діб	$f_{c,tf}^7 = 15,56 + 0,74 \cdot X_1 - 1,66 \cdot X_2 + 1,38 \cdot X_3 + 1,1 \cdot X_4 + 0,67 \cdot X_1^2 + 0,47 \cdot X_2^2 - 1,43 \cdot X_3^2 - 0,43 \cdot X_4^2 - 0,8 \cdot X_1 \cdot X_2 - X_1 \cdot X_3 + 0,14 \cdot X_1 \cdot X_4 + 0,25 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,14 \cdot X_3 \cdot X_4$ <p style="text-align: right;">(3.14)</p>
	28 діб	$f_{c,tf}^{28} = 33,91 + 1,27 \cdot X_1 - 3,85 \cdot X_2 + 4,42 \cdot X_3 + 1,92 \cdot X_4 + 1,66 \cdot X_1^2 + 0,62 \cdot X_2^2 - 1,62 \cdot X_3^2 - 1,09 \cdot X_4^2 - 1,43 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,33 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,19 \cdot X_1 \cdot X_4$ <p style="text-align: right;">(3.15)</p>
Витрата Dynamon SP3		$CP = 0,38 - 0,008 \cdot X_1 - 0,50 \cdot X_2 + 0,20 \cdot X_3 - 0,01 \cdot X_4 - 0,24 \cdot X_1^2 + 0,31 \cdot X_2^2 - 0,01 \cdot X_3^2 - 0,01 \cdot X_4^2 - 0,11 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,03 \cdot X_1 \cdot X_3$ <p style="text-align: right;">(3.16)</p>

Примітки:

1. Фактори в моделях: X_1 (витрата цементу) = 600 ± 100 кг/м³; X_2 (В/Ц) = $0,3 \pm 0,05$; X_3 (витрата сталевих фібри) = 180 ± 60 кг/м³; X_4 (витрата базальтової фібри) = 2 ± 2 кг/м³.

2. Використаний портландцемент ПЦ 500 І; кварцовий пісок (0,16...1,25 мм); золя Бурштинської ТЕС – 275 кг/м³; метакаолін – 75 кг/м³. В бетонні суміші вводиться добавка суперпластифікатора поліакрилатного типу Dynamon SP3 в кількості, що необхідна для забезпечення рухомості ОК = 20 см.

На рис. 3.9–3.10 наведені графічні залежності міцності при стиску та на розтяг при згині реакційно-порошкового фібробетону з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 діб.

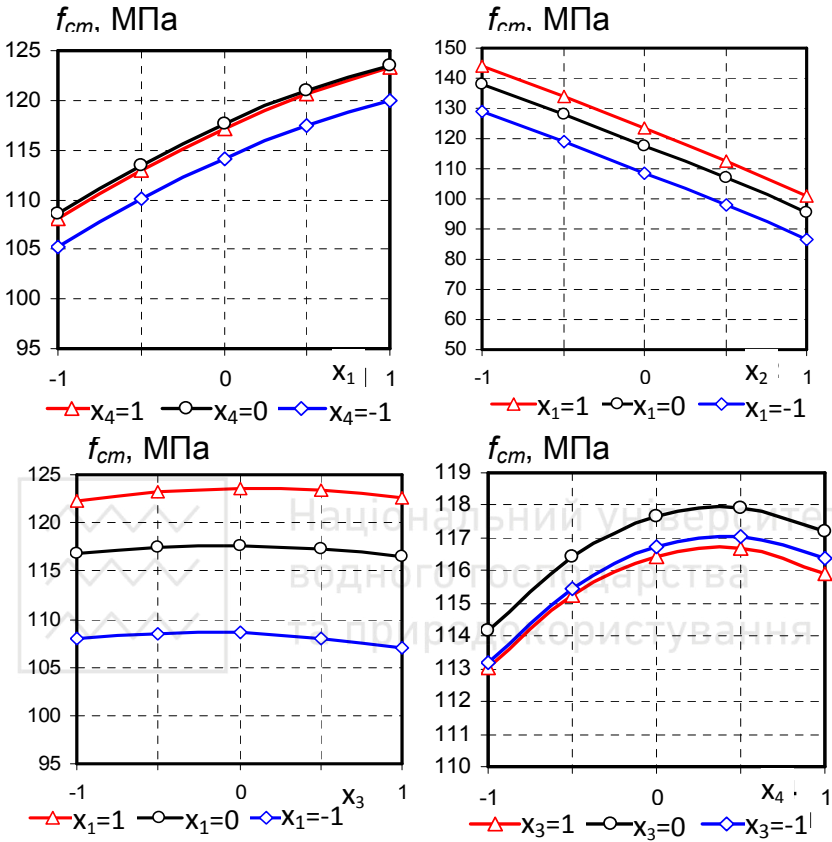


Рис. 3.9. Графік залежності міцності при стиску реакційно-порошкового фібробетону з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 діб

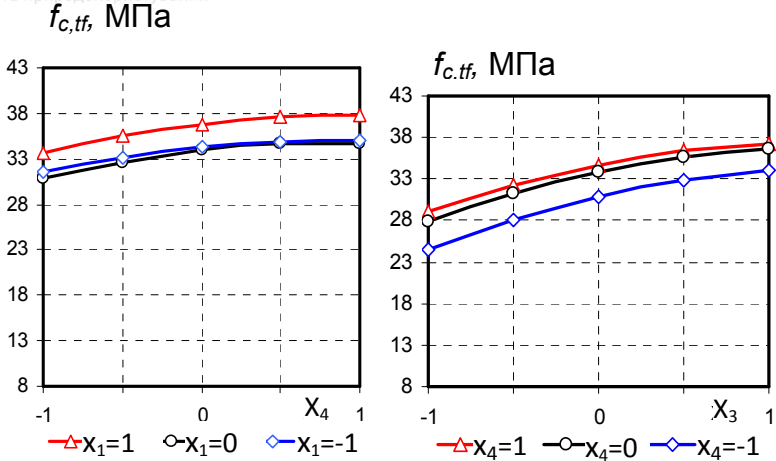


Рис. 3.10. Графік залежності міцності на розтяг при згині реакційно-порошкового фібробетону з композиційним дисперсним армуванням у віці 28 діб

Найбільш суттєвим фактором, який впливає на міцність при стиску є водоцементне відношення (x_2), зменшення якого від +1 до -1 (від В/Ц=0,4 до В/Ц=0,3) призводить до збільшення міцності в середньому на 40%. Таке збільшення спостерігається при різних витратах цементу і у різні строки випробувань.

Збільшення витрати цементу (x_1) у межах від 500 до 700 кг/м³ збільшує міцність при стиску на 8...20%. Зміна вмісту сталеві фібри (x_3) при постійному водоцементному відношенні суттєво не впливає на міцність досліджуваних бетонів. Базальтова фібри (x_4) дозволяє дещо підвищити міцність РПФБ, особливо у віці 28 діб.

Вміст сталеві фібри (x_3), є найбільш впливовим на величину міцності на розтяг при згині. Максимальний вплив даного фактору проявляється у віці 28 діб (38% від впливу усіх факторів). Другим за ступенем впливу на міцність на розтяг при згині є фактор В/Ц (33%), а його вплив у ранньому віці переважає вплив фактору вмісту сталеві фібри.

Вплив фактору вмісту сталеві фібри (x_3) носить слабо виражений екстремальний характер. Збільшення вмісту фібри від 120 ($x_3=-1$) до 210 ($x_3=0,5$) кг/м³ призводить до збільшення



міцності на розтяг при згині в середньому на 30...40 % залежно від значень інших факторів. Подальше ж збільшення кількості сталевих фібри суттєво не впливає на міцність РПФБ на розтяг при згині. Найменшим впливом на міцність на розтяг при згині при постійному В/Ц відзначається фактор витрати цементу (x_1).

Введення базальтової фібри до складу суміші в кількості до 4 кг/м^3 дозволяє збільшити міцність на розтяг при згині до 20% у порівнянні зі складами без її вмісту. Даний фактор сильно впливає на величину міцності у ранні строки твердіння і майже не поступається за силою впливу фактору вмісту сталевих фібри (x_3).

З метою досягнення максимальних значень міцності на розтяг при стиску необхідно підтримувати значення фактору В/Ц (x_2) на нижньому рівні варіювання, а факторів витрат сталевих (x_3) та базальтової фібри (x_4) на верхньому рівні.

Досягнення значень $f_{c,tf}^{28} > 30 \text{ МПа}$ можна забезпечувати в широкому діапазоні витрат сталевих та базальтової фібри ($x_3 = 0...1$; $x_4 = -0,75...1$) – відповідно $180...240 \text{ кг/м}^3$ сталевих та $0,5...4 \text{ кг/м}^3$ базальтової фібри.

Збільшення витрати сталевих фібри (x_3) та базальтової фібри (x_4) у варіюваних межах призводить до зростання витрати суперпластифікатора, що пояснюється потребою у забезпеченні необхідної легкоукладальності при потенційному збільшенні водопотреби. Зростання витрати цементу в межах від 500 ($x_1 = -1$) до 600 кг/м^3 ($x_1 = 0$) несуттєво впливає на витрату суперпластифікатора; при подальшому збільшенні вмісту цементу ($x_1 = 0...+1$) вміст СП зростає в 2...2,5 рази.

3.2.3. Реакційно-порошкові бетони з дисперсним армуванням сталевими сітками

Деформативність будівельних матеріалів, зокрема бетонів, їх здатність чинити опір механічним впливам значною мірою залежать від границі міцності на розтяг при згині. Для бетонних та залізобетонних конструкцій цей показник, а також здатність сприймати навантаження без втрати несучої здатності можуть забезпечуватися різними способами, що ґрунтуються на збільшенні деформативно-пластичних властивостей.



Збільшення значень деформативних властивостей бетону, а саме границі міцності на розтяг при згині та граничних деформацій бетону можна досягнути, якщо використовувати в якості дисперсного армуючого компонента, сталеві сітки, які розташовують в бетоні перпендикулярно діючим навантаженням (паралельно виникаючим розтягуючим напруженням).

Таке рішення здійснюють наступним чином. Використовують реакційно-порошковий бетон наступного складу, кг/м^3 : портландцемент ПЦ 500 I – 700; мелений пісок ($S_{\text{пит}} = 250 \text{ кг/м}^2$) – 360; пісок (0,16...1,25 мм) – 1130; СП Дунатон SP3 – 1,5%. В/Ц суміші складає 0,28, рухомість 25 см.

В якості дисперсного армуючого компонента (аналога фібри) використовують сталеві сітки, виготовлені зі сталі Ст. 3 із квадратними комірками діаметром стержнів 0,8 мм та кроком 10 мм. У форму для зразка розміром $16 \times 9 \times 4$ см укладають 10 сіток з відстанями між ними 4 мм. Далі виготовляють бетонну суміш для реакційно-порошкового бетону класу В80 і укладають її у форму. Заформований зразок твердіє в нормальних умовах протягом 28 днів. Після цього зразок піддають випробуванню на розтяг при згині за трьохточковою схемою, при цьому також будується діаграма навантаження – деформація (рис. 3.11).

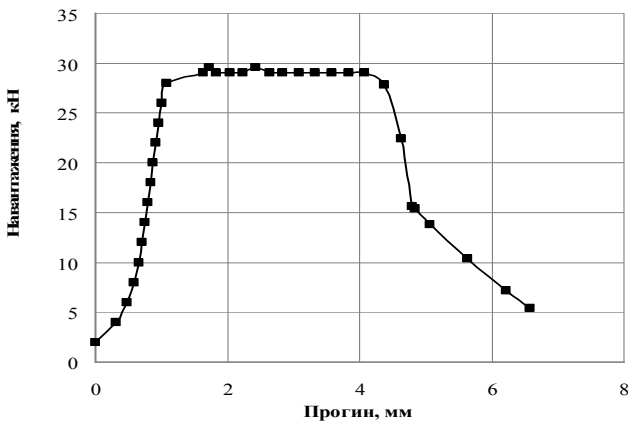


Рис. 3.11. Діаграма навантаження-деформація для зразка РПБ з 10 сітками



На діаграмі спостерігається суттєво виражене "плато" сталості навантаження при постійному зростанні деформації (прогину). Це свідчить про наявність високих деформативно-пластичних властивостей у випробуваного зразка

В табл. 3.11 наведені рішення щодо дисперсного армування зразків бетону на РПБ та дрібнозернистому бетоні а також з різним вмістом сіток і сталеві фібри.

Таблиця 3.11

Дисперсне армування досліджуваних зразків

Зразки (маркування)	РПБ	ДЗБ	С-3	С-5	С-10	Ф	ФД	С-5Ф
Бетон (матриця)*	РПБ	ДЗБ	РПБ	РПБ	РПБ	РПБ	ДЗБ	РПБ
К-сть сіток	–	–	3	5	10	–	–	5
Вміст сталі сіток, кг/м ³	–	–	46	70	140	–	–	–
Вміст сталеві фібри, кг/м ³	–	–	–	–	–	140	140	70

* ДЗБ – дрібнозернистий бетон; РПБ – реакційно-порошковий бетон

Зразки без дисперсної арматури (рис. 3.12) мають досить низькі значення граничних деформацій (близько 0,6 мм, з деякою перевагою реакційно-порошкового бетону). Характер руйнування – крихкий, що відображено майже прямими лініями на діаграмі та спостерігається візуально під час випробування.

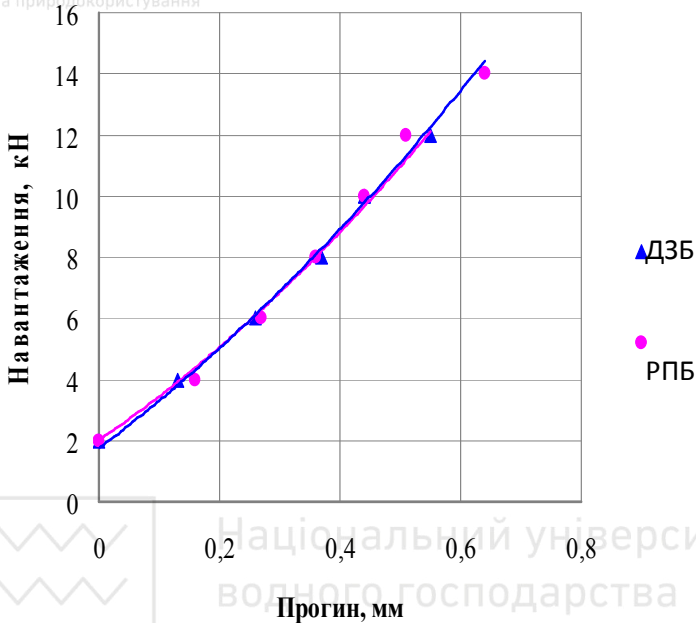


Рис. 3.12. Діаграма навантаження-деформація для зразків з дрібнозернистого та реакційно-порошкового

Введення до складу реакційно-порошкового та дрібнозернистого бетонів сталеві фібри приводить до зростання міцності на розтяг при згині, але головне – з'являються низхідні гілки на кривих деформацій (рис. 3.13). Це свідчить про покращення деформативних властивостей бетонів за рахунок дисперсного армування фіброю.

Найкращі результати в плані забезпечення високих деформативних властивостей бетонів показують зразки, що містять в собі дисперсну арматуру у вигляді сіток. Максимальне руйнівне навантаження відповідає зразку, що містить 10 сіток і для нього ж характерне яскраво виражене "плато" сталості навантаження при постійному зростанні деформації (рис. 3.14). Також достатньо хороші результати демонструє зразок із 5-ма сітками та фіброю (зразок С-5Ф). Для нього зафіксоване значення міцності на розтяг при згині навіть вище ніж у зразка з



10-ма сітками (С-10), в той же час низхідні гілки деформацій на діаграмі суттєво відрізняється, не на користь варіанту комбінованого армування. Також відмінним є і характер руйнування. Зразок С-10 після випробування зовні виглядає найменш зруйнованим.

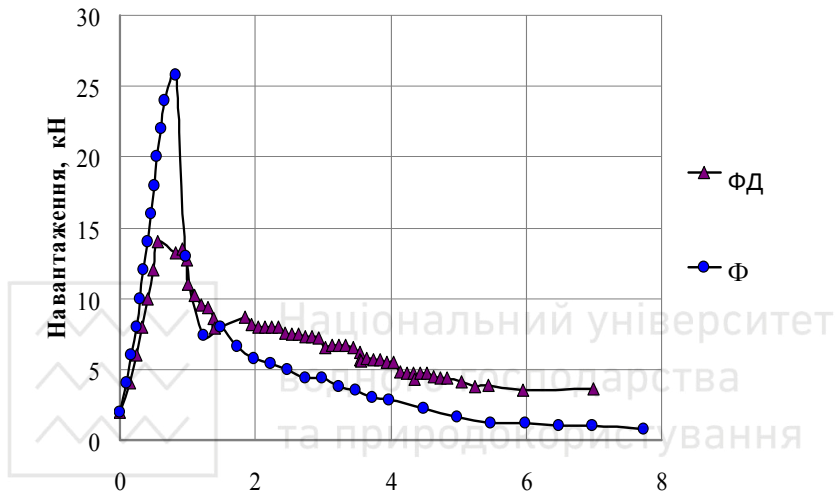


Рис. 3.13. Діаграма навантаження-деформація для зразків з дрібнозернистого та реакційно-порошкового фібробетону

Позитивний ефект збільшення деформативності бетону завдяки використанню сталевих сіток в якості дисперсної арматури досягається наступним чином. Сталеві сітки у масі бетону виступають аналогами фібри але, на відміну від неї, мають дві суттєві переваги: забезпечують можливість спільної роботи всього об'єму сталі при виникаючих напруженнях а також характеризуються правильною орієнтацією відносно діючим зовнішнім навантаженням. В результаті стає можливим суттєво підвищити міцність на розтяг при згині бетону та збільшити його пластичні деформації.

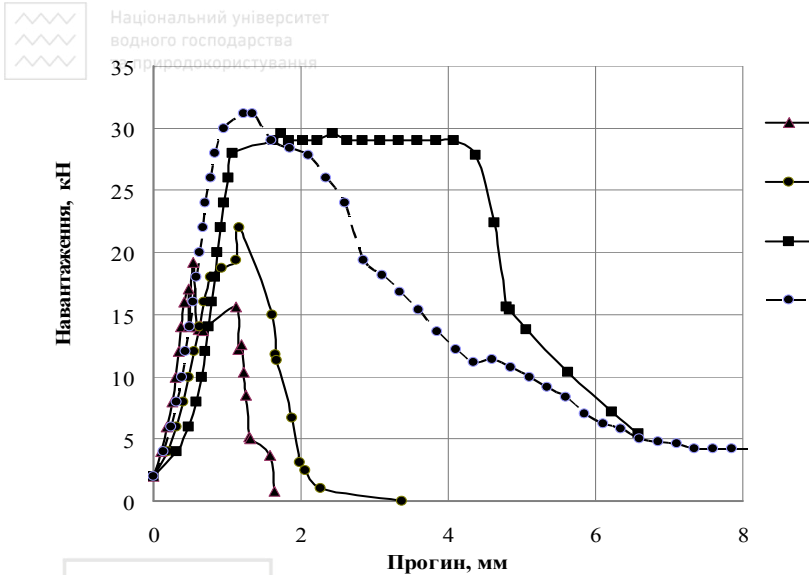


Рис. 3.14. Діаграма навантаження-деформація для зразків РПБ з різним вмістом сіток

Оптимальними параметрами дисперсного армування сітками є наступні: діаметр стержнів сітки 0,8...1,2 мм; крок сітки 10...15 мм; відстань між окремими сітками 3...10 мм; вміст сіток в бетоні (за масою) 75...200 кг/м³.

Діаметр стержнів сіток приймається аналогічно до найбільш поширених діаметрів сталевий фібри. При діаметрі менше 0,8 мм необхідно збільшувати кількість сіток в перерізі виробу або конструкції, а при діаметрі понад 1,2 мм – збільшується загальна витрата сталі на об'єм бетону. Зменшення кроку сітки менше 10 мм збільшує витрату сталі і ускладнює процес формування виробу, а збільшення понад 15 мм знижує ефективність роботи армуючого компонента.

Зменшення відстані між окремими сітками менше 3 мм ускладнює процес їх фіксації в опалубці або формі, а також погіршує рівномірність розподілу бетонної суміші. Збільшення відстані понад 10 мм приводить до появи ефекту "шаруватості" конструкції або виробу, що погіршує деформативні властивості.



Вміст сіток за масою приймається відповідно до найбільш поширених витрат сталевих фібри в бетоні. Зменшення вмісту нижче 75 кг/м^3 не забезпечує необхідних значень деформативних властивостей, а збільшення понад 200 кг/м^3 приводить до суттєвого зростання вартості конструкції без відповідного збільшення деформативності.

Ефективність дисперсного армування сітками проявляється при порівнянні результатів випробування зразка С-10 з 10 сітками і аналогічного за складом бетону зразком Ф з витратою фібри 140 кг/м^3 , що відповідала витраті сталі в зразку С-10.

Як видно з наведеної нижче діаграми (рис. 3.15), зразок С-10 має міцність на розтяг при згині 32 МПа , що на 30% більше ніж у зразка, виготовленого із використанням фібри (25 МПа). Крім того, суттєво збільшуються пластичні деформації, що зростають майже в 5 раз ($4 \dots 4,5 \text{ мм}$ проти $0,5 \dots 1 \text{ мм}$), що відображено на діаграмі навантаження-деформація.

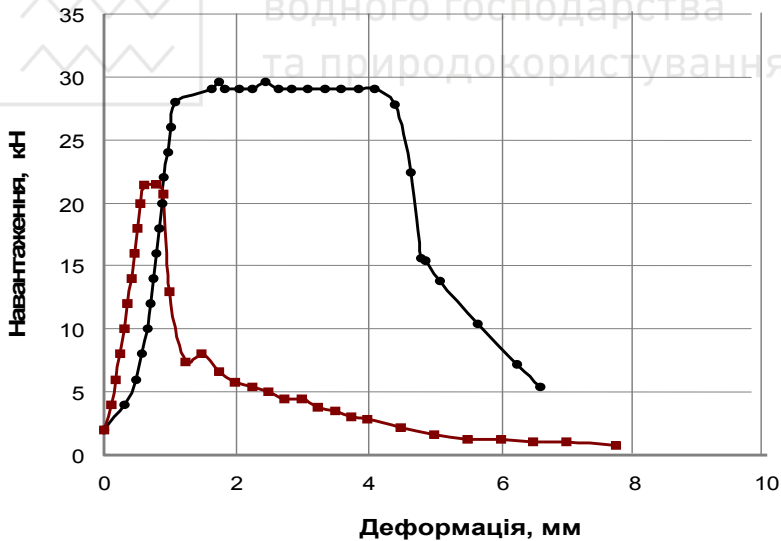


Рис. 3.15. Діаграма навантаження-деформація
1 – реакційно-порошковий бетон з 10 сітками;
2 – реакційно-порошковий фібробетон



Дисперсне армування реакційно-порошкових бетонів металевими сітками дозволяє суттєво покращити їх деформаційні властивості, або при тих же значеннях суттєво знизити витрати сталі у бетонних виробих і конструкціях. За рахунок вищесказаного досягається значний економічний ефект.

3.3. Проектування складів реакційно-порошкових фібробетонів

3.3.1. Загальні положення з розрахунку складів РПФБ

При підборі складу РПФБ доцільно використовувати співвідношення вихідних компонентів не за масою, а за об'ємом. На першому етапі встановлюються співвідношення між компонентами на основі типових діапазонів їх вмісту, що забезпечують нормовані показники реакційно-порошкової бетонної суміші:

- співвідношення вода / порошок (цемент, мінеральний наповнювач, фракції піску дрібніше 0,16 мм) за об'ємом – від 0,10 до 0,18;

- загальний вміст дисперсних матеріалів – від 450 до 600 літрів (1200-1500 кг) на кубічний метр;

- вміст цементу - 400-700 кг / м³ (витрата цементу понад 700 кг / м³ може збільшити усадку і повзучість бетону; витрата менше 400 кг / м³ може бути прийнятним тільки при використанні інших високоактивних дрібнодисперсних мінеральних наповнювачів або пуцоланових добавок);

- вміст заповнювача фракції 0,16...1,25 мм - від 40 до 55% за об'ємом бетонної суміші;

- водо-цементне відношення призначається виходячи з вимог забезпечення необхідної міцності; зазвичай вміст води не перевищує 210 л/м³;

- вміст піску визначається як різниця загального об'єму бетонної суміші і об'єму цементної пасти;

- вміст фібри залежить від її виду та геометричних характеристик. Для сталеві мікрофібри оптимальний її вміст



може змінюватись в межах від 120 кг/м^3 ($\mu = 1,54\%$) до 200 кг/м^3 ($\mu = 2,56\%$).

Подальше коректування складу може бути необхідним для забезпечення вимог до затверділому бетону, зокрема міцності.

У табл. 3.15 наведені орієнтовні діапазони складових РПФБ за масою і об'ємом. Ці пропорції не є гранично визначені, і значна кількість реакційно-порошкових бетонних сумішей можуть мати інші значення вмісту одного або декількох компонентів.

Таблиця 3.15

Орієнтовний діапазон витрати компонентів РПФБ

Компонент	Витрата матеріалу за масою, кг/м^3	Витрата матеріалу за об'ємом л/м^3
В'язуче + наповнювач	1200-1500	
Паста в'язучого + наповнювач		500-650
Вода	150-210	150-210
Дрібний заповнювач	Кількість врівноважує об'єм інших складових, як правило, 40-55% від загального об'єму	
Фібра: сталева	120...200	1,5...2,5
базальтова	2...4	0,08...0,15
Водо-в'язуче відношення	0,10-0,18	
Суперпластифікатор полікарбоксилатного або поліакрилатного типу	0,3...2% від маси цементу	

Реакційно-порошковий фібробетон може бути приготовлений в будь-якому бетонозмішувачі примусової дії, в тому числі в лопатевих змішувачах періодичної дії, але краще використовувати змішувачі неперервної дії. Проте, при виробництві РПФБ особливо важливо, щоб змішувач був в хорошому стані і міг забезпечити повне і рівномірне змішування



твердих матеріалів з достатнім зусиллям зсуву для диспергування і активації суперпластифікатора.

Час, необхідний для досягнення повного перемішування РПФБ може бути трохи більшим, ніж для звичайного бетону за рахунок зниження сил тертя і досягнення повної активації суперпластифікатора. Важливо проводити попередні випробування, щоб встановити ефективність окремих змішувачів і оптимальну послідовність при додаванні компонентів. Об'єм бетону для попередніх випробувань повинен бути не менше, ніж половина потужності змішувача.

Перед початком поставок бетонних сумішей рекомендується провести випробування на заводі для того, щоб в повному масштабі виробництва перевірити, чи відповідає бетонна суміш і затверділий бетон пропонованим до них вимогам.

Високий вміст наповнювачів і наявність фібри в бетоні може впливати на отримання однорідної суміші. Основна складність полягає в формуванні не перемішаних "агломератів" зі складових компонентів, які досить проблематично диспергувати при перемішуванні. Найчастіше "агломерація" відбувається в змішувачах періодичної дії.

Час перемішування повинен контролюватися, оскільки його зміна може змінювати властивості бетонної суміші. При використанні модифікатора в'язкості краще додавати його в кінці перемішування. Стандартна процедура перемішування приймається після проведення пробних замісів на заводі-виробнику і її необхідно дотримуватися для зменшення різниці якості бетонної суміші в різних партіях.

Добавки не повинні додаватися безпосередньо в сухі складові бетонної суміші. Їх необхідно додавати разом з водою замішування. Також різні типи добавок не повинні змішуватися разом до дозування, якщо це спеціально не обумовлено виробником. Це також відноситься і до можливості змішування різних добавок в дозаторі. Якщо використовуються повітровтягувальні добавки, то найкраще їх додавати перед суперпластифікатором і в той час, коли бетон ще має рідку консистенцію.



У зв'язку з потужним ефектом сучасних суперпластифікаторів важливо, щоб дозатори проходили регулярну перевірку, і обладнання мало високу точність дозування. Якщо, для виготовлення партії РПФБ потрібно більше одного дозування компонентів, то необхідно контролювати суму окремих додавань.

У процесі виробництва, може бути безліч факторів, які індивідуально або спільно змінюють однорідність суміші. Основними факторами є зміна кількості вільної вологи, розподіл частинок в об'ємі бетону і зміна послідовності дозування. Також, можна спостерігати зміну властивостей, при введенні до складу компонентів з інших партій. Оскільки, як правило, відразу не представляється можливим визначити причину зміни властивостей РПФБ, рекомендується проводити корегування консистенції бетонної суміші шляхом зміни кількості введеного суперпластифікатора

Завантаження складових матеріалів рекомендується проводити в наступній послідовності: спочатку перемішується насухо пісок-заповнювач з активним наповнювачем, потім вводиться необхідна кількість попередньо просіяних кризь сито фібр. Після цього в суміш додається цемент і вода з добавками. Перемішування компонентів здійснюється до забезпечення однорідного складу бетону. У ряді випадків волокно можна додавати до заповнювача, попередньо перемішаному з водою, а після цього вводиться цемент і необхідна кількість води.

Для автобетонозмішувачів потрібний додатковий час перемішування, так як вони менш ефективні, ніж заводські змішувачі. Поділ партії на дві або більше серій може поліпшити ефективність змішування. Особливо важливим є стан барабану автобетонозмішувача і змішувальних лопатей для РПФБ, і вони повинні регулярно перевірятися. Швидкість обертання барабана під час циклу змішування повинна відповідати рекомендаціям заводу-виготовлювача, але швидкість перемішування для РПФБ зазвичай знаходиться в діапазоні 10-15 обертів за хвилину.



3.3.2. Розрахунок складу РПФБ номографічним методом

На основі отриманої експериментально-статистичної моделі міцності на розтяг при згині ((3.9), табл. 3.4) побудовано номограму міцності РПФБ. Дана номограма в сукупності з отриманими моделями (табл. 3.4), може бути використана для проектування складів РПФБ з комплексом заданих властивостей.

Залежно від конкретних умов визначальними параметрами складу РПФБ можуть бути або водоцементне відношення або витрати фібри. При проектуванні складів за табл. 3.16 визначаємо бажаний діапазон в якому може знаходитись склад РПФБ із заданими значеннями міцності на стиск і розтяг при згині.

Таблиця 3.16

Орієнтовні значення міцнісних характеристик РПФБ у віці 28 днів

Витрата фібри, кг/м ³	В/Ц	R _{p,з} , МПа	R _{сг} , МПа
60...120	0,25...0,3	23...29	100...120
	0,3...0,35	22...25	85...100
120...180	0,25...0,3	25...33	110...135
	0,3...0,35	22...30	95...110
180...240	0,25...0,3	24...32	110...140
	0,3...0,35	23...29	95...115

Прийнявши певні витрати фібри або значення водоцементного відношення по номограмі наведеній на рис. 3.16 визначаємо основні параметри складу бетонної суміші, які будуть забезпечувати задану міцність бетону на розтяг при згині.

Переводимо отримані значення параметрів складу бетонної суміші в кодовий вигляд використовуючи формули (3.17–3.19):

$$X_1 = \frac{C - 600}{100} ; \quad (3.17)$$



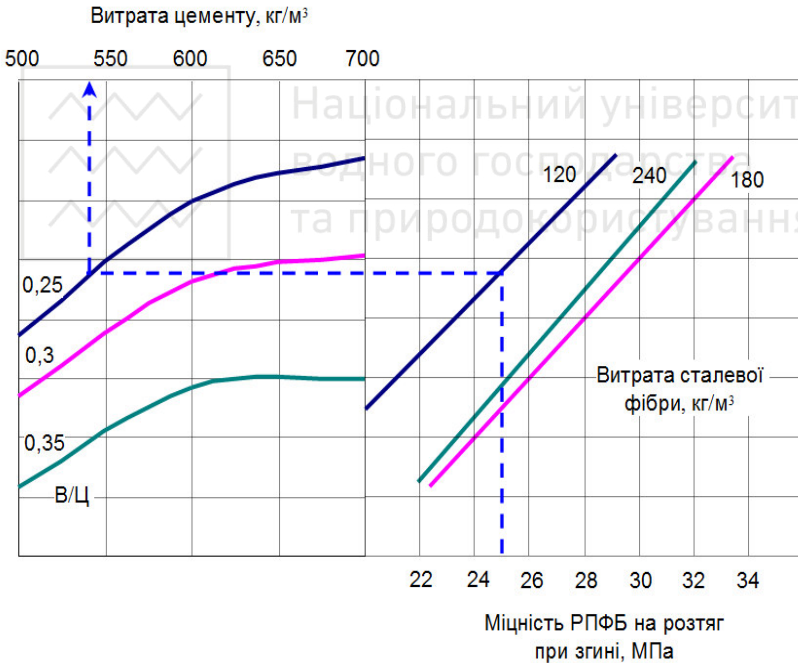
$$X_2 = \frac{B / \text{Ц} - 0,3}{0,05} ; \quad (3.18)$$

$$X_3 = \frac{C\Phi - 180}{60} . \quad (3.19)$$

Підставивши отримані значення в рівняння (3.6), перевіряємо забезпеченість необхідної міцності бетону при стиску у віці 28 діб.

Розраховуємо при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу витрати води за формулою:

$$B = \text{Ц} \cdot V / \text{Ц} . \quad (3.20)$$





Підставляємо переведені в кодовий вигляд значення витрати цементу, фібри та водоцементного відношення в рівняння (3.21), і визначаємо витрату суперпластифікатора поліакрилатного типу, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 20 см. При необхідності забезпечення іншої рухомості бетонної суміші вміст суперпластифікатора уточнюється експериментально.

$$\begin{aligned} \text{СП} = & 0,27 - 0,075 \cdot x_1 - 0,508 \cdot x_2 + 0,16 \cdot x_3 + 0,27 \cdot x_1^2 + 0,34 \cdot x_2^2 + \\ & + 0,05 \cdot x_3^2 + 0,02 \cdot x_1 x_2 - 0,02 \cdot x_1 x_3 - 0,06 \cdot x_2 x_3, \quad \% \end{aligned} \quad (3.21)$$

При знайдених значеннях витрати цементу та води, за відомими методиками по формулах (3.22–3.25) визначаємо витрати заповнювача (пісок (0,16...1,25 мм) та наповнювача (мелений пісок ($S_{\text{пнт}} = 250 \text{ кг/м}^2$)) враховуючи, що оптимальне співвідношення наповнювача та піску по масі складає 45% та 55% відповідно.

Загальний об'єм заповнювача та наповнювача:

$$V_{\text{зн}} = 1000 - V_{\text{ц.т.}} = 1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{\text{ц}}} + \frac{В}{\rho_{\text{в}}} + \frac{СФ}{\rho_{\text{с}}} \right), \quad (3.22)$$

де $\rho_{\text{ц}}, \rho_{\text{в}}, \rho_{\text{с}}$ – істинна густина цементу, води, сталі;

$V_{\text{ц.т.}}$ – об'єм цементного тіста.

Сумарна маса заповнювача та наповнювача:

$$m_{\text{зн}} = V_{\text{зн}} \cdot \rho_{\text{з}} \quad (3.23)$$

Маса наповнювача (мелений пісок):

$$m_{\text{м.п.}} = m_{\text{зн}} \cdot 0,45. \quad (3.24)$$

Маса заповнювача (пісок):

$$m_{\text{п}} = m_{\text{зн}} \cdot 0,55. \quad (3.25)$$

Приклад

Розрахувати склад реакційно-порошкового фібробетону з 28-добовою міцністю при стиску 110 МПа та міцністю на розтяг при згині 25 МПа, істинна густина суміші заповнювача та наповнювача (пісок і пісок мелений) $\rho_{\text{з}} = 2,7 \text{ г/см}^3$.

1. За табл. 3.16 визначаємо діапазон В/Ц та витрати фібри, в якому може знаходитись склад РПФБ із заданими значеннями міцності на стиск на розтяг при згині. В даному випадку цей



діапазон максимально широкий – це витрати фібри 120...240 кг/м³ та водоцементне відношення 0,25...0,35.

2. За номограмою (рис. 3.16, синя лінія), задавшись з позицій економії мінімальною витратою сталеві фібри 120 кг/м³, визначасмо необхідну витрату цементу і водоцементне відношення, які б забезпечували виконання поставленої вимоги щодо міцності фібробетону на розтяг при згині.

3. Переводимо отримані значення ($\Pi=540$ кг/м³, $B/\Pi=0,25$, $\Phi=120$ кг/м³) в кодований вигляд:

$$X_1 = \frac{(\Pi - 600)}{100} = \frac{(540 - 600)}{100} = -0,6;$$

$$X_2 = \frac{(B/\Pi - 0,3)}{0,05} = \frac{(0,25 - 0,3)}{0,05} = -1;$$

$$X_3 = \frac{(C\Phi - 100)}{60} = \frac{(120 - 180)}{60} = -1.$$

4. Підставляємо отримані значення в рівняння (3.6) та перевіряємо чи забезпечується необхідна міцність бетону при стиску у віці 28 діб 110 МПа.

$$f_{cm}^{28} = 107,4 + 12,9 \cdot 0,15 - 18,1 \cdot 0 + 3,6 \cdot (-1) - 5,8 \cdot (0,15)^2 + 5,1 \cdot 0^2 - 4,1 \cdot (-1)^2 - 2,2 \cdot 0,15 \cdot 0 = 112 \text{ МПа}.$$

Умова виконується $112 \geq 110$ МПа.

5. Розраховуємо, при заданому водоцементному відношенні і витраті цементу, витрати води за формулою (3.20):

$$B = \Pi \cdot V/\Pi = 540 \cdot 0,25 = 135 \text{ л/м}^3.$$

6. Підставляємо переведені в кодований вигляд значення витрати цементу ($X_1=-0,6$) водоцементного відношення ($X_2=-1$), сталеві фібри ($X_3=-1$) в рівняння (3.21) і визначасмо витрату суперпластифікатора поліакрилатного типу Дунатон SP3, яка забезпечить необхідну рухомість бетонної суміші 20 см.

$$СП = 0,27 \cdot 0,075 \cdot (-0,06) - 0,508 \cdot (-1) + 0,16 \cdot (-1) + 0,27 \cdot (-0,6)^2 + 0,34 \cdot (-1)^2 + 0,05 \cdot (-1)^2 + 0,02 \cdot (-0,6) \cdot (-1) - 0,02 \cdot (-0,6) \cdot (-1) - 0,06 \cdot (-1) \cdot (-1) = 1,21\% \text{ від маси цементу або } 6,54 \text{ кг/м}^3.$$



7. Визначаємо витрати заповнювачів за виразами (3.22–3.25):

$$V_{зп} = 1000 - V_{ц.м.} = 1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{СФ}{\rho_{с}} \right) =$$

$$1000 - \left(\frac{540}{3,1} + \frac{135}{1} + \frac{120}{7,85} \right) = 675 \text{ л}$$

$$m_{зп} = V_{зп} \cdot \rho_{з} = 675 \cdot 2,7 = 1822 \text{ кг/м}^3.$$

$$m_{м.п.} = m_{зп} \cdot 0,45 = 1822 \cdot 0,45 = 820 \text{ кг/м}^3.$$

$$m_{п} = m_{зп} \cdot 0,55 = 1822 \cdot 0,55 = 1001 \text{ кг/м}^3.$$

Отриманий за розрахунками РПФБ має наступний склад: цемент – 540 кг/м³, вода – 135 л/м³, мелений пісок – 820 кг/м³, пісок – 1001 кг/м³. Витрата суперпластифікатора Dynamon SP3 складає 6,54 кг/м³, витрата сталюї фібри 120 кг/м³.

Розрахований склад РПФБ необхідно перевірити експериментально.

3.3.3. Розрахунок складу РПФБ за критерієм мінімальної вартості.

При проектуванні складів бетону основними критеріями їх оптимізації зазвичай виступають мінімальна витрата цементу або мінімально можлива вартість бетону. Для звичайних бетонів ці критерії зазвичай співпадають. В обох випадках обов'язковим є забезпечення комплексу нормованих властивостей бетонної суміші та бетону.

Сучасні бетони є багатокомпонентними системами, вартість окремих компонентів яких може наблизитись або перевищувати вартість цементу. До таких бетонів можна віднести РПФБ. Вони відрізняються наявністю мінімум чотирьох компонентів (цементу, наповнювача, фібри та добавки пластифікатора), вміст яких може змінюватись в широкому діапазоні і які чинять основний вплив на сумарну вартість бетону.



Таким чином, задача проектування складу РПФБ за умов мінімізації його вартості при застосуванні традиційного підходу суттєво ускладнюється.

Для прикладу, на рис. 3.17 розглянутий випадок, коли необхідну міцність на розтяг при згині 25 МПа можна досягнути при одній й тій же витраті фібри (120 кг/м³) але при різних В/Ц (0,3 і 0,25), або різних витратах фібри (180, 120 кг) і при різних В/Ц (0,35, 0,3 і 0,25), що відповідно приводить до різних витрат цементу (540, 575 та 630 кг). Якщо ще врахувати необхідність окремого визначення витрати суперпластифікатора, який впливає як на властивості РПФБ, так і на його вартість, а також можливість забезпечення іншого показника якості (наприклад, міцності при стиску), то стає зрозумілим, що задачу оптимізації складу РПФБ розв'язати номографічним способом досить складно.

Для вирішення задач проектування складів РПФБ в умовах багатоваріантності їх розв'язку доцільно застосовувати методи математичного програмування.

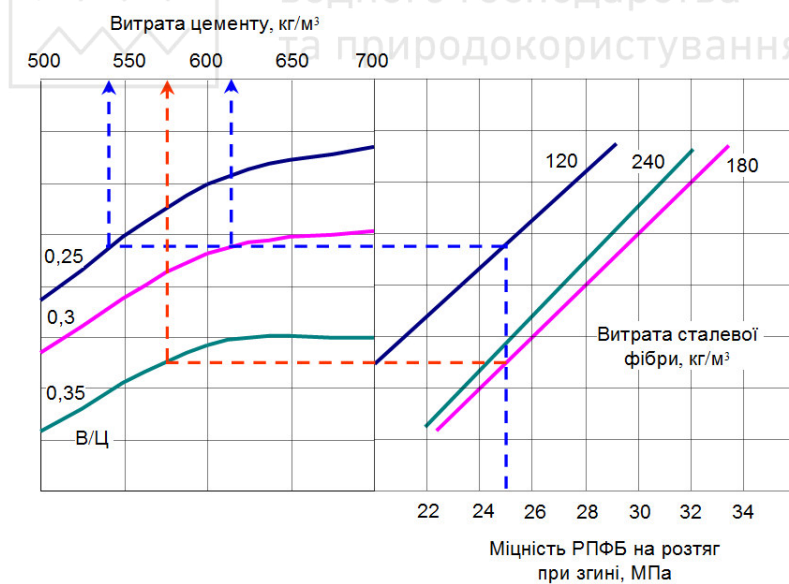


Рис. 3.17. Багатоваріантність розв'язку вирішення задачі проектування складу РПФБ номографічним методом



Умови задачі знаходження оптимального складу РПФБ із заданими показниками якості можна сформулювати наступним чином: знайти значення факторів складу РПФБ $x_1 \dots x_n$, що дозволяють мінімізувати його вартість:

$$B_{РПФБ} = B_{Ц} \cdot Ц + B_{Н} \cdot Н + B_{СП} \cdot СП + B_{Ф} \cdot Ф \rightarrow \min \quad (3.26)$$

за умови забезпечення необхідних показників якості

$$P_1 \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n); \quad (3.27)$$

$$P_2 \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

.....

$$P_m \geq f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\text{при } x_1 \dots x_n \in [a \dots b], \quad (3.28)$$

де $B_{Ц}$, $B_{Н}$, $B_{СП}$, $B_{Ф}$ – відповідно вартість цементу, наповнювача, суперпла-стифікатора та фібри, у.о./кг;

$Ц$, $Н$, $Д$, $Ф$ – відповідно витрата цементу, наповнювача, добавки суперпла-стифікатора та фібри, кг/м³ бетону;

$P_1 \dots P_m$ – задані показники якості РПФБ;

$x_1 \dots x_n$ – фактори складу;

a , b – обмеження на можливі значення факторів.

Для того, щоб розрахувати оптимальний склад РПФБ для прикладу, розглянутого вище, необхідно розв'язати задачу математичного програмування з наступною постановкою: *знайти такий склад бетонної суміші, який би дозволяв забезпечити необхідну міцність при стиску та розтягу при згині у віці 28 діб при мінімальній сумарній вартості в межах допустимих значень факторів.*

Найбільш раціональним способом вирішення такої задачі є використання програмного середовища Microsoft Excel, зокрема його додаток "Пошук рішення". Ця надбудова призначена для пошуку рішення рівнянь та задач оптимізації.

Послідовність розрахунку наступна. Підставляємо у моделі міцності при стиску та при згині (3.6, 3.9) значення міцностей, що повинні забезпечуватись, а у вираз (3.26) – значення вартості компонентів РПФБ. У виразі 3.28 встановлюємо обмеження значень факторів (в кодованих значеннях від -1 до 1). Далі програма перебирає різні комбінації факторів забезпечуючи не менше заданих значення міцностей за виразами (3.27) та (3.28) мінімізуючи при цьому функцію (3.26).



Для встановлення вартості РПФБ під час ітерацій паралельно визначається необхідний вміст суперпластифікатора за відповідним рівнянням (3.21) при знайдених проміжних значеннях факторів $x_1 \dots x_4$ а також витрати наповнювача за виразами (3.22–3.25).

Результатом таких ітерацій є визначення оптимальних значень факторів складу: В/Ц, витрати цементу, фібри, наповнювача а також суперпластифікатора. Витрати води та заповнювача можна знайти за виразами (3.20, 3.22–3.25).

Приклад розрахунку 2. Визначити склад РПФБ з міцністю у віці 28 діб при стиску 110 МПа та міцністю на розтяг при згині 28 МПа із рухомістю суміші 20 см використовуючи експериментально-статистичні моделі (3.6, 3.9). Приймаємо вартості основних компонентів фібробетону наступними, у.о./кг: $V_{Ц} = 3$; $V_{Ф} = 50$; $V_{Н} = 2$; $V_{СП} = 260$.

Матеріали: портландцемент М500, дрібний заповнювач з модулем крупності $M_k = 2,5$ середньої якості та дійсною густиною $\rho_3 = 2,7$ кг/л, наповнювач – мелений кварцовий пісок ($S_{пит} = 250$ кг/м²), сталева мікрофібра ($l = 13$ мм; $d = 0,25$ мм) Передбачається використання суперпластифікатора Дупамон SP3.

1. Підставляючи значення міцності при стиску та згині у відповідні вирази (3.6, 3.9), отримаємо функції обмежень (3.27) задачі:

$$\begin{aligned} 107,4 + 12,9 \cdot X_1 - 18,1 \cdot X_2 + 3,6 \cdot X_3 - 5,8 \cdot X_1^2 + 5,1 \cdot X_2^2 - 4,1 X_3^2 - \\ 2,2 \cdot X_1 \cdot X_2 \geq 110; \\ 29,3 + 2,41 \cdot X_1 - 3,12 \cdot X_2 + 1,92 \cdot X_3 - 1,52 \cdot X_1^2 - 0,47 \cdot X_2^2 - 2,81 \cdot X_3^2 - \\ 0,59 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,44 \cdot X_1 \cdot X_3 \geq 28. \end{aligned}$$

2. У вираз (3.27) підставляємо значення вартості компонентів фібробетону, а також задаємо обмеження значень факторів: від -1 до 1 (в кодованому вигляді).

3. За допомогою програмного додатку «Пошук рішення» знаходимо значення факторів, що задовольняють обмеження задачі і мінімізують загальну вартість фібробетону:

$$x_1 = 0,535; x_2 = -0,388; x_3 = -0,843.$$

При таких значеннях факторів за відповідними моделями (3.6, 3.9) $f_{c,tf}^{28} = 28$ МПа, що відповідає необхідному значенню



міцності на розтяг при згині, а $f_{cm}^{28} = 115,0$ МПа, що є більшим необхідного значення міцності при стиску.

4. Значення факторів в натуральному вигляді визначаємо за виразами (3.17–3.19):

$$Ц = 100 \cdot x_1 + 600 = 100 \cdot (0,535) + 600 = 653,5 \text{ кг/м}^3;$$

$$В/Ц = 0,05 \cdot x_2 + 0,3 = 0,05 \cdot (-0,388) + 0,3 = 0,28;$$

$$СФ = 60 \cdot x_3 + 180 = 60 \cdot (-0,843) + 180 = 129,4 \text{ кг/м}^3.$$

5. Витрата суперпластифікатора за виразом (3.21):

- у % від маси цементу:

$$СП' = 0,48\%;$$

- за масою:

$$СП = СП' \cdot Ц / 100 = 0,48 \cdot 653,5 / 100 = 3,14 \text{ кг/м}^3.$$

6. Витрата води за виразом (3.20):

$$В = 653,5 \cdot 0,28 = 183,4 \text{ л.}$$

7. Витрата наповнювача за виразами (3.22–3.24):

$$V_{zn} = 1000 - V_{ц.м.} = 1000 - \left(\frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{В}{\rho_{в}} + \frac{СФ}{\rho_{с}} \right) =$$

$$1000 - \left(\frac{653,5}{3,1} + \frac{183,4}{1} + \frac{129,4}{7,85} \right) = 589 \text{ л}$$

$$m_{zn} = V_{zn} \cdot \rho_{з} = 589 \cdot 2,7 = 1591,2 \text{ кг/м}^3.$$

$$m_{м.п.} = m_{zn} \cdot 0,45 = 1591,2 \cdot 0,45 = 716 \text{ кг/м}^3.$$

8. Значення мінімально можливої вартості 1 м³ фібробетону без врахування вартості заповнювача та води (знаходиться під час ітерацій в програмному додатку «Пошук рішення», вираз (3.26)):

$$В_{РПФБ} = 3 \cdot 653,5 + 260 \cdot 3,14 + 50 \cdot 129,4 + 716 \cdot 2 = 10680,4 \text{ у.о.}$$

9. Витрата заповнювача за виразом (1.25):

$$m_n = m_{zn} \cdot 0,55 = 1591,2 \cdot 0,55 = 875,2 \text{ кг/м}^3.$$

Остаточний склад РПФБ суміші, кг/м³:

$$Ц = 653,5; В = 183,4; Н = 716; П = 875; СФ = 129,4; СП =$$

3,14.

Розрахований склад РПФБ необхідно перевірити експериментально.



Додаток А
Таблиця А.1

Цементи, що виготовляються в Україні

Цементний завод	Тип портландцементу
Волинь-Цемент філія ПАТ Дікергофф Цемент Україна м. Здолбунів	Портландцемент ПЦ І-500Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400
	Портландцемент тампонажний ПЦТ І-100
	Портландцемент тампонажний ПЦТ ІІ-50.
ЮГцемент філія ПАТ Дікергофф Цемент Україна, м. Миколаїв	Портландцемент ПЦ І-500Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/Б-Ш-400Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/Б-Ш-300
ПАТ "Подільський цемент", м. Кам'янець-Подільський ПАТ "Миколаївцемент", м. Миколаїв Львівської обл.	Сульфатостійкий шлакопортландцемент СС ШПЦ-400-Д60.
	Портландцемент ПЦ І-500
	Портландцемент ПЦ І-500 Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/Б-К(Ш-З)-400
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400 Р
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400
ВАТ "Івано-Франківськцемент"	Сульфатостійкий шлакопортландцемент СС ШПЦ 400-Д60
	Портландцемент ПЦ І-500Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш 400Р-Н
	Шлакопортландцемент ШПЦ ІІІ/А-400Р
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-П-400Р-Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/Б-К(Ш-В-П)-400Р-Н
Сульфатостійкий портландцемент ССПЦ 400-Д20	



продовження табл. А.1

	Цемент для будівельних розчинів марки 300 ЦБР 300
	Тампонажний цемент марки ПЦТ І-100
	Тампонажний цемент марки ПЦТ ІІ-50
	Цемент для дорожніх бетонів
	Сульфатостійкий портландцемент ССПЦ 400-Д0
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-ІІ-500Р-Н
ПрАТ «Хайдельберг-Цемент Україна» Криворізький Завод Дніпродзержинський Завод	Портландцемент ПЦ ІІ/БШ-400
	Портландцемент ПЦІ-500
	Цемент для будівельних розчинів ЦБР 300
	Шлакопортландцемент ШПЦ ІІІ/А-400
ПрАТ «Євроцемент-Україна» м. Балаклія Харківської област	Портландцемент для азбестоцементних виробів ПЦА
	Портландцемент ПЦ І-500 –Н
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-500
	Портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-400 Р
	Портландцемент ПЦ ІІ/Б-Ш-400
	Шлакопортландцемент ШПЦ ІІІ/А-Ш-400
	Сульфатостійкий шлакопортландцемент СС ШПЦ-400



Розрахунок складу реакційно-порошкового бетону за допомогою програми «FORT-RPCConcrete»

Оптимізацію складу високоміцного реакційно-порошкового бетону з метою забезпечення комплексу необхідних властивостей за умови мінімізації ресурсів здійснено на основі отриманих математичних моделей міцності при стиску та згині у різному віці та водопотреби бетонної суміші (2.4–2.7).

Процес оптимізації складу проводиться за наступною схемою (рис. Б.1):

- На першому етапі роботи програми вводяться вихідні дані, котрі включають: проектну міцність при стиску та (або) при згині бетону, котрі є основними механічними характеристиками бетону; умови твердіння бетону і його проектний вік; технологічні властивості бетонної суміші (рухомість); вид і характеристики сировинних матеріалів.

- Залежно від введених вихідних даних вибирається математична модель міцності, за якою проводиться оптимізація.

- Використовуючи моделі міцності наведені у попередньому розділі, залежно від виду використаного наповнювача, почергово визначаємо витрату суперпластифікатора, витрату цементу та вміст наповнювача, які будуть забезпечувати проектну міцність РПБ у визначеному віці та при необхідних умовах твердіння при умові мінімальної витрати ресурсів.

- Використовуючи модель водопотреби наведену у попередньому розділі, залежно від виду використаного наповнювача, при попередньо визначених витраті суперпластифікатора, цементу та наповнювача, встановлюємо витрату води яка буде забезпечувати отримання бетонної суміші із заданою рухомістю.

- За формулами (2.2...2.5) знаходимо витрати цементу, хімічної і мінеральної добавок, витрату заповнювачів за масою і за об'ємом, котрі виводяться на екран як результат розрахунку.

- У випадку, коли неможливо досягнути заданих характеристик при наявних ресурсах вводиться додаткова опція



у вигляді додавання до бетону сталеві фібри, котра суттєво розширює діапазон можливих характеристик бетону спеціальних споруд.

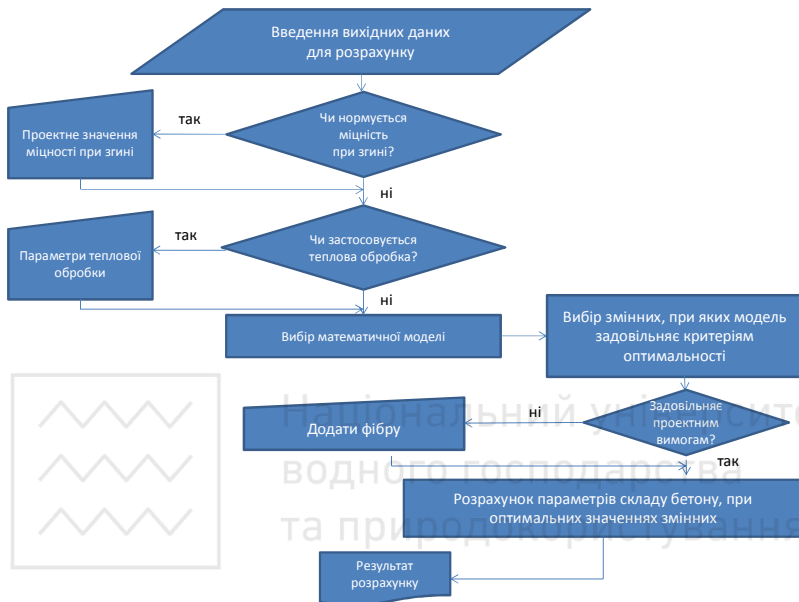


Рис. Б.1. Схема алгоритму розрахунку складу РПБ

Задачу оптимізації складу вирішуємо із застосуванням методу послідовного квадратичного програмування. Послідовне квадратичне програмування (англ. Sequential quadratic programming (SQP)) – один з найбільш поширених і ефективних оптимізаційних алгоритмів загального призначення, основною ідеєю якого є послідовне вирішення завдань квадратичного програмування, апроксимуючих це завдання оптимізації. Для оптимізаційних задач без обмежень алгоритм SQP перетворюється в метод Ньютона пошуку точки, в якій градієнт цільової функції звертається в нуль. Для вирішення вихідної задачі з обмеженнями-рівностями метод SQP перетворюється в спеціальну реалізацію ньютонівських методів розв'язання системи Лагранжа.



Програмна реалізація оптимізації та проектування складу високоміцного реакційно-порошкового бетону

Програмна реалізація здійснена на мові програмування Python та з використанням графічний інтерфейс Tkinter. Інтерфейс програми «FORT-RPConcrete» з головного вікна, вікна характеристик сировини, а також додаткових вікон – вікна вартості сировини та вікна характеристик фібри (яка використовуються користувачем при необхідності).

Головне вікно програми (рис. Б.2) призначене для створення завдання на проектування складу бетону з необхідними проектними властивостями та здійснення самого розрахунку.

Рис. Б.2. Головне вікно програми

В цьому вікні задаються значення необхідної міцності бетону при стиску та (або) при згині (чи відповідні класи бетону), рухомість бетонної суміші, умови та термін твердіння бетону. При введених характеристиках сировини в даному вікні



можна також провести кінцевий розрахунок, отримати і вивести результати (рис. Б.3)

Проектування складу реакційно-порошкового бетону

Міцність при стиску, МПа	<input type="text"/>	Міцність при згині, МПа	<input type="text"/>
Клас бетону за міцністю при стиску	<input type="text"/>	Клас бетону за міцністю при згині	<input type="text"/>
Рухомість бетонної суміші, см	<input type="text"/>	Марка за рухомістю	<input type="text"/>
Умови твердіння	<input type="text" value="Пропарювання"/>	Термін твердіння, діб	<input type="text" value="28"/>

Розрахувати

Результати

Проектна міцність при стиску, МПа = 47.5
Проектна міцність при згині, МПа = 12.0
Витрата цементу(на 1м ³), кг = 861.0
Витрата води, л = 243.0
Витрата мінеральної добавки, кг = 344.0
Витрата добавки-суперпластифікатора, кг = 17.0
Витрата заповнювача, кг = 892.7

Рис. Б.3. Головне вікно з виведеними результатами розрахунку

Вікно «Характеристики» (рис. Б.4) призначене для введення характеристик сировинних матеріалів, що використовуються для виготовлення проектного бетону. В даному вікні вводяться характеристики цементу (Марка (активність), нормальна густина, насипна та істина густини), котрі необхідні для розрахунку, мінеральної добавки та суперпластифікатора без яких неможливо отримати такий вид бетону та заповнювача (піску).

Для добавок є можливість вибрати їх вид, котрий суттєво впливає на результат розрахунку, так як вибирає математичну модель, за якою здійснюється оптимізація складу бетону. Також вікно дає можливість ввести технічні характеристики компонентів.

Вікно також містить кнопки для введення додаткових опцій, таких як «Фібра» (котра може вводиться при



неможливості забезпечення проектних значень міцності) та «Вартість» (дана кнопка дає можливість введення реальної вартості сировинних матеріалів і здійснення оптимізації за мінімальною вартістю).

Виведення
Розрахунок: Характеристики

Цемент

Активність, МПа: Марка за міцністю: Нормальна густина, %:

Насипна густина, кг/м³: Істинна густина, кг/м³:

Мінеральна добавка

Вид добавки:

Насипна густина, кг/м³: Істинна густина, кг/м³:

Добавка - суперпластифікатор

Водоредуруючий ефект (зменшення водопотреби), %:

Тип добавки: Густина розчину добавки, кг/м³:

Заповнювач

Вид:

Модуль крупності: Насипна густина, кг/м³: Істинна густина, кг/м³: Фібра:

Рис. Б.4. Вікно «Характеристики»



Проектування складу реакційно-порошкового бетону

Міцність при стиску, МПа	<input type="text" value="100"/>	Міцність при згині, МПа	<input type="text"/>
Клас бетону за міцністю при стиску	<input type="text"/>	Клас бетону за міцністю при згині	<input type="text"/>
Рухомість бетонної суміші, см	<input type="text"/>	Марка за рухомістю	<input type="text"/>
Умови твердіння	<input type="text" value="Нормальні умов"/>	Термін твердіння, діб	<input type="text" value="1"/>
<input type="button" value="Розрахувати"/>			
Міцність при стиску, МПа	<input type="text" value="98.2"/>	Міцність при згині, МПа	<input type="text" value="8.4"/>
Клас бетону за міцністю при стиску	<input type="text" value="B75"/>	Клас бетону за міцністю при згині	<input type="text" value="Bтб6,4"/>
Рухомість бетонної суміші, см	<input type="text"/>	Марка за рухомістю	<input type="text"/>
Умови твердіння	<input type="text"/>	Термін твердіння, діб	<input type="text" value="1"/>

Рис. Б.5. Поле для вводу і рекомендовані значення та інших полів та надписів

Залежно від вибраних добавок та умов твердіння вибираються параметри рівнянь для міцності та водопотреби на основі математичних моделей отриманих внаслідок проведення експерименту. Програма може оптимізувати склад бетону для бажаної міцності при згині та стиску одночасно.



ЛІТЕРАТУРА

1. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Основи бетонознавства. К. : Основа, 2007. 616 с.
2. Дворкін Л. Й. Бетони спеціального призначення : навч. посіб. К. : Видавничий дім «Кондор», 2018. 354 с.
3. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони / Дворкін Л. Й., Бабич Є. М., Житковський В. В. та ін. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.
4. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Эффективные цементно-зольные бетоны и растворы. Palmarium academic publishing, 2015. 436 p.
5. Рекомендації з проектування залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд / Бабич Є. М., Дворкін Л. Й., Житковський В. В. та ін. Рівне : НУВГП, 2018. 173 с.





Національний університет
водного господарства
та природокористування

Наукове видання

*Дворкін Леонід Йосипович
Бордюженко Олег Михайлович
Житковський Вадим Володимирович*

**РЕКОМЕНДАЦІЇ
З ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА
ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДІВ РЕАКЦІЙНО-
ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ**



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Підписано до друку 07.12.2020 р. Формат 60×84^{1/16}.
Ум.-друк. арк. 5,4. Обл.-вид. арк. 5,6.
Тираж 300 прим. Зам. № 5532.

*Видавець і виготовлювач
Національний університет
водного господарства та природокористування
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33028.*

*Свідцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.*