

**В. П. Загреба, І. Н. Дудар**

**ФОРМУВАННЯ БЕТОННИХ  
І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ВИРОБІВ  
МЕТОДОМ ПУЛЬСУЮЧОГО ПРЕСУВАННЯ  
БЕТОННИХ СУМІШЕЙ**

$$P(\tau) = \frac{P_{\max} + P_{\min}}{2} + \frac{A_p}{2} \sin \omega \tau$$

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. П. Загреба, І. Н. Дудар**

**ФОРМУВАННЯ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
ВИРОБІВ МЕТОДОМ ПУЛЬСУЮЧОГО ПРЕСУВАННЯ  
БЕТОННИХ СУМІШЕЙ**

**Монографія**

УНІВЕРСУМ-Вінниця

2009

УДК 693.546.5

З 14

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерство освіти і науки України (протокол № 11 від 24. 04. 2008 р.)

Рецензенти:

**Н. М. Руденко**, доктор технічних наук, професор;

**В. Р. Сердюк**, доктор технічних наук, професор.

**В. П. Загреба, І. Н. Дудар**

З 14 Формування бетонних і залізобетонних виробів методом пульсуючого пресування бетонних сумішей : монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 104 с.

ISBN 978-966-641-303-4

В монографії розглядаються теоретичні та практичні питання вдосконалення та оптимізації процесів формування бетонних і залізобетонних виробів методом пульсуючого пресування бетонних сумішей. Така технологія забезпечує підвищення фізико-механічних властивостей та якості бетону, зменшення витрат матеріальних та енергетичних ресурсів, скорочення технологічного циклу виготовлення залізобетонних конструкцій та підвищення продуктивності обладнання.

**УДК 693.546.5**

**ISBN 978-966-641-303-4**

© В. Загреба, І. Дудар, 2009

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. Технологічні особливості сучасних методів ущільнення бетонних сумішей .....	5
1.1. Технологічні особливості вібраційних способів ущільнення бетонних сумішей.....	5
1.2. Технологічні особливості безвібраційних способів ущільнення бетонних сумішей.....	11
1.3. Мета і завдання досліджень .....	22
Розділ 2. Сутність методу пульсуючого пресування бетонних сумішей, апаратура і методика експериментальних досліджень .....	24
2.1. Суть методу пульсуючого пресування бетонних сумішей .....	24
2.2. Методика експериментальних досліджень.....	30
2.3. Прилади і пристрої для експериментальних досліджень режимів пульсуючого пресування і фізико-механічних властивостей прес-бетону .....	37
Розділ 3. Вплив структурно-механічних характеристик бетонної суміші на міцність та морозостійкість прес-бетону .....	46
3.1. Експериментальні дослідження і визначення раціонального відношення дрібного і крупного заповнювачів .....	46
3.2. Вплив витрат цементу і водовмісту бетонної суміші на міцність і морозостійкість прес-бетону .....	55
3.3. Рекомендації з розрахунку складу бетонної суміші для формування виробів методом пульсуючого пресування .....	63
Розділ 4. Експериментальні дослідження і визначення раціональних режимів пульсуючого пресування бетонних сумішей .....	65
4.1. Визначення раціональної частоти пульсуючого пресування .....	65
4.2. Визначення раціональної амплітуди пульсуючого пресування .....	70
4.3. Визначення раціональних значень пресуючого тиску і тривалості пульсуючого пресування.....	73
Розділ 5. Дослідно-промислова перевірка та ефективність результатів дослідження .....	84
5.1. Конструктивно-технологічні особливості установки для виготовлення бетонних виробів методом пульсуючого пресування .....	84
5.2. Відпрацювання технологічних режимів дослідно-промислового виробництва бетонних виробів методом пульсуючого пресування .....	87
Висновки .....	95
Література .....	97

## ВСТУП

Значні темпи розвитку економіки останніми роками в Україні стимулюють збільшення обсягів будівництва, що в свою чергу вимагає відновлення і розвитку будівельної індустрії, а саме виробництва високоякісних, міцних і довговічних бетонних і залізобетонних виробів для реконструкції, капітального і шляхового будівництва.

В умовах підвищеного попиту вітчизняні виробники не завжди випускають якісні і довговічні вироби із бетону, особливо для шляхового будівництва і благоустрою прибудинкових територій. Орієнтація на імпортовану продукцію і зарубіжні технології виготовлення виробів із бетону, також не задовольняє споживачів через їх дорожнечу і недовговічність, особливо на ціну впливають транспортні витрати.

На сучасному етапі в Україні особливо гостро постала проблема економії ресурсів і енергозбереження, а тому уникнення теплової обробки або її скорочення, при виготовленні виробів із бетону є особливо актуальним.

В зв'язку з цим у монографії викладені результати наукових і практичних досліджень авторів з розробки силового способу формування бетонних і залізобетонних виробів пульсуючим пресуванням. Формування методом пульсуючого пресування дає змогу покращити міцність, морозостійкість і довговічність виробів, скоротити витрати матеріально-технічних і енергетичних ресурсів, забезпечити сприятливі умови праці.

В монографії розкрита сутність і обґрунтована ефективність застосування пульсуючого пресування бетонних сумішей, визначені раціональні параметри режимів пресування. Досліджено вплив витрат цементу і рухливості бетонної суміші на міцність і морозостійкість прес-бетону, визначене раціональне співвідношення дрібного і крупного заповнювачів.

Розроблені рекомендації з проектування складу бетонної суміші для ущільнення пульсуючим пресуванням. Описана конструкція дослідно-промислової установки для реалізації розробленого методу формування дрібнорозмірних виробів і технологічні режими їх виробництва.

Монографія призначена для наукових працівників і спеціалістів, що працюють в галузі бетонознавства над проблемами міцності і морозостійкості. Актуальна для виробників, які спеціалізуються на виготовленні шляхових і тротуарних виробів із бетону.

## **Розділ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ**

### **1.1. Технологічні особливості вібраційних способів ущільнення бетонних сумішей**

Найбільш широко розповсюдженим видом вібраційного формування є стендове (станкове) віброущільнення, при якому форму з бетонною сумішшю встановлюють на віброплощадку, яка підлягає коливанням від віброуючого органу. Для стендового вібрування застосовуються віброплощадки різного виду, в чому полягають технологічні особливості методу. Класифікують віброплощадки по компоновці стола і віброуючого органу, вантажопідйомності і основних параметрах вібрації. По компоновці розрізняють віброплощадки, що мають один стіл з розташованим знизу віброзбуджувачем, і віброплощадки блочного типу, що складаються з уніфікованих блоків з одним віброзбуджувачем, розташованим під столом одного з блоків.

Вантажопідйомність площадок визначається потужністю привідних двигунів. Найбільш розповсюджені віброплощадки вантажопідйомністю 3, 5, 7, 10 і 15 т, окремі 20 і 25 т. Вантажопідйомність блочних віброплощадок знаходиться в межах 2...24 т. при вантажопідйомності одного уніфікованого блока від 1 до 1,5т [1].

Згідно з [1] основними параметрами вібрації є амплітуда вібропереміщення  $A$  (мм) і частота  $f$  (Гц), решта параметрів похідні. Для ущільнення бетонних сумішей використовуються віброплощадки в діапазоні частот від 10 до 75 Гц. Проте, в більшості випадків використовуються віброплощадки з частотою 25...50 Гц, при амплітуді в межах 0,3...0,6 мм. Стандартним є режим вібрації з параметрами  $f=50$  Гц а  $A=0,35$  мм. Основною перевагою стендового віброущільнення є його велика технологічна універсальність за номенклатурою виробів, що формуються.

Сказане вище відноситься, в основному, до вертикально направленої вібрації, проте, в наш час з успіхом застосовується також і поздовжньо горизонтальне вібрування. Вібраційний вплив в цьому випадку передається на бетонну суміш головним чином через дно і бокові стінки форми, а також через поздовжні натягнуті стержні арматури. Формувальні установки з горизонтальною вібрацією випускаються вантажопідйомністю від 5 до 25 т, частота коливань 25...50 Гц при амплітуді 0,4...0,8 мм. Горизонтальна вібрація застосовується при формуванні виробів обмеженої довжини і малоефективна для жорстких бетонних сумішей. Тому її ефективно застосовувати сумісно з вертика-

льною вібрацією. В цьому випадку досягається високий ступінь ущільнення бетонної суміші.

Застосовується також формування виробів з поверхневою вібрацією за допомогою віброрейок, віброплит та інших засобів. Для ущільнення монолітно-бетонуючих конструкцій безпосередньо на будівельному майданчику застосовують різного виду глибинні вібратори. При всіх розглянутих видах вібрації механізм ущільнення бетонної суміші майже не відрізняється, відрізняється тільки використовуваним устаткуванням. В процесі вібрування в бетонній суміші одночасно відбувається два процеси: тиксотропне розрідження цементного тіста і зміна просторової упаковки зерен заповнювачів. Перший процес полегшує прояв другого, а другий в свою чергу додатково впливає на перший. Проте, згідно з сучасним представленням, вібрація розглядається не тільки як спосіб механічного ущільнення бетонної суміші, але і як засіб дії на фізико-хімічні процеси, сприяючи активізації коагуляційного ущільнення цементного тіста і гомогенізації бетонної суміші в цілому [1].

Станкове віброущільнення має ряд недоліків, одним з яких є неможливість одержати високі фізико-механічні властивості бетону. У зв'язку з цим, для підвищення фізико-механічних характеристик бетону, суміші ущільнюють вібрацією у поєднанні з іншими видами впливу. Розглянемо деякі з них.

Вібропресування являє собою послідовне накладення на бетонну суміш двох видів механічної дії: вібрація і пресування. Сутність його полягає в тому, що укладена в форму і рівномірно ущільнена вібрацією бетонна суміш піддається пресуванню тиском, який забезпечує подальше примусове ущільнення в результаті витискування або зменшення в об'ємі залученого в суміш повітря і відтиску з неї частини вільної води. При цьому вібрація повинна передувати пресуванню, оскільки їх сумісність викликає підвищення внутрішнього тертя в стиснутій бетонній суміші, перешкоджає і фактично зводить нанівець ефект вібрації. Ефект її полягає не тільки в ущільненні, а і в рівномірному розподілі бетонної суміші, а також і в віброактивації цементного тіста. Так з даних [2] міцність зразків із віброактивованого цементного тіста більша міцності аналогічних відпресованих при тому ж тиску.

Загальна деформація вібропресованого бетону складається з оборотних (зближення зерен заповнювача, і витіснення води) і деяких оборотних пружних (зменшення об'єму повітряних пор) складових. Тому досягнутий стиснений стан повинен зберігатися у відпресованому виробі протягом деякого часу, необхідного для досягнення бетонноміцності, що дозволяє фіксувати досягнутий ступінь ущільнення на подальший час.

Вібропресування застосовується для формування багатьох виробів, зокрема, для виробництва тротуарних плит і дорожніх елементів, при виготовленні напірних залізобетонних труб методом віброгідропресування і інших виробів із жорстких в основному дрібнозернистих сумішей.

Суттєвий вклад з розвиток теорії вібропресування бетонних сумішей внесли роботи А. В. Саталкіна, В. В. Михайлова, М. Г. Елбакідзе, І. М. Ахвердова.

Вібровакуумування бетонних сумішей характеризується поєднанням періодичного вакуумування з вібруванням. Вібрування здійснюється для укладання і ущільнення бетонної суміші, а далі вже в процесі вакуумування сформованого виробу, вібрація включається на досить короткий термін, для того щоб локалізувати тертя між частинками суміші, сприяти кращому заповненню парового простору складовими твердими її компонентами. Величина вакуумного розрідження складає 75...80 % від абсолютного. У результаті утворюється градієнт тиску, під дією якого надмірна вода, повітря і пароповітряна суміш направляються із зон з атмосферним тиском до вакуум — джерела і видаляються із бетону.

У нашій країні вібровакуумування досліджували багато вчених. Особливо слід відмітити роботи в цьому напрямі, які широко проводились в Дніпропетровському будівельному інституті [3]. В результаті була розроблена технологія виготовлення дорожніх і тротуарних плит. За цією технологією обробку вібровакуумуванням проводять протягом 3-х хвилин.

Представляє також інтерес вібровакуумна технологія виробництва монолітних бетонних підлог і підготовок. Обробка віброрейкою і вакуумуванням бетонної суміші дає можливість на третю добу виконувати подальші технологічні операції. УкрНІТ видав інструкцію з технології і устаткування для ущільнення монолітних підлог вібровакуумуванням.

Віброударний режим коливань є різновидом багаточастотного вібрування. Він має ряд переваг, які забезпечують його широке розповсюдження. В цьому способі за допомогою вібрації досягається мінімально необхідне розрихлення бетонної суміші, а низькочастотні удари великої амплітуди забезпечують ефективне ущільнення бетонної суміші. Додатковими параметрами ущільнення при віброударному режимі є періодичність сили удару. Все це дозволяє використовувати віброударний спосіб для ущільнення бетонних сумішей підвищеної жорсткості з одночасним поліпшенням якості виробу. З застосуванням цього способу можливо формувати вироби складної конфігурації з



пройомами, електроканалами, конусами, різними вставками і іншими елементами.

При віброштампуванні передача віброімпульсів і тиску на бетонну суміш проводиться з відкритої верхньої сторони виробу. Найбільш розповсюдженим видом ущільнення цим способом є стаціонарне віброштампування. Ефективність віброштампування оцінюється трьома показниками: протидійною силою джерела вібрації  $Q$ ; величиною тиску на суміш  $P$ ; а також їх відношення  $Q/P$ . З практики відомо, що оптимальне значення величини  $Q/P$  знаходиться в межах 2–2,5. Абсолютна величина тиску при цьому складає 0,008–0,012 МПа. Найбільш ефективним для віброштампування є суміші підвищеної жорсткості (150–200 с). Для них величину питомого тиску підвищують до 0,015–0,020 МПа, а відношення  $Q/P$  доводять до 2,5–3. Віброштампування застосовується при виготовленні виробів з фігурною поверхнею за допомогою рельєфних матриць. Цим способом вигідно також формувати складні за конфігурацією елементи з жорстких бетонних сумішей (сходові проступні, ребристі плити, струнобетонні шпали). При цьому відпадає необхідність виготовляти складну і дорогу опалубку.

При виготовленні великих тонкостінних виробів застосовують вібронасадки і віброштампи. Особливістю ковзного віброштампування в порівнянні із стаціонарним є можливість бокового розширення бетонної суміші. У зв'язку з цим ефективність ущільнення тут підвищується лише із збільшенням питомого тиску до деякої межі, що залежить від складу суміші і форми виробу.

Досить ефективною є вібропрокатна технологія формування залізобетонних виробів. Суть ущільнення полягає в тому, що робочий орган формувальної машини безперервно переміщується по відношенню до виробу і в кожен момент обробляється частина маси. Найбільш відомі – силовий вібропрокат, прокатні стани інженера Н. Я. Козлова, В. Н. Рябченко і Л. А. Непом'яшого. Цей спосіб являє собою формування з багатоступеневим ущільненням суміші вібруванням зверху в поєднанні з інтенсивним тиском на бетон послідовно розташованих вібровалків прокатного стану. Параметри вібрації і тиску змінюються від першого валка до наступних у відповідності із зміною реологічних і пружно-пластичних властивостей бетонної суміші по мірі її ущільнення. З даних [4] коефіцієнт ущільнення при цьому отримують до 0,99. Метод силового прокату застосовується при виготовленні виробів від яких крім високої міцності потрібна значна щільність структури, підвищена морозостійкість, зносостійкість. Це застосовується при виготовленні дорожніх плит, бортових дорожніх каменів, облицювальних плит. Для цього методу ефективно застосовувати бетонні суміші підвищеної жорсткості, в тому числі і дрібнозернисті. Досить вда-

лим є вібропресувальні агрегати, що працюють в спеціальних шумоізолюючих камерах, чим забезпечують допустимі рівні звукового шуму на робочих місцях [5].

До найважливіших переваг вібропрокатної технології слід віднести її універсальність, безперервність, гнучкість, забезпечення теплової обробки виробу по швидкісному режиму.

В стадії експериментального освоєння знаходиться вібронагнітальний спосіб бетонування будівельних конструкцій [6]. Суть способу полягає в роздільному укладанні складових бетонної суміші: спочатку в опалубку засипають крупний заповнювач, а потім в його міжзерновому просторі під тиском накопичується цементно-піщаний розчин, що рухається вихідним потоком. Важливою особливістю способу є те, що процес нагнітання супроводжується інтенсивною вібраційною дією одночасно на крупний заповнювач, цементно-піщаний розчин, що нагнітається, і утворену при цьому бетонну суміш. Вібронагнітальний спосіб дозволяє створити передумови для комплексної механізації основних трудомістких операцій і цим значно понизити трудовитрати на бетонних роботах. Встановлено, що бетони, виготовлені з застосуванням цього способу, мають високі міцнісні характеристики і практично водонепроникні. Теоретичні основи вібронагнітального роздільного методу бетонування розроблені під керівництвом П. В. Проценка.

Цікавим є також імпульсивний метод ущільнення бетонних сумішей, що полягає в передачі рівномірно по всьому перетину виробу імпульсів у вигляді короткочасно прикладеного тиску. Імпульси створюються пульсаторами, що примикають до бетону на границі розриву з формою, які кожен раз зміщуються на деяку величину. Частота імпульсів 10–30 Гц. Імпульси діють на бетонну суміш, без залучення в коливальний процес форми. Імпульси діють по черзі зі зсувом по фазі на 180°. Це викликає в суміші полічастотні коливання з наявністю декількох гармонік, створює умови для швидкого тиксотропного розрихлення і отримання високої щільності виробу. Він забезпечує зниження рівня шуму і шкідливої дії коливань робочих місць в порівнянні із звичайною вібрацією. Імпульсне формування довгих виробів з подачею імпульсів знизу розробив А. А. Афанасьєв [7]. За його даними, для сумішей з осіданням конуса 0...4 см оптимальною є частота 15–20 Гц. Це забезпечує рівномірне ущільнення виробів висотою до 2 м за 1,5...2,5 хвилини обробки. Спосіб актуальний для формування балок таврового перерізу значної висоти поперечного перерізу.

Із закордонних вібраційних способів формування залізобетонних виробів заслуговує уваги «Шок-бетон», безопалубне і екструзивне формування.

Метод «Шок-бетон» використовується для виробництва залізобетонних виробів в Голландії, США, Англії, Японії, Австрії, Франції. Його основна перевага – можливість отримання виробів з чистими лицьовими поверхнями. Суть методу полягає в тому, що форма з виробом періодично піднімається на висоту, а потім вільно падає, вдаряючись в станину. Фірма «Schkbeton» (США) виготовляє цим способом крупнорозмірні огорожувальні конструкції, до яких ставляться підвищені вимоги з якості. Для цих цілей застосовуються малорухомі суміші, ущільненні при частоті коливань 4 Гц і при амплітуді 3 мм.

Безопалубне формування збірного залізобетону набуло широкого поширення в Канаді, США, ФРН, Англії, Італії, Франції [8]. Цим методом виготовляють конструкції для малих житлових і виробничих будівель. Характерними особливостями технології безопалубного формування є: повна відмова від форм; можливість отримання на одному стенді виробів різної довжини шляхом різання затверділого виробу дисковою пилою або іншими методами; використання спеціальних формувальних агрегатів, що одночасно виконують операції укладання і ущільнення бетонної суміші під дією вібрації і статичного тиску; застосування водної пластифікації суміші на заздалегідь підігрітій поверхні стенда. Після формування вироби накривають брезентом і проводять теплову обробку шляхом подачі теплоносія в секційні реєстри стендів. Для формування застосовують спеціально сформовані агрегати різних принципів дії і конструктивних рішень. Найбільш універсальними по номенклатурі виробами, що випускаються, є агрегати фірми «Макс Рот». Вони виготовляють багатопустотні панелі перекриття довжиною до 12 м, висотою 80; 160; 220 і 300 мм, шириною 0,8; 1,2; 1,5; 1,8; 2,4; 3,0 і 3,6 м, плити суцільного перерізу; лінійні елементи таврового, двотаврового, коритоподібного та інших перерізів. Міцність виробів з бетону при цьому досягає 45,0...55,0 МПа.

Витрата цементу – 350...420 кг/м<sup>3</sup> з В/Ц = 0,36...0,4. Заповнювачі застосовуються – 2...4 фракцій з найбільшою крупністю 10...12 мм.

Екструзійне формування отримало свою назву від спеціального робочого органу формувального агрегату, який скомпонований з декількох шнеків. Всередині кожного шнеку встановлені високочастотні вібратори. Число шнеків рівне числу пустот у панелі. Агрегат не має приводу для пересування, його переміщення здійснюється за рахунок реактивних сил ущільненої бетонної суміші. Виробництво багатопустотних плит цим способом організують в прольоті 18 м і при довжині 165 м, де розміщують 6 стендів довжиною по 108 м кожен. Всі стенди обслуговуються одним агрегатом. Оборотноість стендів через 18 г, з часом тверднення виробів 8..10 г. Швидкість формування виробів – 0,8...1,2 м/хв.

З короткого аналізу вібраційних способів формування виробів можна зробити висновок про те, що ці способи ущільнення мають суттєві переваги: це і простота реалізації, і універсальність по номенклатурі виробів, що виробляються. Вони також достатньо ефективні в комбінації з іншими методами механічної дії на бетонну суміш. Разом з тим вібраційні способи ущільнення мають низку недоліків. До них слід віднести: недовговічність вібраційного устаткування, шкідлива дія на персонал шуму і вібрації, невисокі міцнісні характеристики бетону, що отримується. У зв'язку з цим все більш широкого розповсюдження набувають нові силові методи формування, що дозволяють частково зупинити недоліки вібраційних способів ущільнення, характеристика яких наводиться в наступних параграфах цього розділу.

## **1.2. Технологічні особливості безвібраційних способів ущільнення бетонних сумішей**

Досить поширеним є відцентровий спосіб формування залізобетонних виробів особливо при виготовленні безнапірних труб. Протягом багатьох десятиліть такі вчені як В. В. Михайлов, Ю. Я. Штаерман, Е. Є. Міхельсон, Б. Г. Скрамтаєв, А. М. Попов, І. Н. Ахвердов проводили наукові експерименти і створювали теорію центрифугованого бетону.

Сутність відцентрового формування полягає в тому, що при обертанні форми-ротора з рівномірно розподіленим шаром бетонної суміші виникає відцентровий тиск, під дією якого проходить сепарація частин твердої фази за величиною та їх зближення, що супроводжується витисканням води із завислими в ній дисоційованими іонами і високодисперсними фракціями цементу [9]. Для усунення структурної та текстурної неоднорідності, що знижує міцність бетону і тієї, що є результатом витіснення рідкої фази по радіальних фільтраційних каналах, запропоновано спосіб пошарового ущільнення бетонної суміші [10]. Цим способом створюється однорідна текстура бетону по всьому перерізу стінки виробу і перекриваються фільтраційні канали в цементному камені. З метою підвищення фізико-механічних властивостей центрифугованого бетону запропоновано повторне центрифугування після розпушення ущільненої суміші і таке ж за результатом циклічне центрифугування.

Основними параметрами відцентрового формування є тиск та час центрифугування, що отримали найбільш повне визначення з залежностей наведених в роботі [11].

Способом відцентрового формування виготовляють в основному вироби кільцевого перерізу – це напірні та безнапірні труби,

опори ЛЕП, кільця оглядових колодязів, обсадні труби, палі та палі оболонки. Для виробництва безнапірних і низьконапірних труб великих діаметрів застосовується спосіб відцентрового прокату [12]. Для цього способу розроблено ефективне технологічне оснащення, встановлено режими розподілення і ущільнення бетонної суміші, що забезпечує при витратах цементу 450–500 кг/м<sup>3</sup> міцність 70–80 МПа. В наш час спосіб центрифугування є найбільш завершеним і широко застосовуваним способом силового формування.

Розроблено також технологію комплексного вакуумування для виготовлення бетонних і залізобетонних конструкцій [13]. Вона являє собою поєднання «імпульсивного» формування з методом комплексної активації бетонної суміші. Суть технології полягає у використанні вакуумного ефекту на етапах приготування, укладки та ущільнення бетону. Одночасно з вакуумуванням проводиться кондуктивний розігрів та інтенсивне перемішування суміші. Вкладання бетону в форму і його ущільнення виконується за рахунок різниці тисків, створених в змішувачі над сумішшю, і вакуумного в формі під сумішшю, а також за рахунок власної ваги. Теоретичні і експериментальні дослідження знайшли своє втілення у створенні дослідно-промислової установки, яка підтвердила перспективність методу комплексного вакуумування при виробництві виробів крупнопанельного будівництва. Так, відформовані вироби із керамзитобетону мали міцність на стискання 29 МПа, а коефіцієнт ущільнення при вертикальному формуванні  $K_u=0,98$ . Міцність свіжосформованого керамзитобетону вказаним способом складала 0,18–0,19 МПа, що дозволяє виконати негайну розпалубку бортів і транспортувати виріб на теплову обробку, тривалість якої скорочена до 6–7 год.

Укладання і ущільнення бетонних сумішей за допомогою набризкування, є одним із методів силового формування. Відомо два види набризкового формування суміші – пневматичний та механічний. Суть їх однакова, різниця полягає лише в робочому органі, що виконує вкладання та ущільнення бетонної суміші. В першому випадку це виконується за допомогою стисненого повітря, що виносить суміш своїм потоком; в другому – укладання та ущільнення ведуться засобами механічного набризкування, що надає суміші необхідну швидкість. Цей вид формування призначений перш за все для бетонування спеціальних споруд. Механічне набризкування розроблено в Харкові, суть його полягає в тому, що бетонна суміш, яка подається в зону дії роторів, отримує певний запас кінематичної енергії, що витрачається на укладання та ущільнення суміші і приводить до отримання бетону, близького за своїми властивостями до трамбованого. Макроструктура бетону при цьому формує дискретний потік частин суміші, розганяю-

чи їх за допомогою роторів, основним формуючим вузлом якого є метална головка. Технологічними параметрами роторної головки є швидкість руху матеріалу (35–50м/с), що викидає на робочий пристрій роторів, і кут розсіювання бетонної суміші. В залежності від потужності, продуктивність металних машин змінюється від 30 м<sup>3</sup>/год до 100 м<sup>3</sup>/год. В результаті досліджень [14] виявлено, що викинута із роторів бетонна суміш ділиться на окремі гранули розчинної суміші і зерна крупного заповнювача, утворюючи дискретний потік, як і при пневматичному набризкуванні. Звідси формування шару бетону при механічному набризкуванні представляється у вигляді простих процесів, що протікають одночасно. Перший процес полягає в утворенні на поверхні, що бетонується пластичного шару розчину, другий – втоплення у розчинний шар зерен крупного заповнювача. Обидва процеси перекривають один одного, зливаються в єдиний, утворюючи шар бетону, відношення компонентів якого залежить від складу початкового розчину. Бетонні суміші для механічного набризкування застосовуються жорсткістю 30—60 с. Дослідно-промислова перевірка цього способу здійснена при виготовленні залізобетонних паль на заводах ЗБК м. Харків. Палі дослідної партії відповідали вимогам ДСТУ.

Для силового формування виробів із жорстких бетонних сумішей запропоновано метод роликового пресування [15]. Основу конструктивної схеми формувального обладнання в цьому методі складає стабілізуюча балка, на якій закріплено систему роликів. Балка робить поворотно-поступальний рух, що реалізується шатунно-кривошипним механізмом. Подача бетонної суміші під ролики здійснюється через щілини бункера, розташованого між роликами.

Роликове пресування вперше впроваджене на дослідно-виробничих установках при виготовленні бортового каменя і тротуарних плит.

Для цього методу пресування застосовують дрібнозернисті суміші без крупного заповнювача, або з ним в кількості не більше 20 % від об'єму бетону. Піски застосовують різної крупності, в тому числі і дрібні. Із застосуванням роликового пресування досягнуто високі показники міцності бетону на стискання. Так на цементі з  $R_c=40,0$  МПа і при повному заповненні міжзернових порожнин цементним тістом  $R_b^{28}=70$  МПа, міцність свіжосформованого бетону близько 0,7 – 0,8 МПа. Використання цементів вищих марок і суперпластифікаторів дозволяє збільшити міцність в 28 добовому віці до 90,0 МПа. Морозостійкість бетону досягає 900 циклів.

Проте, можливість роликового пресування обмежена товщиною ущільнювального шару (до 25 см при діаметрі ролика 35см). При цьому виникає неоднорідність міцності по товщині виробу, що досягає

15 %. Найбільшу міцність і щільність бетону отримано в середній частині виробу [16].

В результаті досліджень по роликовому пресуванню визначені раціональні склади жорстких і наджорстких сумішей; режим прокату; фізико-механічні властивості бетону; необхідна потужність і конструктивні особливості прокатного устаткування. В наш час розроблено рекомендації з технології роликового формування і устаткування для технологічних ліній. Застосування цієї технології рекомендується в першу чергу в тих районах, де відсутні крупні заповнювачі.

Доведено можливість роликового пресування силікатних бетонів, які не поступаються по міцності звичайному бетону. Ця технологія ефективна при виготовленні аеродромних і дорожніх плит, бортового каменя, поперечок і інших виробів.

Технологію виготовлення залізобетонних виробів методом «прес-осмос-бетон» вперше розроблено в ЦНДІЕП житла (Росія).

Суть технології полягає в безвібраційному вкладанні в фільтруючі форми рухливих і литих бетонних сумішей і подальшій обробці їх на початку постійним, а потім змінним струмом. Одночасно, здійснюється механічна дія на суміш тиском 0,05 – 0,1 МПа [17]. Бетонну суміш укладають в електроізольовану форму, піддон якої служить анодом. На суміш встановлюють верхній замикаючий елемент катод, який служить і для передачі тиску. Після цього форма подається на стэнд формування, де проводиться початкове ущільнення двократним прикладанням механічного навантаження  $P=0,1$  МПа, з метою видалення повітря із суміші. Потім бетонна суміш обробляється протягом 15...20 хвилин постійним струмом, в залежності від режиму, виконується статистичний тиск або багаторазовий /15 циклів/ циклічний тиск  $P=0,1$  МПа. Після обробки постійним струмом виріб протягом 0,9...1,1 год, піддають тепловій обробці змінним струмом, який дозволяє розігріти суміш за 15...20 хв. до температури ~ 80...90°C. В процесі розігріву одночасно на бетонну суміш діє 20 – 30 кратне циклічне навантаження, а ізотермічний підігрів проводять при постійному статичному тиску  $P=0,1$  МПа.

Технологія формування залізобетонних виробів методом «прес-вакуум-бетон» запропонована і розроблена ІБіА Держбуду Білорусії. На основі дослідження структурно-механічних, реологічних і фізико-технічних властивостей прес-вакуум-бетону, виконаних під керівництвом М. П. Блещика [18], в Мінську виготовлені автоматизовані технологічні лінії з виробництва панелей внутрішніх стін (лінія ЛКК–1), тротуарних плит і бордюрів (лінія ЛКП–1)[19, 20].

Лінія ЛКК–1, призначена для випуску внутрішніх стінових панелей розміром 575×275×140мм, які формуються нагнітанням бетон-

ної суміші рухливістю 8...12см у вертикальні замкнуті фільтруючі порожнини з подальшим допресуванням. При нагнітанні та наступній теплової обробці суміш розігрівається до температури 60...65° С. Дослідно-промислове освоєння ЛКК–1 проводилось при випуску панелей житлових будинків серії М-464-9, для виробництва яких розроблено технологічні режими, викладені в методиці [21].

Лінія ЛКП–1 запропонована для випуску тротуарних плит з граничними розмірами 1000×1000×160 мм і бордюрів довжиною до 1000 мм і висотою до 160 мм. Формування здійснюється статистичним пресуванням і вакуумуванням бетонної суміші в прес-формах з фільтруючим дном. Для заповнення прес-форм застосовано об'ємне дозування бетонної суміші, час дозування складає близько 14...20 с. Пресування проводиться на чотирьохмістній карусельній установці, де операції дозування і укладання, пресування і вакуумування, знімання свіжосформованих виробів, очищення і змашування прес-вакуум форми – здійснюються одночасно. Основною є операція пресування і вакуумування, яка визначає ритм лінії.

Так, при виготовленні тротуарних плит товщиною 70 мм з бетону В 45 з крупним заповнювачем до 20 мм і витратою цементу 380 кг/м<sup>3</sup> пресування і вакуумування триває протягом 60 с. Пресування застосовується статичне дво-етапне: у перші 10 с воно складає 0,5 МПа, в подальші 50 с. – 1 МПа. Ступінь розрідження у вакуумпорожнині прес-форми не менша 0,07 МПа. Зняття свіжосформованих виробів з прес-форми і укладання на піддони здійснюється засобом вакуум-траверси. Пропарювання виробів проводилося в камерах безперервної дії, де підйом температури до  $t_{\text{ізот}} = 70^{\circ}\text{C}$  триває протягом 4...5 год. в середовищі з відносною вологістю не вище 50 %. Після теплової обробки вироби зміщуються з піддонів і контейнеризуються. Середня міцність бетону для тротуарних плит складає 48,3 МПа, морозостійкість не менша  $M_{p3}$  200 циклів.

Нарівні з беззаперечними перевагами технологія «прес-вакуум-бетон» має і деякі труднощі, пов'язані з вакуумуванням, перш за все зі створенням ефективних фільтруючих матеріалів.

Метод «прес-вакуум-бетон» досить повно і різнопланово досліджений теоретично. Особливо тут слід відмітити роботи [18, 22] з дослідження структурно-механічних властивостей бетонної суміші і прес-вакуум-бетону, а також роботи [23, 24] з технологічної надійності укладання і ущільнення бетонних сумішей способом гідродинамічного пресування. Особливий інтерес викликають дослідження і методика на їх основі з питань проектування складу бетонної суміші, міцності, рухливості і жорсткості прес-вакуум-бетону, а також з опору



стисканню і деформуванню свіжоущільненого бетону, які використані нами в подальших дослідженнях методу пульсуючого пресування [25,26].

В зв'язку з цим на деяких питаннях зупинимося більш конкретно. В працях [18, 22] показано, що ефективність пресування бетонних сумішей у відкритій системі залежить від водоцементного відношення без урахування води поглинутої заповнювачем  $(B - B_{\text{погл}})/Ц$ , загального об'ємного складу цементного тіста  $m_{т.в.}$  і об'ємного складу цементного тіста, що йде на розпушення зерен заповнювача  $m_{т.л.в.}$ . Вище вказані характеристики використані для інтерпретації експериментальних даних і отримання математичних моделей міцності і деформативності прес-вакуум-бетону, а сумісно зі структурними характеристиками заповнювачів:  $n$  – співвідношення мас заповнювачів;  $U_3$  – пустотність суміші заповнювачів – використовуються для проектування складу бетонної суміші прес-вакуум-бетону.

Міцність при стисканні пресованого бетону пропонується визначити з залежності (1.1).

$$R_{п} = k_{1.п.в} k_{2.п.в} k_{3.п.в} R_0 \quad (1.1)$$

де  $k_{1.п.в}$ ,  $k_{2.п.в}$ ,  $k_{3.п.в}$  – коефіцієнти що визначаються з емпіричних залежностей,  $R_0$  – міцність при стисканні стандартно ущільненого бетону, що визначається з відомих формул, або з формули Блещика–Скочеляса (1.2)

$$R_0 = \frac{(0,16R_{ц} + 5)m_{т.в.}}{\left(0,09K_3 + 0,5m_{т.в.}\right) \frac{B - B_{\text{погл}}}{Ц}} \quad (1.2)$$

де  $K_3=1$  для гранітного і  $K_3=1,2$  для гравійного щебеню.

Для міцності прес-вакуум-бетону при осьовому розтязі наводиться така залежність (1.3)

$$R_{р.п.в} = \frac{1}{1,25 + 37 \left(0,75 - \frac{B - B_{\text{погл}}}{Ц}\right)} R_{п.в} \quad (1.3)$$

Міцність на розтяг при згині (1.4)

$$R_{р.н.п.в} \approx \frac{1}{9} R_{п.в}; \quad (1.4)$$

Модуль пружності пресованого бетону визначається з формули (1.5).

$$E_{\Pi} = E_{\Pi.B} = \left[ 0,55 + 3,5(0,55 - m_{T.B})^2 \right] R_{\Pi.B} 10^{-3}; \quad (1.5)$$

Граничні відносні деформації стискання (1.6).

$$\varepsilon_{гр.п} = \varepsilon_{гр.п.в} = (1,1 + 1,9m_{T.1.B}) 10^{-3}. \quad (1.6)$$

Для пресування велике значення має стискуваність бетонної суміші і необхідна величина пресуючого тиску, оскільки деякі суміші мають великі значення коефіцієнта внутрішнього тертя і тому статичним пресуванням не можуть бути ущільнені. В роботі [18] виведені залежності для визначення стискування бетонної суміші з умови, що цементне тісто отримало граничні деформації стиску  $e_{T.2}$ .

$$e_{см.2} = \frac{m_{к.з} + e_{T.2} m_{T.1.B}}{1 - m_{п.з}}; \quad (1.7)$$

$$e_{T.2} = \frac{m_{к.т} + m_{в.т} - 0,259}{0,741}, \quad (1.8)$$

де  $m_{к.т}$  і  $m_{в.т}$  – об'ємні концентрації капілярної рідини і повітря в цементному тісті;  $m_{к.з}$  – об'ємна концентрація капілярної води іммобілізованої заповнювачем.

Величина пресуючого тиску, що відповідає граничному стисненню всього цементного тіста в бетонній суміші, визначається з формули (1.9)

$$P_{T.см} = \frac{K_p A_{стр.т}}{1 - 1,07A_{стр.т}}; \quad (1.9)$$

де  $K_p=0,1$ МПа;  $A_{стр.т}$  – структурна характеристика цементного тіста, яка визначається за методикою, викладеною в роботі [18].

Є також досить складна залежність для визначення швидкості фільтрації води  $U$ , що залежить від величини пресуючого тиску, структурних характеристик бетонної суміші, часу пресування і товщини виробу. Це дає можливість теоретично підрахувати кількість віджатої води.

Розроблені основи теорії пресування суміші з успіхом можна застосовувати для вдосконалення процесів силового формування, зокрема для пульсуючого пресування.

Метод триразового пресування залізобетонних виробів розроблений К. Е. Горяйновим, А. І. Счастлиним і Г. В. Свистуном застосовується для ущільнення бетонних сумішей заздалегідь відформованих вібрацією. Проте сам метод триразового пресування в своїй основі є силовим і тому зупинимося на ньому більш детально.

Суть методу полягає в тому, що до попередньо відформованого вібрацією виробу прикладають пресуючий тиск 4...50 МПа, який потім плавно знижують до 1,6...2,5 МПа, і знову підвищують його до первинної величини, при цьому аналогічний цикл повторюють 2...3 рази [27]. В кожному конкретному випадку максимальну величину пресуючого тиску приймають 0,2...0,5 міцності заповнювача на стискання. Лабораторні дослідження методу проводилися на циліндрових зразках  $\varnothing = 7,14$  см і  $h = 13,5-14,5$  см при витратах цементу до 308 кг/м<sup>3</sup>. Пресування здійснювали після вібрації в триразовому режимі з максимальним тиском 2,5; 5,0; 10; 15; 20 і 40 МПа. Встановлено, що вже при питомому тиску 2,5 МПа шлакобетон набуває значної міцності, а при 15 МПа – досягає найбільшої величини. Подальше збільшення тиску до 20; 40 МПа суттєвого приросту міцності не дає. Порівняльні дослідження одноразового і триразового пресування виконані на суміші з В/Ц = 0,5 і витратою цементу 308 кг/м<sup>3</sup> при питомому максимальному тиску 5 МПа, показали відповідно – 62,1 і 72,4 МПа; а при тиску 20 МПа – 88,4 і 95,6 МПа міцності на стискання. При випробуванні шлакобетонних зразків-циліндрів на розтяг розколюванням міцність складала 12,2 МПа.

У роботі [27] автори цього методу дають три критерії оцінки ефективності пресування бетонних сумішей:

- відношення межі міцності при стисканні в 28-добовому віці на 1 кг витрати цементу –  $R_b/\varrho$  ;
- відношення міцності бетону до активності цементу –  $R_b^{28}/R_{ц}$ ;
- коефіцієнт конструктивної якості –  $A=R_b/\rho^2_0$ .

Для шлакобетону відпресованого за цією технологією вказані критерії рівні:

$$R_b/\varrho=1,99...2,83; R_b^{28}/R_{ц}=1,6...2,8; A=140...200 (1.10)$$

Для шлакобетону такого ж складу відформованого вібруванням з пригрузом протягом 1 хвилини критерії мали такі показники:

$$R_b/W=0,59; R_b^{28}/R_{ц}=0,4; R_b/\rho_0^2=41,4 \quad (1.11)$$

Як видно, характеристики міцності шлакобетону ущільненого цим методом і показники критеріїв ефективності пресування отримані досить високі.

Не дивлячись на досить високі показники міцнісних характеристик виробів, виготовлених за цією технологією, вона має ряд недоліків. По-перше – присутність вібрації, що викликає шкідливі умови праці. По-друге – розділення повного циклу формування як за часом, так і за місцем розташування в просторі, тобто на безпосереднє формування (або формопридання і подальше ущільнення пресуванням, що веде за собою значне ускладнення технологічної лінії і збільшення повного циклу формування. По-третє – застосування великих питомих тисків вимагає унікального устаткування, особливо для виробів з великою площею, які в вітчизняній практиці не застосовуються через надмірно високу ціну. По-четверте, сам процес триразового пресування не зовсім вдосконалений через тривалість в часі (біля 4,5 хвилини) і не достатньо ефективний в порівнянні зі статичним одноразовим пресуванням.

Викликають інтерес роботи, виконані М. Г. Елбакідзе, з пресування цементного тіста, розчину і бетону [28]. Ще в 1958 році М. Г. Елбакідзе застосував розбірні циліндричні прес-форми з двостороннім пресуванням і встановив, що в щілини між пуансонами і стінками віджимається вода, а зерна цементу не віджимаються. Суміш, таким чином, ущільнюється за рахунок віджиму води не збіднюючися. Висловлені припущення підтвердилися і при дослідженні нами методу пульсуючого пресування. У роботі [28] зроблено важливі висновки про те, що оптимальне В/Ц, цементного тіста для пресування відповідає його нормальній густині, тобто коли всі порожнини заповнені водою і тісто має найменший вихід. При менших початкових значеннях В/Ц тісто містить повітря і кінцева міцність його істотно поступається міцності зразків з початковим В/Ц, що відповідає нормальній густині тіста. Збільшення початкового В/Ц за границю нормальної густини також приводить до зниження міцності, хоча зайва вода віджимається в процесі пресування. Надмірне віджимання води із цементного тіста при великому тиску /100 МПа/ приводить до падіння міцності, оскільки кінцеве В/Ц в цьому випадку складало 0,07...0,09, що не достатньо для нормального тверднення цементного тіста. Оптимальним виявився тиск 50 МПа (міцність зразків в 28 добовому віці досягала 180 МПа), при яких В/Ц<sub>зал</sub> ~ 0,12.

В роботі [28] М. Г. Елбакідзе робить висновок про те, що міцність вібропресованного бетону збільшується зі збільшенням пресуючого тиску лише до деякої межі, а криві міцності мають явно виражений максимум, який не збігається з будь-яким пресуючим тиском при випробуванні зразків в різному віці. Цей явно виражений максимум міцності в 28 добовому віці вібропресованного бетону відповідає тиску 5 МПа, при якому  $V/C_{\text{зал.}} = 0,315$ . Підвищення пресуючого тиску до 10 МПа не приводить до підвищення міцності бетону, а дещо знижує її і  $V/C_{\text{зал.}} = 0,26$ . Подальше збільшення пресуючого тиску дає пониження міцності у віці 28 діб, а  $V/C_{\text{зал.}}$  знижується до 0,22. Відмічене положення підтверджене нами і при дослідженні процесу пульсуючого пресування бетонних сумішей.

Вищенаведене дає підставу говорити про те, що великий питомий тиск при пресуванні бетонних сумішей не тільки економічно не вигідний, але і не доцільний, оскільки негативно впливає на показники міцності бетону в зрілому віці. Причиною цього явища М. Г. Елбакідзе вважає розколювання зерен заповнювача, яке відбувається при тиску 10 МПа і вище. В ранньому віці (1 доба) міцність цементного каменю збігається з міцністю розколотого заповнювача, тому зразки бетону, відпресовані під тиском 50 МПа, показують більшу міцність, ніж зразки, виготовлені при більш низькому тиску. Аналогічні дані наводяться в роботі [29] з міцності на розтягування вібропресованого бетону, де максимальний тиск також складає 5 МПа, при якому склад розколотих зерен заповнювача становить не більше 7 %. У цій же роботі мовиться про те, що руйнування зразків вібропресованого бетону проходить по заповнювачах, що повністю узгоджується з нашими даними при руйнуванні зразків, виготовлених методом пульсуючого пресування. Дослідами І. Р. Енукашвілі встановлено, що міцність свіжоущільненого вібропресованого бетону в значній мірі залежить від величини пресуючого тиску і від витрат цементу. Істотний вплив в цьому надає значення  $V/C_{\text{зал.}}$ , а також деякі технологічні прийоми. Так, вібропресоване цементне тісто з питомим тиском 50 МПа через 20 хвилин з моменту замішування показало міцність на стискання 5,2 МПа при кількості хімічно зв'язаної води за масою 2,68 %. Через 40 хвилин ці показники були відповідно – 7,1 МПа і 2,76 %, через 60 хвилин – 9,15 МПа і 3,29 %. Для вібраного цементного тіста кількість хімічно зв'язаної води була через 20 хв. – 2,62 %; через 40 хв. – 2,63 %; через 60 хв. – 2,65 %. Мелений андезит при тому ж тиску показав міцність 2,25 МПа. Досліди підтвердили висловлене припущення, що в умовах великого тиску при мінімальній необхідності кількості води процеси гідролізу і гідратації починають проявлятися через 20–30 хв., проте природа «свіжосформованої» міцності визнача-

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-303-4>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-303-4>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-303-4>

*Наукове видання*

**Загребя Василь Петрович  
Дудар Ігор Никифорович**

**ФОРМУВАННЯ БЕТОННИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
ВИРОБІВ МЕТОДОМ ПУЛЬСУЮЧОГО ПРЕСУВАННЯ  
БЕТОННИХ СУМІШЕЙ**

Монографія

Оригінал-макет підготував В. П. Загребя

Редактор С. А. Малішевська

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 09.04.2009 р.  
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний Ум. др. арк. 6,01  
Наклад 100 прим. Зам № 2009-085

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-81-59