

Аналіз ефективності технології роликового формування виробів з дрібнозернистих бетонів

О. В. Лазарєва, С. М. Белінська, П. Г. Лавриньов, Н. О. Руденко

Викладена ефективність використання технології роликового формування примусового повороту робочого органу (ролика чи сектора). Представлені результати розробки удосконаленої технології роликового формування. Особливостями цієї технології є відсутність прослизання і заклинювання робочого органу відносно поверхні бетонної суміші, що формується. Воно виникає за рахунок зростання інерційних сил вільно роликів, що обертаються.

Вказані переваги даної технології перед вібраційною, а саме:

– можливість суміщення в одному агрегаті процесів розкладання, ущільнення та загладжування бетонної суміші, що створює, в першу чергу, можливість організації високо механізованих та автоматизованих технологічних ліній, і, тим самим, підвищити їх продуктивність:

– можливість ефективного ущільнення особливо жорстких дрібнозернистих бетонних сумішей, що, в свою чергу, створює передумови для отримання довговічних виробів, скорочення циклів термообробки, а також зменшення металомісткості виробництва;

– можливість використання дрібнозернистих сумішей з нестачею цементного тіста, що не перевищують норми для бетону на крупному заповнювачі;

– можливість ефективного покращення санітарно-гігієнічних умов для обслуговуючого персоналу за рахунок відсутності вібрації і суттєвого зниження шуму;

– відмова від дорого вартісного і у ряді випадків дефіцитного крупного заповнювача, що дозволяє отримати значну економію.

Зазначені залежності характеризують і показують збільшення пресуючого тиску робочого органу на поверхню виробу, що формується. В результаті цього коефіцієнт ущільнення суміші збільшується з 0,983 (при вільному оберті ролику) до 0,998 (при примусовому його оберті)

Ключові слова: дрібнозерниста суміш стабілізуюча балка, фібробетон, сталелібробетон, сталеві волокна, орієнтація фібри, примусовий оберт сектора

1. Вступ

Необхідність підвищення ефективності капітального будівництва нерозривно пов'язана з удосконаленням заводської технології виробництва залізобетону. При цьому велике значення має розробка нових та вдосконалення існуючих методів формування виробів, які суттєво визначають їх якість і собівартість. До ряду перспективних і актуальних методів формування слід віднести безвібраційну технологію роликового формування, яка в порівнянні з широко розповсюдженою вібраційною дозволяє:

– ущільнювати особливо жорсткі бетонні, в тому числі дрібнозернисті суміші, що дозволяє економити цемент та дефіцитний в деяких районах заповнювач, підвищити довготривалість і міцність виробів;

– покращити умови праці, підвищити її продуктивність за рахунок більш високого рівня механізації процесів (і можливості автоматизації), підвищити надійність устаткування за рахунок відсутності вібрації та зниження рівню шуму;

– скоротити енергозатрати на теплову обробку і металомісткість парку форм.

Технологія безвібраційного роликового формування виробів з дрібнозернистих бетонів відкриває нові перспективні можливості підвищення якості виробів, що формуються, за рахунок створення примусового (без прослизання) повороту робочого органу (сектора чи ролику). Крім того, актуальним є також можливість розширення області застосування її шляхом розробки технології формування сталевібробетону, що є ефективним та перспективним з урахуванням високих характеристик міцності дрібнозернистого бетону.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Технологія безвібраційного роликового формування виробів з дрібнозернистих бетонів всебічно вивчена і описана в [1]. Разом з тим, в цьому джерелі недостатньо висвітлено та обґрунтовано можливості ефективного ущільнення особливо жорстких дрібнозернистих бетонних сумішей. Внаслідок цього можуть створитися передумови для отримання довговічних виробів, скорочення циклів термообробки, а також зменшення металомісткості виробництва [2].

Справедливою є думка [3], що технологія безвібраційного роликового формування має перспективи застосування у виробництві, саме тоді визначається навантаження в елементах роликових формувальних установок, однак при цьому не враховується, що дрібнозернистий бетон і сталевібробетон роликового формування володіють підвищеними фізико-механічними якостями.

Використання вібраційних технологій обмежуються показниками жорсткості суміші, що пов'язано з витратами цементу. При цьому вважається, що застосування безвібраційної роликової технології дозволяє суттєво підвищити жорсткість бетонної суміші, покращити умови праці, створити умови для автоматизації процесу [4]. Для вирішення проблеми перспективних сучасних технологій роликового формування наголошується на необхідності відзначити технологію використання цементних композицій з високою ранньою міцністю [5]. Саме тому акцентується увага на інноваційний підхід у розробці дрібнозернистих бетонів. Основою підходу є нанотехнології, що базуються на регулюванні структури гідратних фаз і процесів гідратації для формування цементуючої матриці з покращеними властивостями [6]. Існує думка, що одним із шляхів отримання дрібнозернистого бетону є використання цементних композицій з високою ранньою міцністю. Основними напрямками для одержання таких в'язучих компонентів є забезпечення необхідного хімічного та мінералогічного складу шляхом введення в сировину спеціальних добавок [7]. Вважається, що при роликовому формуванні сталевібробетону набувають площинну спрямовану орієнтацію в бетонній матриці, яка сприяє підвищенню характеристик міцності сталевібробетону.

Найбільш суттєві результати досліджень технології роликового формування з визначення продуктивності процесу, навантажень, діючих на робочі органи і форми, міцності головного приводу устаткування представлені в роботі [8]. Результати отримані на устаткуваннях роликового формування органу (ролику) відносно поверхні бетонної суміші, що формується. Формування особливо жорстких сталевібробетонних сумішей роликовою технологією може призводити до прослизання, що і є тут основним зауваженням. Одночасно з цим, при вільному оберті ущільнюючого ролику може відбутися заклинення відносно поверхні сумішей, що формується, за рахунок зростання інерційних сил ролику, що вільно обертається. Наявність прослизання знижує силу тертя між роликом та поверхнею суміші, а отже і тиску його на суміш, що, в свою чергу, тягне за собою зниження ступеня ущільнення суміші, особливо у бортів форми. Більш того, ролик за інерцією може повертатися в протилежну сторону руху стабілізуючої балки, тобто не захоплювати суміш і не створювати опір між роликом і поверхнею, що ущільнюється.

В роботі [9] представлені результати досліджень фізико-механічних якостей бетонних і сталевібробетонних виробів (решітки перекриття підлог тваринницьких ферм, стійки для виноградних шпалер, бортовий камінь та інші), що виготовлені тією ж роликовою технологією з вільним обертом ролику. Завдяки невеликому тиску ролику на бетонну суміш, що формується, та достатньо низькому коефіцієнту ущільнення ($K_{уц}=0,89-0,92$) довготривалість виробів становила 120–150 циклів поперемінного заморожування та відтаювання. Наряду з цим, в [10] запропоновано пристрій, в якому вільний оберт роликів замінено на примусове обертання. Вважається, що досліджена технологія створення високотехнологічних бетонів швидко твердішає з багаторівневою структурою за рахунок системного поєднання нано- та ультра дисперсних мінеральних компонентів та суперпластифікуючих добавок [11]. В роботі [12] вивчено вплив лопаткового апарату гравітаційних бетонозмішувачів на якість процесу перемішування будівельних сумішей. В цьому контексті аргументовано режим руху роликової формувальної установки з кулачковим приводним механізмом для забезпечення зворотно-поступального руху формувального візка [13].

Аналіз літературних джерел з технології безвібраційного роликового формування виробів з дрібнозернистих бетонів показав, що вказаний спосіб зарекомендував себе як один з найбільш ефективних з ущільнення особливо жорстких дрібнозернистих бетонних сумішей. Конструктивне осмислення даної проблематики дозволяє зробити висновок, що результати наукових досліджень не справили помітного впливу на процес аналізу ефективності технології роликового формування виробів з дрібнозернистих бетонів.

Це пов'язано з тим, що теоретичні напрацювання потребують адаптації до тих умов, за яких технології будуть використовуватися, але умови є дуже різними і не враховувати їх специфіку неможливо.

Саме тому, вирішення проблем формування виробів з дрібнозернистих бетонів і винесло на порядок денний розроблення нової технології роликового формування виробів з дрібнозернистих бетонів з примусовим обертом робочого органу.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою роботи є розробка технології виготовлення виробів і конструкцій з дрібнозернистого бетону і сталевібробетону методом роликowego формування з примусовим поворотом робочого органу. Це дасть можливість:

- ущільнювати особливо жорсткі бетонні, в тому числі дрібнозернисті і сталевібробетонні суміші, що дозволяє економити цемент і дефіцитний в деяких районах крупний заповнювач;
- підвищити довготривалість і міцність виробів;
- покращити умови праці, підвищити її продуктивність за рахунок більш високого рівня механізації процесу, підвищення надійності устаткування за рахунок відсутності вібрації та зниження рівня шуму;
- скоротити енергозатрати на теплову обробку і металоємкість парку форм.

Для досягнення цієї мети поставлені такі завдання:

- отримати рівняння регресії, які можуть бути використані для розрахунку технологічних режимів роликowego формування дрібнозернистого бетону з примусовим обертом робочого органу з урахуванням досягнутих характеристик якості виробів, продуктивності устаткування, діючих на нього навантажень і тягових зусиль переміщення форм;
- отримати рівняння регресії технологічних режимів роликowego формування сталевібробетонних сумішей;
- досягти підвищення не менше ніж на 20 % характеристик міцності дрібнозернистого бетону і сталевібробетону роликowego формування з примусовим поворотом робочого органу в порівнянні з його вільним обертом;
- досягти зниження витрат портландцементу на 15–20 % в дрібнозернистих бетонах роликowego формування з примусовим обертом робочого органу.

4. Дослідження нової технології роликowego формування дрібнозернистих бетонних і сталевібробетонних виробів

4.1. Сутність удосконаленого методу роликowego формування з примусовим поворотом робочого органу

Сутність методу полягає в тому, що ущільнення відбувається за рахунок втискування суміші в шари, що лежать нижче, нових порцій суміші, які безперервно поступають з витратного бункера. Початок процесу формування відбувається при нерухомій формі до утворення зі сторони її незаповненої частки валику суміші. Наявність цього валику свідчить про досягнення граничного ущільнення суміші під сектором. Потім вмикається привід безперервного переміщення форми до входу її з протилежної сторони устаткування. При цьому швидкість подачі форми є технологічним фактором, що забезпечує в сукупності з іншими параметрами устаткування ступінь ущільнення бетону (рис. 1):

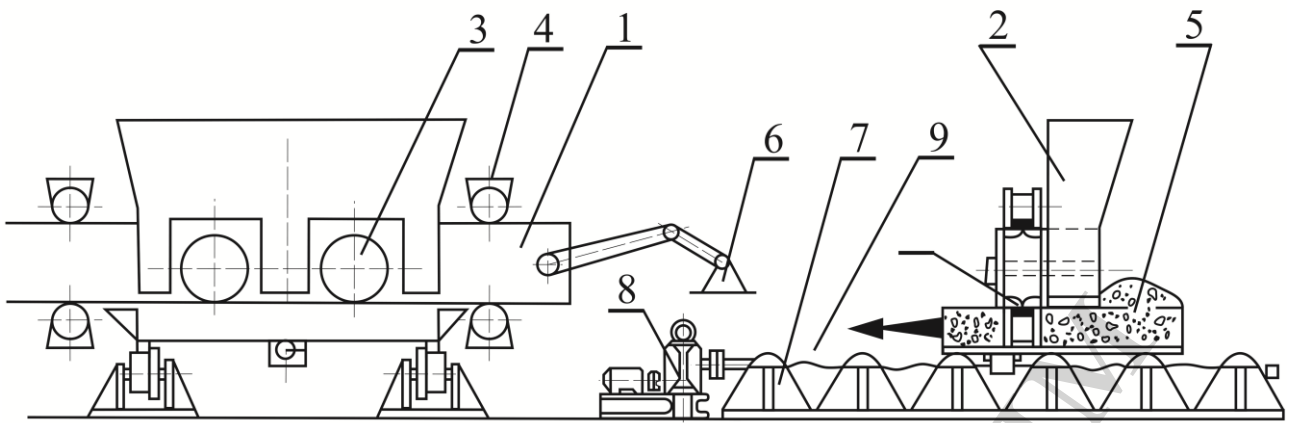


Рис. 1. Конструктивна схема пристроїв роликового формування: 1 – балка; 2 – витратний бункер; 3 – формувальні ролики; 4 – направляючі; 5 – форма; 6 – кривошипно–шатунний механізм; 7 – рольганг; 8 – привід переміщення форми; 9 – ходовий гвинт

В дослідях були прийняті: радіус сектору $R_c=210$ мм, довжина сектору $l_c=300$ мм, кількість подвійних ходів балки на хвилину $n=40+70$; ширина балки $B_b=300$ мм, товщина виробів, які формувались: $h_{вир}=50+250$ мм.

В якості в'язучого використовували портландцемент марки 400 з витратами від 330 до 650 кг/м³. При цьому був використаний наступний склад сумішей: склад з повним заповнювачем міжзернових порожнеч піску цементним тістом, суміші з розсуненням зерен піску, а також суміші з нестачею цементного тіста. В якості дисперсійно–армуючих бетон волокон застосовувалась фібра з низьковуглеродистої сталі загального призначення міцністю 600 МПа. Розміри фібри були прийняті: довжина $l=25+50$ мм, діаметр $d=0,5$ мм. Відсоток армування сталевібробетону варіювався від 0,8 до 1,6 в об'ємі.

4. 2. Дослідження та розробка технологічних режимів технології роликового формування

Формування особливо жорстких дрібнозернистих сумішей роликовою технологією, з вільним обертом ролику, яке може призводити до прослизання та заклинювання відносно поверхні суміші, є продовженням досліджень [8, 9]. Це явище спостерігається за рахунок збільшення інерційних сил роликів, що обертаються.

Наявність прослизання знижує силу тертя між роликами та по верхню суміші і призводить до зменшення товщини слою суміші, що захоплюється, а відповідно, і опору на суміш, що, в свою чергу, тягне за собою зниження ступеня ущільнення суміші, особливо у бортів форми. Більш того, ролик по інерції може взагалі повертатися в протилежний бік руху стабілізуючої балки, тобто не захоплювати суміш і не створювати опору тиску між роликом та ущільнювальною поверхнею суміші.

Було встановлено, що наявність примусового оберту сектора в порівнянні з вільним обертом роликів наближає ступінь ущільнення бетону до одиниці при ідентичних умовах формування (рис. 2).

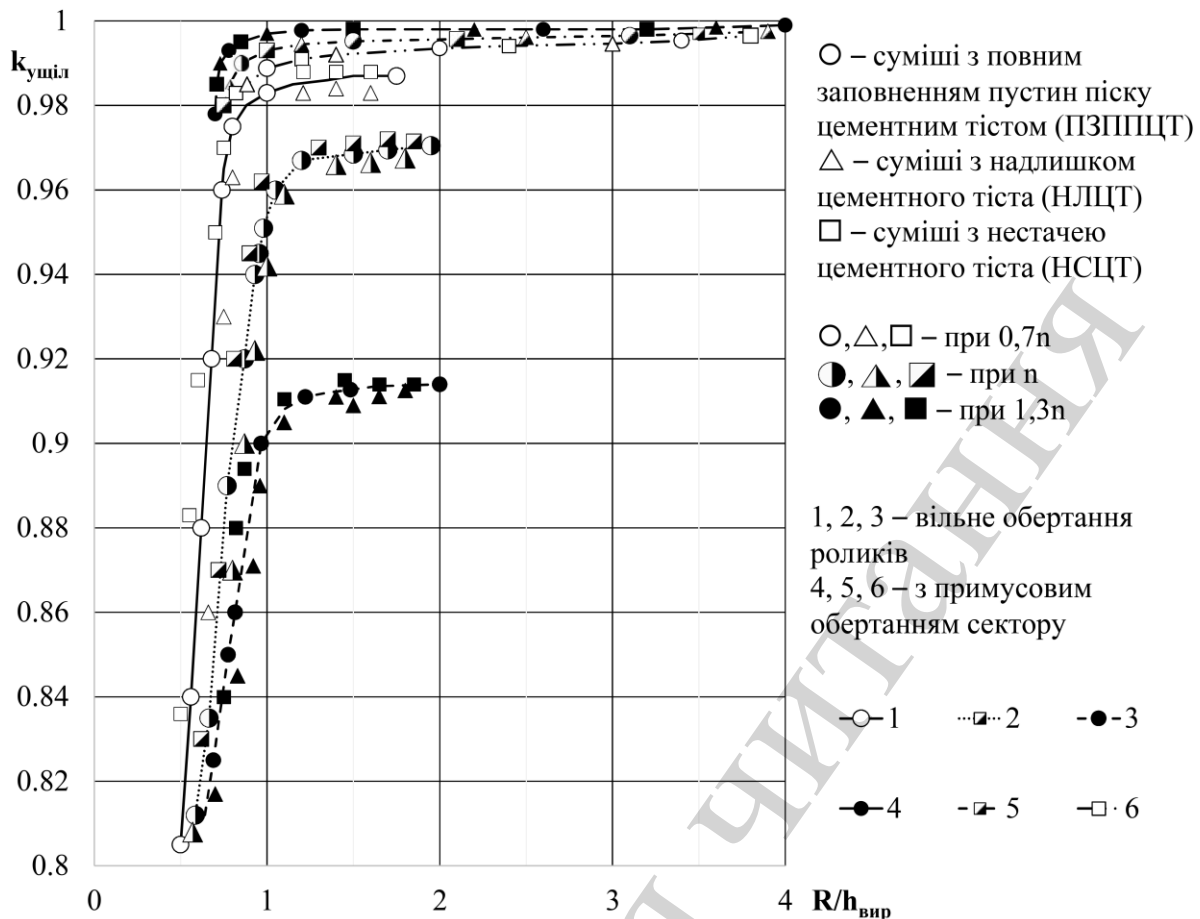


Рис. 2. Графік впливу режимів формування на ступінь ущільнення бетонної суміші

На рис. 2 зображено графік впливу режимів формування на ступінь ущільнення бетонної суміші, нанесені дві серії експериментів. Криві 1, 2 і 3 (1-ша серія) побудовані за результатами, отриманими на стенді з вільним обертом роликів, криві 4, 5 і 6 (2-га серія) побудовані за результатами експериментальних даних, отриманих на тому ж стенді, але з примусовим поворотом сектору.

Аналіз кривих показує, що в процесі ущільнення суміші роликвою технологією як при вільному оберті ролику (криві 1, 2 і 3), так і при примусовому повороті сектору (криві 4, 5, 6) відносно поверхні суміші ступінь ущільнення бетону прагне до межі, відповідно формули 1. Відповідно, можна зробити висновок про те, що (1) є справедливою як для вільного, так і примусового повороту робочого органу при ущільненні бетонних сумішей роликвою технологією.

На графіку (рис. 2) наочно видно, що наявність примусового повороту сектору значно підвищує ступінь ущільнення бетонної суміші в порівнянні з вільним обертом ролику. Так, наприклад, якщо з вільним обертом ролику максимальний коефіцієнт ущільнення дорівнює 0,983, то з примусовим поворотом сектору при однакових умовах формування він складає 0,998.

Більш детальний аналіз кривих показує, що в експериментах з вільним обертом ролику краще ущільнюються суміші з нестачею цементного тіста в міжзерновому просторі, чим суміші з повним заповненням пустот цементним тістом і суміші з надлишком цементного тіста. Це пояснюється тим, що формувальній

машині легше ущільнювати суміші, в яких мається спеціально створений запас порот в ущільненому піску для цементного тіста. Для ущільнення цих сумішей, де такого запасу порот не існує, машині доводиться витратити додаткову енергію, щоб забезпечити щільне устаткування компонентів суміші. В експериментах з примусовим поворотом сектору така закономірність проявляється в меншій ступені (2–га серія експериментів, криві 4, 5 та 6). Таке явище пояснюється наступним чином. Наявність примусового оберту сектору в стенді роликового формування суттєво підвищує максимальний контактний тиск (до 0,78–0,84 МПа замість 0,45 МПа при вільному обертті ролику) між сектором і поверхнею бетонної суміші, що, в свою чергу, значно підвищує інтенсивність ущільнення, яка і зменшила вплив складу бетонної суміші на ступінь її ущільнення.

З графіку (рис. 2) видно також, що в експериментах з вільним оберттом ролику спостерігається різке падіння ступеня ущільнення суміші зі збільшенням частоти дії робочого органу n на бетонну суміш (криві 2 та 3 лежать нижче кривої 1). Такої закономірності не тільки не було виявлено в дослідях, а, навпаки, зі збільшенням частоти впливу коефіцієнт ущільнення дещо підвищується (криві 4 та 5 лежать вище кривої 6). Зміна коефіцієнту ущільнення пояснюється тим, що при формуванні роликовою технологією з вільним оберттом ролику має місце прослизання ролику відносно ущільнюючої поверхні суміші за рахунок зростання інерційних сил з ростом n і відповідного зменшення сил тяги, а при наявності примусового повороту сектору, як показали експерименти, таке прослизання відсутнє.

В роботі [8] було встановлено, що при вільному обертті роликів найбільша ступінь ущільнення суміші досягається при дотриманні умови:

$$H_{\text{вир}}=(0,9:1)R, \quad (1)$$

де R – радіус ущільнюючого ролику, $H_{\text{вир}}$ – найбільша ступінь ущільнення бетону.

Вираз (1) є справедливим до виробів висотою до 150 мм. Експериментально встановлено, якщо висота виробу, що формується, більше 150 мм, то R нижньої його частини буде менший на 10+15 %.

При оцінці якості дрібнозернистого бетону роликового формування були вивчені фізико–механічні якості бетону. До них відносяться міцність на стискування за віссю, розтягування при вигині, морозостійкість, ступінь витирання, водопоглинення, ступінь та однорідність ущільнення свіжо сформованого бетону.

Для проведення експериментальних досліджень використано дрібнозернисті суміші з витратами цементу від 330 кг/м³ до 650 кг/м³. Бетонні суміші з водоцементним відношенням від 0,276 до 0,545 виготовляли в бетонносмесителі примусової дії роторного типу.

Час перемішування склад дав 1,5–3 хв. Фізико–механічні якості бетону визначались на зразках – кубах з розміром ребра 70 мм і зразках – призмах 70×70×280 мм, випиляних з фрагментів плити після 20–добового твердіння у нормальних температурно–вологих умовах.

4. 3. Визначення математичних залежностей характеристик міцності дрібнозернистого бетону та сталевібробетону

Для побудови математичної моделі характеристик міцності дрібнозернистого бетону використовувався метод математичного планування експерименту. З метою отримання більш достовірних залежностей було прийнято два трьохфакторні лінійні плани: 1-й – для сумішей з нестачею цементного тіста в міжзерновій площині ущільненого піску; 2-й – для сумішей з надлишком цементного тіста. При цьому обидва плани охоплюють область з повним заповненням порожнин цементним тістом в міжзерновому просторі ущільненого піску. Фактори, що варіюються, змінювались в межах: для сумішей з нестачею цементного тіста – X_1 (витрати цементу, $\text{кг}/\text{м}^3$) від 330 до 490, X_2 (В/Ц) – водоцементне відношення від 0,285 до 0,545, X_3 (товщина виробу, мм) від 70 до 230; для сумішей з надлишком цементного тіста – $X_1=490-650 \text{ кг}/\text{м}^3$; $X_2=0,277-0,307$; $X_3=70-230$ мм.

Обробка і аналіз даних змін характеристик міцності бетону дозволили отримати лінійні рівняння регресії, їх зміни в залежності від факторів, що досліджуються, а саме:

а) для сумішей з нестачею цементного тіста (2)–(5):

$$R_C^B = 43,96 + 12,46X_1 - 2,59X_2 - 3X_3, \quad (2)$$

$$R_C^H = 41,3 + 12,06X_1 - 2,19X_2 - 5,64X_3, \quad (3)$$

$$R_{PH}^B = 4,88 + 1,2X_1 - 0,23X_2 - 0,27X_3, \quad (4)$$

$$R_{PH}^H = 4,88 + 1,149X_1 - 0,69X_2 - 0,67X_3; \quad (5)$$

б) для сумішей із надлишком цементного тіста (6)–(9):

$$R_C^B = 65,44 + 13,75X_1 - 2,16X_2 - 4,09X_3, \quad (6)$$

$$R_C^H = 61,79 + 12,14X_1 - 2,21X_2 - 7,74X_3, \quad (7)$$

$$R_{PH}^B = 6,66 + 0,96X_1 - 0,46X_2 - 0,34X_3, \quad (8)$$

$$R_{PH}^H = 6,26 + 0,81X_1 - 0,75X_2 - 0,74X_3, \quad (9)$$

де R_C^B і R_{PH}^B – міцність на стискування та розтяжку при вигині в верхньому шарі виробу, МПа; R_C^H і R_{PH}^H – міцність на стискування та розтяжку при вигині в нижньому шарі виробу, МПа.

Крім того, були проведені дослідження на опір тертя бетону, які показали, що опір тертя залежить: від витрат цементу (при витратах цементу від 330 до

650 кг/м³ при В/Ц=0,28 тертя коливається від 0,25 до 0,5 г/см²); від водоцементного відношення (при витратах цементу 490 кг/м³ і В/Ц=0,28+0,4 тертя коливається від 0,32 до 0,48 г/см²); від товщини виробу, що формується (при $H_{\text{вир}}$ 70+250 мм тертя коливається від 0,25 до 0,63 г/см²). Ступінь витирання зразків, виготовлених на вібростолі і протестованих в лабораторії виявилась в 2,5 разів вищою, ніж у зразків роликового формування.

$$\text{Стир}_{\text{бвт}} = 4,9 \times 10^{-1} - R_0 (2,7 + 0,26 \times \Pi) \times 10^{-3} + 4,2 \times 10^{-2} \times \Pi, \frac{\Gamma}{\text{см}^2}, \quad (10)$$

де R_0 – міцність при $K_{\text{стис}}=1$ при повному заповненні пустот, МПа; Π – пористість бетону у відсотках.

Відомо, що чим вище міцність бетону перед початком термовологої обробки, тим менше порушень структури отримає бетон під час прогріву і, відповідно, тим більш жорсткий режим може бути запропонований. Результати досліджень показали, що інтенсивність зростання міцності свіже–сформованого бетону роликового формування з примусовим обертом сектору в значній мірі вище, ніж у бетоні, відформованого роликками з вільним їх обертом, і, тим більш, у віброваного. Так, якщо вже через півгодини після формовки міцність бетону роликового формування з примусовим обертом сектора складала від 0,6 до 0,8 МПа, тоді як міцність бетону, що ущільнений роликками, що вільно обертаються, дорівнює 0,4+0,5 МПа, а у віброваного навіть через дві години міцність була на порядок нижче.

Щоб визначити можливість формування сталевібробетонних сумішей роликовою технологією з одночасним вивченням характеристик міцності сталевібробетону, проведено дослідження впливу фібрової арматури на характеристики міцності сталевібробетону (табл. 1).

При введенні сталевіброї в бетонну суміш (табл. 1) в кількості 1,6 % від її обсягу міцність на стискання складає в середньому 135 % в порівнянні з бетонною матрицею і дорівнює 80+88 МПа. Міцність на розтяжку при вигині складає в середньому 240–243 % і дорівнює в межах 15–16 МПа, а міцність на розтяжку при розколі складає в середньому 220 % в порівнянні з матрицею і дорівнює 5–7 МПа. При цьому встановлено, що такий відсоток збільшення міцності характерний як для сумішей з В/Ц=0,26, так і з В/Ц=0,32.

Для побудови математичних моделей характеристик міцності сталевібробетону використовувався двофакторний лінійний план. При цьому фактори, що варіюються, коливались в межах: X_1 (вода цементне відношення) від 0,26 до 0,32, X_2 (витрати фібри від обсягу бетонної суміші, %) від 0,8 до 1,6.

Обробка і аналіз даних вимірів характеристик міцності сталевібробетону дозволили отримати лінійні рівняння регресії, їх зміни в залежності від факторів, що вивчаються, а саме (10)–(12):

$$R_C^{\Phi} = 78,65 - 3X_1 + 5,85X_2, \quad (10)$$

$$R_{\text{РН}}^{\Phi} = 13 - 0,71X_1 + 2,55X_2, \quad (11)$$

$$R_{pp}^{\phi} = 5,25 - 0,5X_1 + 1,15X_2. \quad (12)$$

Стальні волокна при стискуванні сталевібробетонної суміші методом роликового формування орієнтуються в матриці в напрямку діючих зусиль. Так, міцність призм на розтяжку при вигині, випиляних вздовж плити, на 25–30 % вище міцності плит, випиляних впоперек плити (табл. 2).

Таблиця 1

Усереднені дані впливу об'ємного змісту фібрової арматури ($l=50$ мм, $d=0,5$ мм) на характеристики міцності сталевібробетону (розпил вздовж плити)

Склад, кг/м ³					Міцність, МПа	
Ц	П	В	Ф, %	R_c	$R_{рн}$	R_{pp}
500	1750	160	1,6	80,9/136	14,8/243	5,3/221
500	1750	130	1,6	88,3/135	16,3/240	7,0/219
500	1750	160	0,8	70,4/115	9,8/160	3,7/141
500	1750	130	0,8	75,0/114	11,1/163	4,5/140
500	1750	145	1,2	79,3/126	12,8/203	5,3/182
500	1750	145	1,2	78,5/125	12,5/198	5,2/180
500	1750	145	1,2	77,8/124	12,2/195	5,1/779
500	1750	130	–	65,6	6,8	3,2
500	1750	145	–	62,8	6,3	2,9
500	1750	160	–	59,6	6,1	2,6
Вібраційне формування						
590	1700	236	–	33	3,4	–
590	1700	236	0,5	36/109	5,0/150	–
590	1700	236	1,0	39/118	6,5/191	–
590	1700	236	1,5	41/124	8,3/244	–
590	1700	236	2,0	45/136	9,9/291	–

Таблиця 2

Результати дослідів сталевібробетонних призм на розтяжку при вигині в залежності від напрямку їх розпилу, в МПа

Розпил впоперек плити	n	R_{cp}	Розпил вздовж плити	n	R_{cp}
10,5	25		14,6	62	
11,6	28	11,0	15,1	76	14,8
10,9	31		14,7	68	
7,1	14		9,7	23	
7,8	16	7,5	9,7	24	
7,6	14		10	29	9,8
9,4	18		13,1	47	
9,6	22	9,6	12,6	38	12,8
9,5	19		12,7	43	

Примітка: n – кількість фібрової арматури, що потрапила в переріз злому балочки

Спочатку для дослідів використовувалась фіброва арматура довжиною 50 мм. Дослідження призм на розтяжку при стиску показали, що руйнування супроводжувалось характерним тріском. Цей тріск з'являвся, як було встановлено при ретельному огляді під час руйнування призм, в результаті розриву фібри. Наявність цього розриву свідчить про те, що сила зчеплення фібри з цементним каменем перевищує опір самої фібри на розрив.

Сталефібробетон роликового формування володіє високою стійкістю до тертя. Так, при 0,8 % армування середня ступінь тертя дорівнює 0,19 г/см², а при 1,6 % армування – 0,11 г/см² (табл. 3).

Таблиця 3

Усереднені данні впливу об'ємного змісту фібрової арматури ($l=50$ мм, $d=0,5$ мм) на характеристики міцності сталефібробетону (розпил вздовж плити)

№ експ.	№ плити	Склад (кг/м ³) Міцність (МПа)						
		Ц	П	В	Ф %	R_c	$R_{пр}$	$R_{рр}$
1	1	500	1750	160	1,6	$\frac{80,9^x}{136}$	$\frac{14,8}{243}$	$\frac{5,8}{221}$
2	2	500	1750	130	1,6	$\frac{88,3}{135}$	$\frac{16,3}{240}$	$\frac{6,0}{219}$
3	3	500	1750	160	0,8	$\frac{70,4}{115}$	$\frac{9,8}{160}$	$\frac{3,7}{141}$
14	4	500	1750	130	0,8	$\frac{75,0}{114}$	$\frac{11,1}{163}$	$\frac{4,5}{140}$
15	5	500	1750	145	1,2	$\frac{79,3}{126}$	$\frac{12,8}{203}$	$\frac{5,3}{182}$
16	6	500	1750	145	1,2	$\frac{78,5}{125}$	$\frac{12,5}{198}$	$\frac{5,2}{180}$
17	7	500	1750	145	1,2	$\frac{77,8}{124}$	$\frac{12,2}{195}$	$\frac{5,1}{179}$
53	8	500	1750	130	–	$\frac{65,6}{100}$	$\frac{6,8}{100}$	$\frac{3,3}{100}$
54	9	500	1750	145	–	$\frac{62,8}{100}$	$\frac{6,3}{100}$	$\frac{2,9}{100}$
55	10	500	1750	160	–	$\frac{59,6}{100}$	$\frac{6,1}{100}$	$\frac{2,6}{100}$

Примітка: * – над рисою в МПа, під рисою у % до дрібнозернистого бетону

Це в 4,2 рази вище, ніж ступінь стирання сталефібробетону, виготовленого за допомогою віброформування.

Отримана на основі аналізу приведених багато чисельних експериментальних досліджень формула:

$$C_{\phi} = \text{Стир}_{\text{бвт}} - 0,125M, \frac{\Gamma}{\text{см}^2}, \quad (13)$$

де $\text{Стир}_{\text{бвт}}$ – ступінь стирання бетонної матриці, що визначається за формулою (10); M – відсоток об'ємного армування бетонної матриці.

Сталефібробетон роликowego формування володіє пониженим ступенем водопоглинення – 2,5–3 % по масі.

Викладене дозволяє рекомендувати застосування роликowego технології з примусовим обертом робочого органу для виробництва бетонних та сталефібробетонних виробів, а саме: решіток перекриття підлог тваринницьких ферм, підпор для виноградних шпалер, плит трамвайних шляхів, багатошарових настилів, люків каналізаційних колодязів, бортових каменів, панелей парканів та екранів лоджій, аеродромних плит, тротуарних плит, багатопустотних плит тощо.

4. 4. Виявлення взаємозв'язків в технології роликowego формування дрібнозернистих бетонних і сталефібробетонних виробів

Рекомендації по виготовленню залізобетонних виробів методом роликowego формування дозволяють забезпечити розробку більш досконалої технології та обладнання роликowego формування, а також сталефібробетонних конструкцій з урахуванням фізико–механічних характеристик матеріалу.

Хоча порівняно невелика область застосування роликowego технології пояснюється тим, що при формуванні залізобетонних плит, армованих просторовими каркасами, виникають тріщини, що пов'язано з деформацією арматурного каркасу. Тому, однією з перспективних областей застосування роликowego технології, в якій можуть з'являтися її суттєві переваги, є вироби з дисперсним армуванням стальними волокнами.

Дослідження з визначення параметрів процесу формування бетону та сталефібробетону здійснювались в умовах промислового виробництва з примусовим обертом сектору.

5. Визначення продуктивності процесу, величини тисків, діючих на елементи форми і тягових зусиль переміщення форм в процесі роликowego формования

В результаті обробки даних були одержані залежності, що враховують примусовий оберт сектору і дозволяють визначати:

а) продуктивність процесу формування (14):

$$Q = 9,84 \times 10^{-3} \times \Pi \times R_c (1 - \cos \lambda_1) \times l_c \times b_{\text{вир}} \times n \times K_1, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (14)$$

де Q – продуктивність процесу, $\text{м}^3/\text{с}$; Π – пористість свіже сформованого бетону, %; R_c – радіус сектору, м; l_c – довжина сектору, м; n – число подвійних ходів балки в хвилину; $b_{\text{вир}}$ – ширина виробу, м; K_1 – коефіцієнт, що характеризує

вплив відсотку фібрового армування M на витрати суміші, що визначається за графіком (рис. 3).

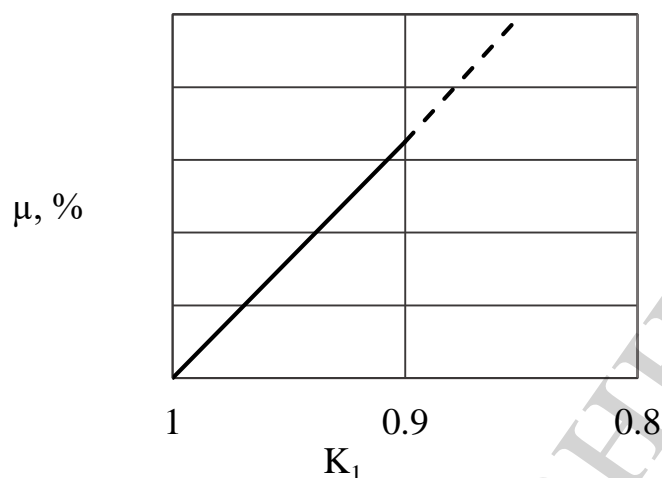


Рис. 3. Залежність об'ємного фібрового армування μ від коефіцієнта K_1

λ – кут захвату осі сектора, що визначається за формулою (15):

$$\lambda_1 = (0,189 + 0,0573 \text{ Ц/В}) \times (0,829 + 4,53 \times 10^{-3} \times n), \text{ рад}, \quad (15)$$

б) максимальні тиски, що діють на дно P_{\max} і борта форми P_{δ} (16):

$$P_{\max} = \frac{K_T \times K_2}{K_0} \times R_C (1 - \cos \lambda_1) \times 10^2, \text{ МПа}, \quad (16)$$

де K_T – технологічний коефіцієнт, що дорівнює: 1 – для виробів, що формуються без перегородок та арматури; 1,7 – для виробів, що формуються у формах з перегородками; K_2 – коефіцієнт, що характеризує вплив відсотка фібрового формування M на величину опорів та визначається за графіком (рис. 4).

K_c – коефіцієнт, що залежить від частоти впливу ущільнюючого сектора на бетонну суміш, що визначається за формулою (17)–(19):

$$K_c = 6 \times 10^{-2} \times n - 0,8, \frac{C^2 \times M^2}{\text{кг}}, \quad (17)$$

$$P_{\delta} = K_{\delta} \times P_{\max} = \frac{K_{\delta} \times K_m \times K_2}{K_C} \times R_C (1 - \cos \lambda_1) \times 10^2, \text{ МПа}, \quad (18)$$

де K_{δ} – коефіцієнт бокового впливу, що дорівнює 0,7.

$$N = \frac{K_m + K_3}{K_c} \times R_c (1 - \cos \lambda_1) \times R_{KB} \times$$

$$\times W \left(\begin{array}{l} K_n \times L_c \times a \sqrt{\frac{R_c \times V_\phi \times S}{l_c \times b_{ns} \times n}} \times 10^3 + \\ + B_6 \times b_{\text{вир}} \times 10^5 \end{array} \right), \text{ кВт}, \quad (19)$$

де K_3 – коефіцієнт, що характеризує вплив фібрового армування M на величину місткості. Він визначається за графіком (рис. 5).

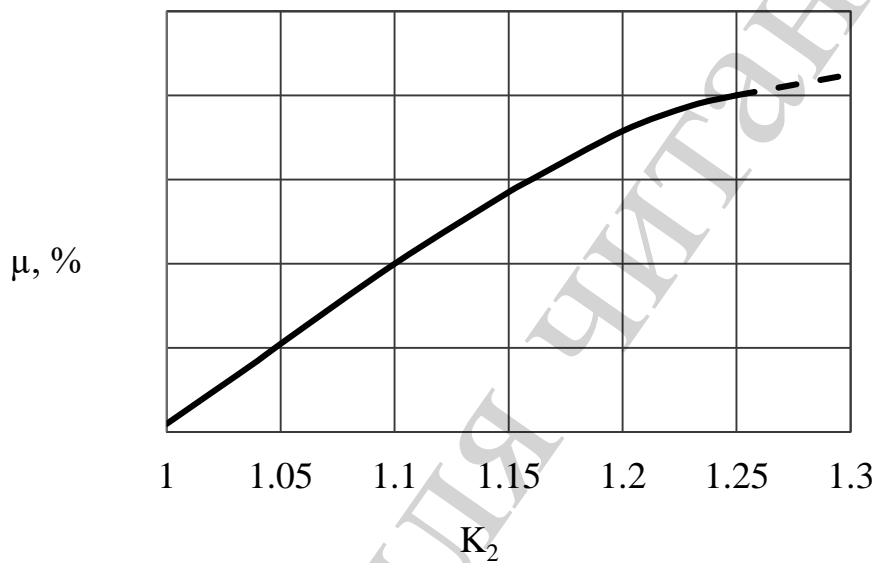


Рис. 4. Залежність об'ємного фібрового армування від K_2

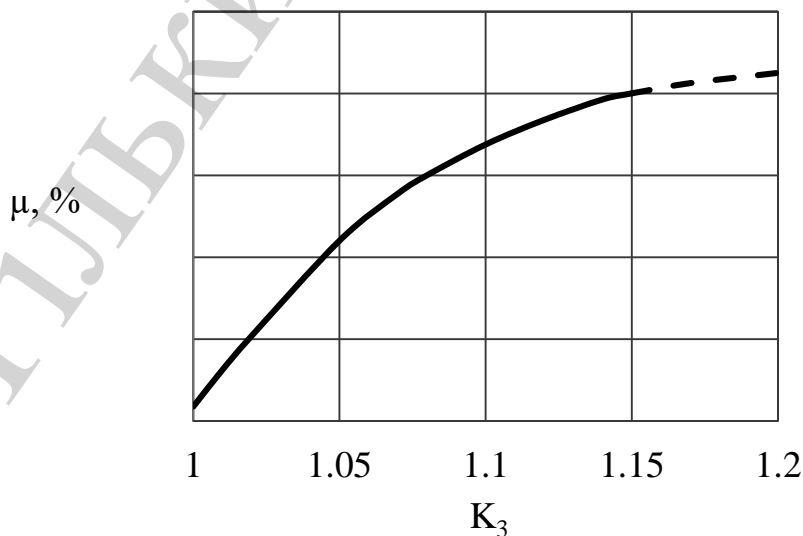


Рис. 5. Залежність об'ємного армування від K_3

R_{KB} – радіус кривошипу приводу, м; a – кількість секторів; V_{ϕ} – швидкість руху форми, м/с; S – площа перерізу виробу, що формується, поперек руху форми, м²; W – кутова швидкість обертання кривошипу, с⁻¹; B_6 – ширина стабілізуючої балки; K_n – коефіцієнт опору перекочування, що визначається за формулою (20):

$$K_n = 6,11 \times 10^{-2} \times n + 0,37, \quad (20)$$

в) тяглове зусилля, що вимагається для переміщення форм (21):

$$F_{\phi} = 0,85 \times 10^6 \times \frac{K_T + K_4}{K_C} \times R_C (1 - \cos \lambda_1) \times \left[l_c \times a \sqrt{\frac{R_C \times V_{\phi} \times S}{l_c \times b_{ns} \times n}} \times 10^4 + 0,25 B_6 \times b_{\text{вир}} \right] \times K_{\text{ск}}, \text{ Н}, \quad (21)$$

де K_4 – коефіцієнт, що характеризує вплив відсотку фібрового армування M на величину тягового зусилля і визначається за графіком на рис. 6.

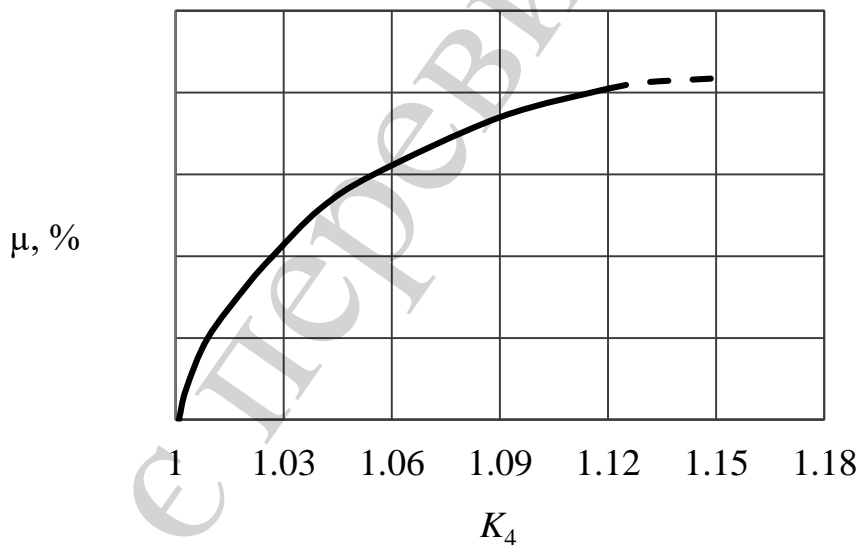


Рис. 6. Залежність K_4 від об'ємного фібрового армування

$K_{\text{ск}}$ – коефіцієнт ковзання металу по металу, що дорівнює 0,2.

6. Визначення економічної ефективності технології роликового формування з примусовим обертом робочого органу

Економічну ефективність застосування технології роликового формування з примусовим обертом робочого органу було експериментально досліджено на науково-виробничому комплексі газотурбобудування «Зоря-Машпроект» (Миколаїв, Україна).

Впровадження даної технології при виробництві бетонних і сталевібробетонних виробів з дрібнозернистого бетону дозволить знизити витрати цементу та збільшити строк експлуатації виробів на його основі.

Економічний ефект за рахунок зниження витрат цементу на 50 кг при ціні 61,2 ум. од./т складе на 1 м³ (22):

$$E_{\phi} = 61,2 \times 0,05 = 3,06 \text{ ум. од.} \quad (22)$$

При плановому обсязі продукції, що буде випускатися 3000 м³/рік річний економічний ефект складатиме (23):

$$E_{\phi 1} = 3,06 \times 3000 = 9180 \text{ ум. од.} \quad (23)$$

Економічний ефект за рахунок підвищення морозостійкості виробів строк служби збільшується в 1,4 рази (24)–(27):

$$E_{\phi 2} = A(C_1 - C_2), \quad (24)$$

де A – річний обсяг виробництва, C_1 – собівартість бортового каменю до впровадження – 14,99 ум. од.; C_2 – скоригована собівартість бортового каменю після впровадження (25).

$$C_2 = C_{2\text{післ}} \times \frac{T_1}{T_2}, \quad (25)$$

де $C_{2\text{післ}}$ – розрахункова собівартість бортового каменю після впровадження – 12,25 ум. од.; $T_{\text{ск}}$ – строк служби бортового каменю до впровадження; $T_{\text{нк}}$ – строк служби бортового каменю після впровадження;

$$C_2 = 12,25 \times \frac{12}{18} = 8,21 \text{ ум. од.}, \quad (26)$$

$$E_{\phi 2} = 3000(12,25 - 8,21) = 3000 \times 4,04 = 14200 \text{ ум. од.} \quad (27)$$

Загальний економічний ефект складає (28):

$$E_{\text{заг}} = E_{\phi 1} + E_{\phi 2} = 9180 + 14200 = 21300 \text{ ум. од.} \quad (28)$$

Ця науково-дослідна робота проводилась з використанням дрібнозернистого бетону (в якості заповнювача використовувався кварцовий пісок). При використанні крупного заповнювача (щебеню, гравію) в процесі ущільнення бетонної суміші можливе виникнення пустот за рахунок заклинювання щебеню (гравію).

Проведені експрес–досліди показали, що крупний заповнювач можна додавати в бетонну суміш в обсязі, що не перебільшує 20 % загального обсягу суміші.

При цьому необхідно додатково уточнити розміри фракції крупного заповнювача.

7. Обговорення результатів дослідження технології роликового формування з примусовим поворотом робочого органу

Отримані результати пояснюються наступними факторами:

– застосування примусового оберту робочого органу устаткування роликового формування замість його вільного оберту відносно ущільнюючої поверхні бетонної суміші;

– товщина виробу, що формується, має бути не більше радіусу робочого органу (ролика чи сектора);

– сталеві волокна при ущільненні сталевібробетонної суміші методом роликового формування орієнтуються в матриці в напрямку діючих зусиль. Завдяки цьому, міцність призм на розтяжку при вигині, випиляних вздовж плити, на 25–30 % вище міцності призм, випиляних впоперек плити.

Головна особливість запропонованого методу роликового формування і отриманих бетонних і сталевібробетонних виробів з високими фізико–механічними якість полягає в наявності примусового повороту робочого органу (ролика чи сектору). Вільний оберт робочого органу приводить до прослизання і заклинювання останнього поверхні суміші, що формується, за рахунок збільшення зусиль вільно обертаючих роликів. Наявність прослизання знижує силу тертя між роликом і поверхнею суміші, що призводить до зниження ступеня ущільнення суміші.

Даному дослідженню притаманні наступні вимоги та обмеження:

– товщина виробу, що формується, має бути не більше радіусу робочого органу (ролика чи сектору);

– об'єм крупного заповнювача в бетонній суміші має бути не більше 20 % від загального обсягу виробу. Інакше в процесі формування утворюються з'єднання, не заповнені цементно–пісочною сумішшю (пустоти);

– фракція крупного заповнювача має бути не більше 10–20 мм;

– частка сталевібробетонної фібри в сталевібробетонній суміші має бути не більше 1,6 % за обсягом. Інакше в процесі формування утворюються грудки зі сталевих волокон (фібр).

До одного з обмежень даного дослідження можна віднести малу ширину виробу, що формується, а саме: 80–100 см. Але в перспективі цей недолік може бути усунений шляхом установки на стабілізуючій балці двох або трьох робочих органів (роликів чи секторів).

Розвиток даного дослідження може полягати в:

– формуванні виробів з різноманітних видів бетонів з різноманітними видами як важких, так і легких заповнювачів;

– формування фібробетону в залежності від фібри, що застосовується (сталевібробетон, скляне волокно, їх довжина та діаметр);

– підбір міцності головного приводу установки ролику в залежності від виду і розмірів виробу, що формується, матеріалу виробу, жорсткості бетонної суміші та інших факторів.

В процесі розвитку даного дослідження з технології роликового формування можна зіткнутися з труднощами експериментального характеру. Враховуючи той факт, що технологія досить нова і недостатньо вивчена, постає необхідність проведення значної кількості експериментальних лабораторних досліджень перед промисловим впровадженням. При цьому необхідно враховувати вид і розміри виробів, їх склад, характеристику заповнювачів, характеристику фібрових волокон, жорсткість суміші, що формується, діючі навантаження на борти і днище форм та інші фактори.

7. Висновки

1. Технологія роликового формування є однією з найбільш прогресивних для виробництва бетонних, залізобетонних та сталевібробетонних виробів з особливо жорстких дрібнозернистих бетонних сумішей. Доведено, що наявність примусового повороту робочого органу (сектору чи ролику) підвищує ефективність роботи устаткування і підвищує якість виробів, що формуються.

2. На основі проведених досліджень встановлено, що:

– найбільша ступінь ущільнення бетону як для вільного оберту, так і для примусового повороту робочого органу досягається за умови рівності радіусу робочого органу висоті виробу, що формується;

– наявність примусового повороту робочого органу усуває утворення дефектів структури у вигляді зрушень у свіже відформованому бетоні і підвищує однорідність ущільнення бетону;

– наявність примусового повороту сектору збільшує ступінь ущільнення бетону проти варіанту вільного обертання роликів з 0,902 до 0,997;

– дана технологія дозволяє ефективно використовувати дрібнозернистий бетон при виробництві бетонних і сталевібробетонних виробів без крупного заповнювача.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що при роликовому формуванні сталевібробетонні волокна набувають площинну спрямовану орієнтацію в бетонній матриці, яка сприяє підвищенню характеристик міцності сталевібробетону.

3. Встановлено, що дрібнозернистий бетон і сталевібробетон роликового формування володіють підвищеними фізико-механічними якостями, а саме:

– дрібнозернистий бетон і сталевібробетон роликового формування володіють високим опором до зношування (тертя бетону складає від 0,25 до 0,6 г/см², а сталевібробетону – від 0,11 до 0,19 г/см², що у 2,3 та в 4,2 рази нижче, чим при вібротехнології;

– бетонні і сталевібробетонні вироби роликового формування витримують 300 циклів поперемінного заморожування і відтаювання;

– інтенсивність росту міцності свіже сформованого бетону роликового формування вже через півгодини складає від 0,6 до 0,8 МПа, в той час як у віброваного навіть через кілька годин міцність була на порядок нижче;

– при введенні сталльної фібри в бетонну суміш в кількості 1,6 % від її об'єму міцність на стискання складає в середньому 135 % в порівнянні з бетонною матрицею і дорівнює 80–88 МПа. Міцність на розтяжку при вигині складає в середньому 240–243 % і дорівнює в межах 15–16 МПа, а міцність на розтяжку при розколі складає в середньому 220 % в порівнянні з матрицею і дорівнює 5–7 МПа;

– дрібнозернистий бетон і сталєфібробетон роликowego формування володіють порівняно низьким ступенем водопоглинення, що свідчить про їх високу щільність (водопоглинення бетону коливається від 3 до 5 за масою, а сталєфібробетону – від 2,5 до 3 % за масою).

4. В результаті обробки експериментальних даних з формування дрібнозернистого бетону і сталєфібробетону отримані залежності, що враховують примусовий оберт сектору і дозволяють визначити:

- продуктивність процесу роликowego формування;
- максимальний опір, що діє на днище та борти форми;
- міцність, що споживається головним приводом устаткувань роликowego формування.

Отримані результати рекомендуємо використовувати для уточнення та вдосконалення технології безвібраційного роликowego формування виробів з дрібнозернистих бетонів, як на стадіях проектування/конструювання, так і у режимах реальної експлуатації.

Література

1. Американская техника и промышленность (2017). Архитектурное строительство. Сборник рекламных материалов. М., 365.
2. Назин, В. М., Осипов, В. А. (2016). Производство железобетонных труб в Польше. Промышленность строительных материалов, 7, 4–7.
3. Королев, Н. Е., Овсянников, И. Д. (2016). Установка без вибрационного радиального прессования роликовой головкой безнапорных труб. Промышленность строительных материалов, 12, 12–15.
4. Казарин, С. К. (2011). Повышение срока службы роликowych головок трубоформовочных станков радиального прессования. Оборудование для производства цемента и сборного железобетона, 2, 23–27.
5. Malolepszy, J., Kotwica, L., Konyk, Z., Zak, R. (2014). Rapid-hardening cements with addition of anhydrite-lime sinters. Cement-Wapno-Beton, 1, 40–45.
6. Plank, J. (2015). C-S-H – PCE Nanocomposites for Enhancement of Early Strength of Cement. IBAUSIL 19, 1, 759–766.
7. Sanytsky, M. (2007). Mechanism of alkali-containing complex chemical admixtures and Portland cements interaction. Proceed. 10th Int. Congress on the Chemistry of Cement. Gotenborg, 3, 158–167.
8. Королев, Н. Е., Кузин, В. Н., Селиванова, С. А. (1970). Формование железобетонных изделий методом роликowego прессования. Труды НИИЖБ, 22, 32–38.
9. Кузин, В. М., Селиванова, С. А. (2015). Вопросы качества изделий роликowego формования. ВКН: Технология безвибрационного формования железобетонных изделий. Минск, 133–139.

10. Севост'янов, І. В. (2014). Експлуатація та обслуговування машин. Вінниця: ВНТУ, 88.
11. Rana, A. K., Rana, S. B., Kumari, A., Kiran, V. (2009). Significance of Nanotechnology in Construction Engineering. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1 (4), 46–48.
12. Ferraris, C. F. (2001). Concrete mixing methods and concrete mixers: State of the art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 106 (2), 391. doi: <https://doi.org/10.6028/jres.106.016>
13. Ловейкін, В. С., Почка, К. І. (2016). Динамічна оптимізація кулачкового приводу машин роликового формування. К.: ЦП «Компринт», 176.

ТІЛЬКИ ДЛЯ ЧИТАННЯ