

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОВІТРОУТЯГУВАННЯ НА МІЦНІСТЬ ДОРОЖНІХ БЕТОНІВ

Толмачов С.М., д.т.н, професор,
Бєліченко О.А., к.т.н., с.н.с.,
Захаров Д.С., аспірант,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
Tolmachov.serg@gmail.com

Анотація. У статті наведені експериментальні дані, які показують, як повітроутягування впливає на міцність дорожніх бетонів. Дослідження проводили на бетонах, які були виготовлені на цементах різних марок з різним вмістом шлаку. Показано, що незалежно від марки цементу, збільшення кількості повітря в складі бетонної суміші приводить до зниження міцності бетону. При цьому міцність бетону при стиску знижується в більшому ступені, ніж міцність при згині. Зниження міцності при стиску можна пояснити збільшенням кількості дефектів в структурі бетону, а при згині – залежить від якості зони контакту, в яку додатково залучене повітря не потрапляє.

Ключові слова: повітроутягування, міцність при згині, міцність при стиску.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУХОВОВЛЕЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ДОРОЖНЫХ БЕТОНОВ

Толмачев С.Н., д.т.н., профессор,
Бєличенко Е.А., к.т.н., с.н.с.,
Захаров Д.С., аспирант,
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет
Tolmachov.serg@gmail.com

Аннотация. В статье приведены экспериментальные данные, которые показывают, как воздухововлечение влияет на прочность дорожных бетонов. Исследования проводили на бетонах, которые были изготовлены на цементах разных марок с различным содержанием шлака. Показано, что независимо от марки цемента, увеличение количества воздуха в составе бетонной смеси приводит к снижению прочности бетона. При этом прочность при сжатии снижается в большей степени, чем прочность при изгибе. Снижение прочности при сжатии можно объяснить увеличением количества дефектов в структуре бетона, а при изгибе - зависит от качества зоны контакта, куда дополнительный воздух не попадает.

Ключевые слова: воздухововлечение, прочность при изгибе, прочность при сжатии.

INVESTIGATION OF AIR-ENTRAINING INFLUENCE ON THE ROAD CONCRETE STRENGTH

Tolmachov S.M., Doctor of Engineering, Professor,
Belichenko O.A., Ph.D., Senior Researcher,
Zakharov D.S., postgraduate,
Kharkov national automobile und highway university
Tolmachov.serg@gmail.com

Abstract. The article presents experimental data that show how air-entraining affects on the

strength of road concrete. To involve additional air, a chemical additive Sika Mix Plus was used. The studies were carried out on concretes using cements of M500 grades (types CEM I) and M400 (types CEM II/A-S) with different slag contents. It is shown that, regardless of cement grade (types), an increase of the amount of air in the concrete mix leads to concrete strength decrease. The compressive strength of the concrete with increasing air quantity is reduced to a greater extent than the flexural strength. The article gives a possible explanation of this phenomenon. It is based on the fact that the decrease of compressive strength can be explained by the increase the number of defects in the structure of the concrete. First of all the decrease of the flexural strength depends on the quality of the contact zone into which additional air does not enter. It is shown that the strength of concrete on cements containing slag is reduced to a lesser extent than in concrete, on cements without mineral additives. Despite the reduction of strength with an increase in the amount of air, the concrete structure becomes more isotropic.

Keywords: air-entrained, strength of compressing, strength of bending.

Вступ. Відомо, що крім обов'язкового застосування суперпластифікуючих добавок, в дорожні та аеродромні бетони рекомендується вводити додаткову кількість повітря. Це необхідно для того, щоб підвищити їх корозійну стійкість і морозостійкість. Додаткове повітроутягування зазвичай забезпечують за рахунок застосування повітровтягувальних або газоутворюючих добавок. Тому в бетоні, можуть бути присутніми:

- великі повітряні пори (макропори), утворені за рахунок захопленого при перемішуванні повітря і подальшого його защемлення;
- мікропори, утворені за рахунок додаткового повітроутягування;
- капілярні пори різного розміру, утворені за рахунок випаровування вологи з бетону;
- контракційні пори і пори гелю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільшою мірою докладному дослідженню піддавали повітряні, капілярні, контракційні і гелеві пори, а також оцінювали їх вплив на властивості цементного каменю, розчину і бетону. Дослідженням впливу додаткового повітроутягування на властивості дорожніх і аеродромних бетонів займалися в меншій мірі. Загальна думка дослідників, які вивчали вплив додаткового повітроутягування на міцність, була негативна [1-4]. У той же час, з'являються роботи, в яких можна відзначити також і позитивну роль пор [5]. Наприклад у роботі [6] показано, що в процесі усадки або набухання розміри пор в бетоні змінюються і вони також можуть розширюватися або стискатися. Не міняються розміри тільки пор гелю. Капілярні і повітряні пори змінюють розміри, що має відбитися на коливаннях міцності. При певних умовах (наприклад, при $V/C \geq 0,5$) збільшення розмірів цих пор приведе до утворення тріщин і зниження міцності бетонів.

До сих пір незрозумілим залишається питання про те, в якій мірі штучне додаткове повітроутягування впливає на міцність при стиску, а в якій – при згині. При якій кількості залученого повітря зниження міцності стає значним. Ранні наші дослідження дозволили визначити рівень зниження міцності при стиску при різному вмісті залученого в бетон повітря [7, 8]. У літературі практично не було приділено уваги впливу залученого повітря на міцність бетонів при згині. Тому, як і раніше актуальними є подальші дослідження в цій області, особливо впливу повітроутягування на міцність при згині.

Метою дослідження було встановлення характеру і ступеня впливу додаткового повітроутягування на міцність бетонів, виготовлених на різних типах цементу.

Матеріали, що використовували у дослідженнях. У дослідженнях використовували портландцемент марок М400 і М500 виробництва ПАТ «Дікергофф Цемент Україна» з різним вмістом шлаку в складі. В якості заповнювачів використовували пісок кварцовий Кременчуцький з $M_{кр} = 1,6$, а також щебінь гранітний Рижеського кар'єру фракції 5-10 мм.

У всіх складах застосовували суперпластифікатор полікарбосилатного типу Sika 2508 в кількості 1,0% від маси цементу. В якості повітровтягувальної добавки використовували добавку Sika Mix Plus. Виготовляли зразки-балочки розміром $4 \times 4 \times 16$ см складу: $C = 350 \text{ кг/м}^3$; $P = 600 \text{ кг/м}^3$; $Щ = 1300 \text{ кг/м}^3$. У бетонах на цементах марки 400 витрати в'язучого збільшували

на 30 кг/м³. Зразки бетонів тверділи в нормальних умовах. Дослідження повітроутягування у бетонних сумішах проводили за стандартною методикою згідно ДСТУ Б В.2.7-114 [9] за допомогою приладу пороміру. Марка бетонної суміші за консистенцією складала S1.

Основний матеріал і результати досліджень. Відповідно до вимог нормативних документів у складі сучасних важких бетонів обов'язково повинні міститися суперпластифікуючі добавки. Ця вимога в першу чергу відноситься до дорожніх і аеродромних бетонів. Тому в усі склади бетону вводили суперпластифікатор. Для забезпечення необхідної морозостійкості до складу бетонів транспортного призначення вводять також повітровтягуючі добавки. Як було показано вище, повітровтягуючі добавки відіграють також негативну роль, знижуючи міцність бетонів. Для оцінки впливу залученого повітря в бетонну суміш на міцність бетонів, особливо при згині, кількість залученого повітря в дослідженнях змінювали за рахунок зміни витрати повітровтягуючої добавки.

Оскільки необхідною і достатньою кількістю залученого повітря вважається (для різних регіонів і складів бетону) 3...7 %, то експериментальні дослідження проводили для бетонів, яких повітроутягування відповідало цьому рівню. Для контролю досліджували міцність бетонів без повітровтягуючої добавки, з недостатнім повітроутягуванням і з позамежним вмістом повітря. Декілька більшу кількість повітря, ніж зазначено вище, рекомендовано у EN 206-1 [10]: мінімальна кількість залученого повітря повинна бути 4 %. Аналогічна вимога зазначена в нормативних документах України [11]. В ГОСТ 26633 [12] ця кількість відповідає зазначеному вище, тобто 3...7 %.

Дослідження, проведені на цементах марки 500, з різним вмістом шлаку показали, що залежності приблизно однакові. За даними заводу-виготовлювача: в цементі ПЦ І 500 вміст шлаку 0 %, в цементі ПЦ ІІ/А-Ш-500 вміст шлаку 18...20 %, в цементі типу Б/Ш вміст шлаку 30...32 %. Необхідно відзначити, що кількість шлаку однаково в цементах марок М500 і цементах М400, різниця полягає в тонині помелу цементу різних марок (питома поверхня цементу марки 500 вище на 10...15 %, цементів марки 400), що визначає їх активність і марку.

Для цементу ПЦ І 500 збільшення вмісту повітря з 2,6 до 3,8 % приводить до зниження міцності у віці 7 діб при стиску на 6,5 % і на 9,5 % при згині (табл. 1). У віці 28 діб зниження міцності склало: 8 % при згині і 6 % при стиску. В даному рекомендованому діапазоні повітроутягування збільшення кількості повітря з 3,8 % до 6,2 % приводить до зниження міцності на 8,6 % при згині і на 27,5 % при стиску у віці 7 діб. Зниження міцності у віці 28 діб склало 5,7 % при згині і 13 % при стиску. У позамежному діапазоні повітроутягування збільшення кількості повітря з 6,2 % до 8,6 % привело до зниження міцності на 18 % при згині, та на 37,4 % при стиску у віці 7 діб і на 4,5 % при згині, 15,6 % при стиску у віці 28 діб.

Таблиця 1 – Вплив кількості залученого повітря на міцність бетонів на цементі ПЦ І 500

| Кількість добавки Sika Mix Plus, % від m_c | Кількість залученого повітря, % | $R_{зг}$, МПа | | $R_{ст}$, МПа | | $K_{деф}$, 28 діб., ($R_{ст}/R_{зг}$) | |
|--|---------------------------------|----------------|---------|----------------|---------|--|---------|
| | | 7 доба | 28 доба | 7 доба | 28 доба | 7 доба | 28 доба |
| - | 2,6 | 6,9 | 7,9 | 41,3 | 47,0 | 5,98 | 5,95 |
| 0,07 | 3,8 | 6,3 | 7,3 | 38,9 | 44,3 | 6,17 | 6,07 |
| 0,1 | 6,2 | 5,8 | 6,9 | 30,5 | 39,2 | 5,26 | 5,68 |
| 0,2 | 8,6 | 4,9 | 6,6 | 22,2 | 33,9 | 4,53 | 5,14 |

Очевидно, що в рекомендованому діапазоні повітроутягування і при його подальшому збільшенні, зростання кількості залученого повітря приводить до більшого зниження міцності при стиску, ніж при згині в кілька разів. Це підтверджує відоме правило, що чим більше в матеріалі дефектів структури, тим нижче його міцність. Але це відноситься до дефектів мезо- і макроструктури і не зачіпає зону контакту «цементний камінь-заповнювач», яка відповідає за міцність при згині і в якій відсутнє залучене повітря.

На високу ступінь однорідності макроструктури вказує також коефіцієнт дефектності ($K_{\text{деф}}$), який є відношенням міцності бетону при стиску до міцності при згині ($R_{\text{ст}}/R_{\text{зг}}$) (коефіцієнт дефектності по І.М. Грушко). Чим нижче цей коефіцієнт, тим вище однорідність структури, тим бетон більш ізотропний. У нашому випадку при збільшенні вмісту повітря в складі бетону $K_{\text{деф}}$ постійно знижується. У розглянутому діапазоні повітроутягування, незважаючи на істотне зниження міцності при стиску, зростаюча ізотропність бетону при загальній достатній величині міцності при згині, дозволяє застосовувати бетон для верхніх шарів дорожнього одягу.

Для цементу ПЦ II/A-III-500, який містить у своєму складі мелений шлак, можна відзначити аналогічну тенденцію зниження $K_{\text{деф}}$ і зростання ізотропності бетону (табл. 2). Початковий вміст повітря в бетонній суміші на цьому цементі становить 3,5 %, що значно вище, ніж в суміші на цементі ПЦ I 500 без повітровтягуючих добавок. Важливим є і те, що цей коефіцієнт приблизно однаковий для бетонів, що містять приблизно рівну кількість залученого повітря: при вмісті повітря 3,8 % (табл. 1) або 3,5 % (табл. 2) $K_{\text{деф}}$ дорівнює 6,07 і 6,0 відповідно. Очевидно також, що шлакова складова цементу, яка, ймовірно, більш тонко подрібнюється при спільному помелі через меншу міцність шлаку, сприяє більшому повітроутягуванню. Це необхідно враховувати при призначенні витрати повітровтягуючої добавки.

Таблиця 2 – Вплив кількості залученого повітря на міцність бетонів на цементі ПЦ II/A-III-500

| Кількість добавки Sika Mix Plus, % від $m_{\text{ц}}$ | Кількість залученого повітря, % | $R_{\text{зг}}$, МПа | | $R_{\text{ст}}$, МПа | | $K_{\text{деф}}$, 28 діб., ($R_{\text{ст}}/R_{\text{зг}}$) | |
|---|---------------------------------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|---|---------|
| | | 7 доба | 28 доба | 7 доба | 28 доба | 7 доба | 28 доба |
| | | - | 3,5 | 7,25 | 7,8 | 43,8 | 46,8 |
| 0,07 | 4,2 | 6,9 | 7,4 | 41,1 | 43,5 | 6,0 | 5,88 |
| 0,1 | 6,8 | 6,3 | 7,0 | 36,3 | 39,7 | 5,76 | 5,67 |
| 0,2 | 9 | 5,7 | 6,5 | 31,7 | 32,6 | 5,56 | 5,02 |

У рекомендованому діапазоні повітроутягування зниження міцності при збільшенні кількості повітря становить:

– на 7 добу твердіння: при згині – 5 % (в діапазоні від 3,5 до 4,2 % кількості залученого повітря) і 9,5 % (в діапазоні від 4,2 до 6,8 % кількості залученого повітря); при стиску – 5 і 13 % відповідно;

– на 28 добу твердіння: при згині – 5,4 % (в діапазоні від 3,5 до 4,2 % кількості залученого повітря) і 5,7 % (в діапазоні від 4,2 до 6,8 % кількості залученого повітря); при стисненні – 8 і 10 % відповідно.

При збільшенні вмісту повітря до 9 % міцність при згині знижується на 10 і 7,7 % (у віці 7 і 28 діб твердіння), а міцність при стиску – на 14,5 і 22 % (у віці 7 і 28 діб твердіння). Слід зазначити, що в бетонах на цементі, що містить до 20 % шлаку зниження міцності, з ростом повітроутягування, виражено менш значно, ніж на чистоклінкерному цементі тієї ж марки.

Зіставлення отриманих даних дозволяє сказати, що міцність бетонів при стиску на цементах марки М500, при збільшенні повітроутягування, знижується значно швидше, ніж міцність при згині, незалежно від наявності шлаку в мінеральному складі цементу.

Далі проводили дослідження впливу залученого повітря на міцність бетонів на цементах марки 400, що містять від 18 до 32 % меленого шлаку (табл. 3, 4). Витрати цементу в цих бетонах було збільшено на 30 кг/м³. Слід зазначити, що початковий вміст залученого повітря в бетонних сумішах на цих цементах вище, ніж в сумішах на цементах марки 500. Воно становить 3,8 % для сумішей на цементі ПЦ II/A-III-400 і 3 % для сумішей на цементі ПЦ II/B-III-400. Ця кількість повітря відповідає мінімально рекомендованій кількості для забезпечення морозостійкості бетону. Отримані дані підтверджені результатами, наведеними

в статті [13], в якій відмічено, що повітроутягування при збільшенні витрат цементу у діапазоні від 300 до 400 кг/м³ збільшується. У цих бетонах також при збільшенні повітроутягування спостерігається зниження міцності. Для бетонів на цементі ПЦ II/A-III-400 (табл. 3) міцність при згині знижується на 8,5 % (перехід від 3,8 до 5,4 % залученого повітря) і на 5 % (від 5,4 до 7,6 % повітря) у віці 7 діб і на 4 і 3 % у віці 28 діб, відповідно. Міцність при стиску при тих же збільшеннях кількості повітря знижується на 16,5 і 22,5 % у віці 7 діб і на 12 і 28 % у віці 28 діб.

Таблиця 3 – Вплив кількості залученого повітря на міцність бетонів на цементі ПЦ II/A-III-400

| Кількість добавки Sika Mix Plus, % від m_c | Кількість залученого повітря, % | $R_{зг}$, МПа | | $R_{ст}$, МПа | | $K_{деф}$, 28 діб., ($R_{ст}/R_{зг}$) | |
|--|---------------------------------|----------------|---------|----------------|---------|--|---------|
| | | 7 доба | 28 доба | 7 доба | 28 доба | 7 доба | 28 доба |
| - | 3,8 | 6,4 | 7,4 | 32,4 | 36,6 | 5,06 | 4,95 |
| 0,1 | 5,4 | 5,9 | 7,1 | 27,8 | 32,6 | 4,71 | 4,59 |
| 0,2 | 7,6 | 5,6 | 6,9 | 22,7 | 25,5 | 4,05 | 4,25 |

Таблиця 4 – Вплив кількості залученого повітря на міцність бетонів на цементі ПЦ II Б/Ш – 400

| Кількість добавки Sika Mix Plus, % від m_c | Кількість залученого повітря, % | $R_{зг}$, МПа | | $R_{ст}$ МПа | | $K_{деф}$, 28 діб., ($R_{ст}/R_{зг}$) | |
|--|---------------------------------|----------------|---------|--------------|---------|--|---------|
| | | 7 доба | 28 доба | 7 доба | 28 доба | 7 доба | 28 доба |
| - | 3,0 | 6,3 | 7,2 | 30,8 | 34,9 | 4,89 | 4,85 |
| 0,1 | 4,8 | 6,1 | 6,8 | 27,5 | 32,6 | 4,51 | 4,79 |
| 0,2 | 7,0 | 5,8 | 6,0 | 23,4 | 26,3 | 4,03 | 4,38 |

У бетонах на цементі ПЦ II/Б-Ш-400 (табл. 4) збільшення повітроутягування також приводить до зниження міцності: при згині – на 3 і 5 % у віці 7 діб і на 6 і 13 % у віці 28 діб; при стиску – на 12 і 17,5 % у віці 7 діб і на 7 і 24 % у віці 28 діб. Відмінною особливістю бетонів на цементах марки 400 є те, що їх структура більш однорідна, про що свідчить суттєве зниження коефіцієнта дефектності. Він зменшується на 20...25 % у порівнянні з бетонами на цементах марки 500. Це можна пояснити тим, що питома поверхня цементу марки 400 на 10...15 % менше, ніж цементів марки 500, тобто їх дисперсність менше. Швидкість реакцій з водою у грубодисперсних частинок менша, ніж у тонкодисперсних, структура цементного каменю формується більш повільно і більш впорядковано.

Якщо зіставити ступінь зниження міцності бетонів при переході від цементів марки 500 до цементів марки 400, то можна помітити, що для бетонів, в яких міститься приблизно порівнянна кількість повітря, міцність при згині знижується не більше, ніж на 10 %, а при стиску – до 40 %. Тобто при зниженні марки (активності) цементів істотне зменшення міцності при стиску можна пояснити поризацією макро- і мезоструктур бетону (збільшення кількості дефектів за рахунок повітряних бульбашок). У той же час, якість зони контакту «цементний камінь-заповнювач» і мікроструктури бетону (самого цементного каменю в об'ємі) залишається високим, про що свідчить незначне зниження міцності при згині. Виявлену нами закономірність підтверджують дослідження, наведені в [14, 15]. У них зазначено, що капілярні пори в цементному камені надають більший негативний вплив на міцність, ніж повітряні пори в структурі бетону і розчину.

Висновки.

1. Встановлено, що збільшення вмісту в бетонній суміші залученого повітря приводить до значно більшого зниження міцності при стиску, ніж міцності при згині.
2. Показано, що зростання повітроутягування викликає зниження коефіцієнта

дефектності структури бетону, що незважаючи на поризацію, свідчить про підвищення ізотропності бетону.

3. Встановлено, що в бетонах на шлаковмісних цементах зниження міцності зі збільшенням кількості залученого повітря виражено в меншій мірі, ніж в бетонах на чистоклінкерних цементах.

4. При збільшенні кількості залученого повітря в бетонній суміші міцність бетонів виготовлених на цементі марки М500 знижується більш значно, ніж в бетонах на цементі марки М400.

Література

1. Грушко И.М. Влияние пылевидных фракций песка на поровую структуру бетона / И.М. Грушко, И.Г. Кондратьева, С.Н. Толмачев // Строительные материалы и конструкции, 1989. – № 3. – С. 37 – 38.

2. Добшиц Л.М. Морозостойкость бетонов транспортных сооружений / Л.М. Добшиц, И.Г. Портнов, В.И. Соломатов. – М.: МИИТ, 1999. – 236 с.

3. Шейкин А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.

4. Штарк И. Долговечность бетона / И. Штарк, Б. Вихт. – Киев: Оранта, 2004. – 301 с.

5. Toshio H. Influence of curing conditions on the compressive strength and the modulus of elasticity of concrete, especially in case of drying / H. Toshio // Cem. Accos. Jap. Rev. 13th Gen. Meet. Techn. Sess. – Tokyo, 1976. – P. 190 – 192.

6. Jeffrey J. Thomas Changes in the size of pores during shrinkage (or expansion) of cement paste and concrete / Jeffrey J. Thomas, Hamlin M. Jennings // Cement and Concrete Research. – 2003. – № 33. – P. 1897 – 1900.

7. Толмачев С.Н. Снижение прочности бетона при введении воздухововлекающих добавок в бетонную смесь / С.Н. Толмачев, А.В. Бражник // Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение: сб. тр. III Всерос. науч.-практич. конф., 3 – 4 марта 2014 г. / Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Амосова, 2014. – С. 369 – 373.

8. Толмачев С.Н. Влияние вовлеченного воздуха на свойства дорожных бетонов и фибробетонов / С.Н. Толмачев, Е.А. Беличенко // Строительные материалы, 2017. – № 1 – 2. – С. 68 – 72.

9. Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань: ДСТУ Б В.2.7-114-2002, – [Чинний від 2002-07-01], – К.: Державний комітет архітектури, будівництва і житлової політики України, 2002. – 32 с. (Національний стандарт України).

10. EN 206-1. Бетон. Общие технические требования, производство и контроль качества. Часть 1. Брюссель, 2000. – 69 с.

11. Автомобільні дороги. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. ДБН Б В.2.3-4-2015. [Чинний від 01-04-2016]. – К: Мінрегіонбуд України, 2015. – 91 с. (Державні будівельні норми України).

12. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия: ГОСТ 26633-2012. [Введен 01-01-2015]. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 18 с. (Государственный стандарт).

13. Хозин В.Г. Особенности формирования структуры модифицированных песчаных бетонов / В.Г. Хозин, Н.М. Морозов, Х.Г. Мугинов // Строительные материалы, 2010. – № 9. – С. 72 – 73.

14. Зоткин А.Г. Воздушные поры и контроль уплотнения бетона / А.Г. Зоткин // Технологии бетонов, 2016. – № 7 – 8. – С. 24 – 29.

15. Зоткин А.Г. Бетон и бетонные конструкции / А.Г. Зоткин. – М.: АСВ, 2016. – 328 с.

Стаття надійшла 16.08.2017