

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ТА ВНУТРІШНІ НАПРУЖЕННЯ В МОНОЛІТНОМУ ЦЕМЕНТОБЕТОНІ, ЩО ТВЕРДІЄ

STRUCTURE FORMATION AND INTERNAL STRESSES IN HARDENING MONOLITHIC CEMENT CONCRETE

Толмачов Д.С., к.т.н., докторант (Харківський національний університет міського господарства), Толмачов С.М., д.т.н., проф. (Харківський національний автомобільно-дорожній університет)

Tolmachov D.S., Ph.D., doctoral student (Kharkiv National University of Urban Economy), Tolmachov S.M. Doctor of technical sciences, Professor (Kharkiv National Automobile and Highway University)

У статті розглянуто питання впливу внутрішніх та зовнішніх факторів на властивості монолітних дорожніх цементобетонів. Показано, що основну небезпеку для бетону становить тріщиноутворення. На ранніх стадіях твердіння воно залежить від градієнта температур і величин усадки, а в період експлуатації бетону дорожніх покриттів – від величини внутрішніх напруг. У статті показано, що особливості структуриутворення в період твердіння визначають тріщиностійкість бетону та пов'язані з величиною внутрішніх напруг у бетоні. Визначено критичний градієнт температур, при якому може утворитися тріщина та тривалість цього періоду. Проведено прямі вимірювання величини внутрішньої напруги в бетоні на проязі 28 діб.

The article discusses the influence of internal and external factors on the physical and mechanical characteristics of monolithic road cement concrete. It has been shown that the main danger for hardening and operating concrete is cracking. Crack formation can be caused by thermal stresses or deformations caused by shrinkage of concrete during hardening. The main danger for hardening concrete in the initial period is the increased water content in the concrete composition. Evaporation of moisture from hardening concrete leads to shrinkage deformations of the concrete and subsequent cracking. Therefore, to reduce moisture loss from hardening concrete, it is necessary to carry out operations to care for hardening concrete, for example, using film-forming materials. It is shown that in all cases, cracking is caused by internal stresses in concrete. In the early stages of hardening, cracking depends on the temperature gradient and the magnitude of shrinkage deformations, and during the period of operation of concrete road surfaces - on the magnitude of internal stresses. It is shown that the features of structure formation during the hardening period determine the crack resistance of concrete and are associated with the magnitude of internal stresses in concrete. It is shown that under certain conditions, and in the case of cracking, self-organization of the system, which is monolithic cement concrete, is possible. This leads to self-healing of formed cracks and increased durability of road concrete. This is especially important during the initial period of

hardening of monolithic cement concrete, during the period of possible formation of shrinkage or thermal cracks. In the future, during the operation of road surfaces, the ongoing adaptation of the structure to the effects of the external environment can improve the durability of concrete. The work determines the critical temperature gradient at which a crack can form and the duration of this period. Direct measurements of the magnitude of internal stresses in concrete were carried out during 28 days of hardening. The main features of the mutual relationship between the processes of structure formation and internal stresses in concrete are considered.

Ключові слова: монолітний дорожній цементний бетон, усадка, випаровування вологи, тріщиноутворення, внутрішні напруги, структура, структуроутворення, самоорганізація, адаптація.

Keywords: monolithic road cement concrete, shrinkage, moisture evaporation, cracking, internal stresses, structure, structure formation, self-organization, adaptation.

Вступ. Значна кількість вантажоперевезень у світі здійснюється автотранспортом і вона постійно зростає. Найбільш ефективним матеріалом покриття за інтенсивних перевезень при великих навантаженнях на вісь автомобіля є цементобетон. При виготовленні монолітного цементобетонного покриття вже в початковий період твердіння в бетоні виникають внутрішні напруги усадкового та термічного характеру. На дорожнє покриття постійно діють циклічні механічні навантаження від транспорту, а також циклічна дія вологи та температури. Це призводить до того, що цементобетон покриття постійно перебуває у складному напруженому стані. У такому стані можуть виникати тріщини, які можуть призвести до його руйнування. До негативних сторін твердіння монолітних бетонів в умовах підвищених температур внаслідок температурного впливу відносяться: поява та накопичення внутрішніх напруг, утворення мікротріщин, здатних зростати і розвиватися в магістральні тріщини, лущення, поява шаруватості в масиві бетону та ін. Особливу небезпеку становить усадка, тобто, зменшення лінійних розмірів виробу внаслідок внутрішніх та зовнішніх факторів.

Наприклад, поява волосяних тріщин здійснюється на поверхні цементобетону покриття на першому етапі твердіння (1...3 діб) і надалі веде до утворення ослаблених зон, у яких починається руйнація бетону. Воно відбувається пошарово з поверхні углиб бетону. У разі інтенсивного випаровування вологи в ранній термін твердіння бетону його поверхневий шар розпушується, послаблюється зв'язок з основним масивом. Надалі дія стираючих навантажень від транспорту призводить до пошарового зносу.

Ще однією причиною тріщиноутворення є градієнт температур, який виникає між поверхнею та внутрішнім шаром цементобетону і він також веде до внутрішньої напруги. Тому необхідно дослідити причини виникнення внутрішньої напруги і можливого тріщиноутворення, особливо в початковий період твердіння цементного бетону покриття.

Аналіз останніх досліджень. Відомо, що зайва кількість води веде до появи усадкових тріщин, які виникають через випаровування вологи та ведуть до різкого погіршення міцності та довговічності монолітного цементного бетону дорожніх конструкцій. Тому, в будь-якому випадку необхідно забезпечити відповідний догляд за бетоном, що твердіє. Якщо його не проводити, то при твердінні з бетону випаровується велика кількість води і відбувається внутрішнє та поверхневе тріщиноутворення та подальше лущення бетону. У технології дорожніх та аеродромних бетонів для цього застосовують плівкоутворювальні матеріали, які формують на поверхні бетону конструкції непроникну плівку. Плівка перешкоджає інтенсивному випаровуванню вологи в перший період твердіння бетону, тим самим захищаючи його від тріщиноутворення.

Особливу небезпеку для масивних конструкцій становлять термічні тріщини. Вони виникають у конструкціях через локальне підвищення температури при тепловиділенні цементу, що твердіє. Також вони можуть виявлятися через градієнт температури між внутрішньою і поверхневою частинами бетону, особливо в період експлуатації.

Не можна також забувати утворення структурних дефектів, які можуть виникати у конструкціях під час їх виготовлення. В цілому, до основних видів дефектів, що виникають у монолітному цементному бетоні конструкцій, можна віднести: поодинокі силові тріщини; групові силові тріщини; температурно-усадкові тріщини; відколи кромок бетонних плит; відшарування поверхневого захисного шару; раковини та каверни у структурі та на поверхні.

Аналіз стану бетонних виробів та покриттів автомобільних доріг показує, що будь-яке порушення процесу нормального твердіння бетону призводить до виникнення на його поверхні сітки тріщин, що в подальшому призводить до руйнування. Можна вважати встановленим фактом, що тріщини на поверхні дорожнього бетону виникають: при усадці бетону при твердінні, наявності градієнта температур між поверхнею і внутрішньою частиною бетону і циклічною дією механічних навантажень [1,2].

Серед наведених факторів основною причиною руйнування бетону є тріщиноутворення. Причому, дія зовнішніх навантажень призводить до того, що дрібні тріщини, пори та інші мікрodefekти, що знаходяться в структурі бетону, накопичуються і, поступово переростаючи у більші тріщини, утворюють блокову структуру, яка досить легко руйнується.

Дослідження [3] показали, що існує досить точна кореляція між випаровуванням вологи з бетону і його усадкою. На інтенсивність випаровування, і, відповідно, величину усадки, впливають наявність добавок, гранулометрія заповнювачів, співвідношення між ними, витрата в'язучого, умови твердіння [4].

І.М. Грушко показав, що оскільки на кожному етапі твердіння існують два фактори – структуроутворюючий та деструктивний, то бетон навіть без

зовнішнього навантаження знаходиться у нерівноважному внутрішньо-напруженому стані [5].

У працях Ю.В. Зайцева показано, що у бетоні тріщини можуть розвиватися у будь-якій зоні, як у цементному камені, так і у зонах контакту, і навіть у заповнювачі. Вони проникають з більш жорсткої частини матеріалу у менш жорстку, а умовою руйнування бетону є утворення однієї або декількох магістральних, тобто., наскрізних тріщин.

На нашу думку, у зв'язку з тим, що тріщиностійкість бетону може змінюватися з часом, у кожному конкретному випадку для боротьби з тріщиноутворенням необхідно застосовувати первинний або вторинний захист бетону, що твердіє або експлуатується [6,7].

Ряд досліджень показав, що при утворенні та подальшому розвитку таких тріщин від усадки та контракції деформації розтягування зростають, що призводить до збільшення ширини розкриття тріщин [8-11]. При розвитку повітряної усадки виділяють три етапи тріщиноутворення. Перший – від 1,25 до 2,5 діб – етап наростання кількості ушкоджень. Кількість пошкоджень сягає 1,5% площі. Другий етап – від 2,5 до 5 діб, коли деформації менші і кількість ушкоджень збільшується незначно (до 2,5 %). При цьому в роботах [10-11] це пов'язують із можливою релаксацією усадкових напруг у цей період. Третій етап – етап інтенсивного розвитку деформацій (понад 5 діб), коли кількість ушкоджень різко зростає до 5%.

Проте автори вважають, що контроль внутрішньої напруги від усадки за допомогою приладів навряд чи можливий.

В.Н.Вировой із співробітниками пропонує розглядати бетонні конструкції, до яких відносять і покриття, як відкриту складну динамічну систему (ВСДС) [12-13]. ВСДС утворюється у період підбору складу бетону, виготовлення та укладання суміші та подальшого твердіння цементобетону. У свою чергу вона складається з підсистем, які при різних впливах здатні проявляти самоорганізацію (структурну перебудову), що призводить до проявів адаптації. Адаптація проявляється у вигляді зміни кількісного та якісного складу підсистем. У цьому відбувається внутрішня структурна перебудова (приспосовування) під впливом дії комплексу зовнішніх впливів [14]. Одним із позитивних моментів самоорганізації є здатність до самовідновлення зруйнованої підсистеми.

Наприклад, це може виражатися у здатності зарощувати тріщини як усередині, так і на поверхні цементобетонної конструкції. Це може проявлятися як у початковий період твердіння монолітного бетону, так і у період його експлуатації. При цьому внутрішні напруги в структурі зменшуються, а бетон підвищує свою довговічність. Можна сказати, що з циклічністю впливів релаксація напруг також відбувається циклічно.

М.А.Саницький, проводячи аналіз швидкостей реакцій гідратації мінералів, показав, що можливе прискорення процесів гідратації за певних умов [15]. Розчинення кристалів мономінералів переважно відбувається на

певних ділянках поверхні, які характеризуються надмірною поверхневою енергією. Це ділянки на реакційноздатних центрах, що включають дефекти, дислокації та грані зерен. При цьому, аліт та алюмінат є найбільш реакційноздатними фазами, особливо в першу добу твердіння. Це створює реальні можливості для саморемонту дефектів структури та її самовідновлення.

Відносно термічної напруги, то дослідження показали, що найбільш небезпечним для монолітного цементного бетону є початковий період твердіння, коли напруги в ньому максимальні. Аналіз термонапруженого стану цементобетону в початкові терміни твердіння показав, що найбільш небезпечним для термічного тріщиноутворення є період твердіння від 10 до 17 годин, коли проявляється максимум градієнта температур на поверхні та в масиві бетону [16-17].

Наведені дані показують, що для монолітного бетону, в першу чергу дорожнього та аеродромного, який постійно перебуває у стані внутрішньої напруги, існує небезпека тріщиноутворення, як у початковий період твердіння, так і надалі. При цьому важливим є визначення та контроль самих внутрішніх напружень та наслідків їх впливу.

Мета роботи – аналіз внутрішньої напруги цементного бетону при твердінні.

Завдання досліджень. 1. Дослідити причини виникнення внутрішніх напруг у монолітному дорожньому цементобетоні.

2. Здійснити вимірювання внутрішніх напруг у бетоні, що твердіє.

3. Порівняти характер напруг із процесами структуроутворення.

Методика досліджень. Внутрішню напругу в піщаному цементному бетоні складу Ц:П = 1:3 вимірювали за допомогою п'єзокристаличного датчика, приєднаного до мілівольметра. Міцність бетону вимірювали на зразках-балочках розмірами 40x40x160 мм.

Результати досліджень. Проведені нами дослідження показали, що найбільш небезпечним періодом для монолітного дорожнього бетону, що твердіє, є початковий період [18]. Розрахунковим шляхом було встановлено, що критичний градієнт температур, при якому можливе утворення термічних тріщин на поверхні дорожнього бетону при товщині плити 26 см, дорівнює 26.3°C. Небезпека термічного тріщиноутворення зберігається як під час твердіння, так і при експлуатації протягом 8.3 години. Аналогічні дані отримано у роботі [16].

Зазвичай для вимірювання внутрішніх напруг використовували накладні тензодатчики, які дозволяли оцінити не напруги, а деформації зразка бетону цементного при впливі на нього зовнішнього навантаження. Фактично це дозволяло опосередковано визначити деформативність цементних бетонів при механічних навантаженнях. Тому для прямого вимірювання виникаючих у цементних бетонах внутрішніх напруг використовували п'єзокристаличні датчики, які занурювали в бетонну суміш

при формуванні зразків. Провід від цих датчиків підключали до мілівольметра. При тепло- і масообмінних явищах у цементному бетоні, що твердіє, відбувається рух потоків, які згинають пластини датчиків. При цьому генерується ЕРС, величина якої може бути виміряна (рис.1).

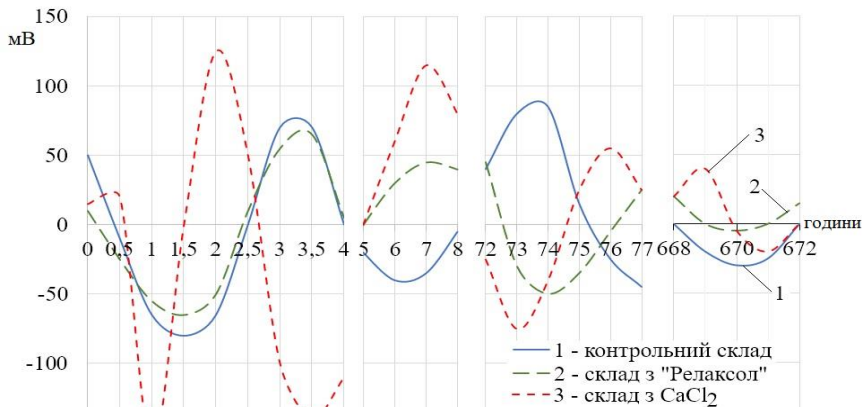


Рисунок 1 – Зміна внутрішніх напруг у бетоні, що твердіє

Такий спосіб вимірювання дозволяє кількісно оцінити величину внутрішніх напруг. Дослідження показали, що напрями масообмінних потоків з часом змінюються. При цьому змінюється знак заряду генерованої ЕРС. Це може свідчити про те, що крім руху вологи з глибини бетону до поверхні (масообмінні процеси) у цементних бетонах відбуваються інші явища, які також призводять до появи внутрішніх напруг. Якщо прийняти, що спочатку переважає розчинення і створюється пересичення (знак ЕРС негативний), далі починається схоплювання цементного тіста, яке супроводжується створенням стиснених умов і виникненням внутрішньої напруги, тиск від якого створює ЕРС протилежного знака. Причому характер кривих складу без добавок та складу із суперпластифікатором «Релаксол» однаковий. У той же час, крива складу з прискорювачем CaCl₂ зміщена до початку, що свідчить про швидше проходження процесів розчинення та пересичення. Крім того, амплітуда кривої складу з CaCl₂ значно більша, ніж інших складів, що кількісно підтверджує відомі висловлювання про те, що введення прискорювачів схоплювання і твердіння призводить до значної внутрішньої напруги в бетоні.

Значна внутрішня напруга виникає в бетоні до 3 годин і до 6 годин твердіння. Це відповідає періоду завершення схоплювання. І знову, найбільша амплітуда (за яку вважатимуться аналогічної величині напруги) відзначена кривою складу з прискорювачем (крива 3). У цей період

структура бетону дуже слабка і в ній можливе тріщиноутворення, викликане внутрішньою або повітряною усадкою.

До 3 діб твердіння, коли основні процеси структуроутворення та масопереносу завершені, величина внутрішніх напруг та амплітуда значно знижується та вирівнюється для всіх складів бетону. До цього часу міцність бетону може досягати 50-60% від марочної, що дозволяє структурі бетону релаксувати внутрішні напруги. У цей період усадкове тріщиноутворення малоімовірне. Ще більше знижуються внутрішні напруги до 28 діб твердіння, проте вони продовжують виникати.

Висновки. На основі аналізу літературних даних встановлені основні причини внутрішніх напруг і тріщиноутворення у монолітних дорожніх цементних бетонах, що твердіють. За допомогою п'єзокристалічних датчиків проведено пряме кількісне вимірювання внутрішньої напруги при твердінні цементних бетонів. Розрахунковим шляхом встановлено критичну величину градієнта температур, яка може призвести до термічного тріщиноутворення. Запропоновано інтерпретацію взаємозв'язку між величиною внутрішніх напружень і процесами структуроутворення.

References

1. Tsilosani Z.N. Usadka i polzuchest betona / Z.N.Tsilosani – Tbilisi: Mitsniereba. – 1979. – 188 s.
2. Semenov K.V. Termicheskay treshinostoykost v massivnih betonnih fundamentnih plitah i ii obespetenie v stroitelniy period zimoy / K.V.Semenov, U.G. Barabanchikov // Stroitelstvo unikalnih zdaniy i sooruzeniy. – 2014. – № 2. – s. 125 – 135.
3. Tolmachov D.S. Vliyanie usadki na strukturu i svoystva rastvorov / D.S. Tolmachov // Stroitelnye materialy. – 2013. – № 10. – С. 62 – 65
4. Lermi R. Problemi tehnologii betona / R. Lermi. – М.: LKI. – 2007. – 296 с.
5. Grushko I.M. Povishenie protnosti I vinoslivosty betona / I.M. Grushko., A.G.Ilyin, E.D.Tchihladze // Kharkov : Visha Shkola, 1987.- 152 s.
6. Zmina thishinostiykosty doroznyogo betony v expluataziynoi stadii / S.Y.Solodkiy, S.M. Tolmachov // Visnik ODABA, Odesa «Zovnishreclamservis», 2014. – Вип. 55. – s. 230 – 235.
7. Tolmachov S.N. Various stages of protection of concrete roads / S.N. Tolmachev, O.A. Belichenko & H.V. Brazhnyk // Proceedings of Concrete Solutions, 6-th International conference on concrete repair, Thessaloniki, Greece, 20 – 23 june 2016 // Taylor & Francis Group, London (UK), 2016 – P. 99 – 103.
8. Mauroux T. Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation / T. Mauroux, F. Benboudjema, P. Turcry, A. Ant-Mokhtar, O. Deves // Cement and Concrete Research. – 2012. – № 42 (2012). – P. 1014 – 1023.

9. Laurence O. La fissuration due au retrait restreint dans les ruperations minces en buton: apport combinu de l'expurimentation et de la modulisation / O. Laurence // PhD Thesis, ENPC-Laval University, 2001. – P. 235 – 246.
10. Colina H. Drying cracks: kinematics and scale laws / H. Colina, P. Acker // Mater. Struct. – 2000. – № 33 (2000). – P. 101 – 107.
11. De Sa C. Analysis of microcracking induced by differential drying shrinkage / C. De Sa, F. Benboudjema, M. Thiery, J. Sicard // Cem. Concr. Compos. – 2008. – № 30 (2008). – P. 947 – 956.
12. Suhanov V.G. Struktura materialu u structurі konstrukzii / V.G. Suhanov, V.M.Virovoy, O.O.Korobko // Odesa : ODABA, 2022.- 412 c.
13. Virovoy V. Структуроутворення та руйнування будівельних композитів / V.Virovoy, O.Korobko, V.Suhanov, N.Kazmirtuk, S.Makarova // Odesa : ODABA, 2020.- 172 c.
14. Chernnavsky V.L. Adaptazia abioticheskikh system: beton i zelezobeton / V.L.Chernnavsky // Dnepropetrovsk : DNUZT, 2008.- 412 c.
15. Sanytsky M. Mechanisms of cement minerals dissolution / M. Sanytsky // 19 Internationale Baustofftagung, Deutschland: Tagungsbericht. - Weimar, 2015. - Band 1. - P. 1-607 – 1-614.
16. Solodkiy S.I. Ozinuvanniy termonapruzivannogo stanu doroznih pocrittiv na rannih stadiyah tverdnenniy cementnogo betonu / S.I.Solodkiy, R.Y.Livsha // Avtoshlahovic Ukrainy. – 2015. – № 1 – 2. – С. 71 – 74.
17. Sopov V.P. Raschet temperaturnih poley v betone / V.P.Sopov, E.V.Poclonskiy, I.M. Belih // Kharkiv. – HOTB ABU. – 2009. – № 54. – С. 374 – 378.
18. Tolmachov D.S. Розрахунок імовірності утворення температурних тріщин у монолітних дорожніх бетонах / D.S. Tolmachov, V.P.Sopov, S.M.Tolmachov // Вісник ODABA, Odesa «Zovnishreclamservis», 2017. – 66. – s. 113 – 117.

Література

1. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона / З.Н. Цилосани. – Тбилиси: Мецниереба. – 1979. – 188 с.
2. Семенов К.В. Термическая трещиностойкость в массивных бетонных фундаментных плит и ее обеспечение в строительный период зимой / К.В. Семенов, Ю.Г. Барабанщиков // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 2. – С. 125 – 135.
3. Толмачев Д.С. Влияние усадки на структуру и свойства растворов / Д.С. Толмачев // Строительные материалы. – 2013. – № 10. – С. 62 – 65
4. Лермит Р. Проблемы технологии бетона / Р. Лермит. – М.: Изд-во ЛКИ. – 2007. – 296 с.
5. Грушко И.М. Повышение прочности и выносливости бетона / И.М.Грушко, А.Г.Ильин, Э.Д.Чихладзе // Харьков : Вища школа, 1987.- 152 с.

6. Солодкий С.Й. Зміна тріщиностійкості дорожнього бетону в експлуатаційній стадії / С.Й. Солодкий, С.М. Толмачов // Вісник ОДАБА, Одеса «Зовнішпрекламсервіс», 2014. – Вип. 55. – С. 230 – 235.
7. Tolmachev S.N. Various stages of protection of concrete roads / S.N. Tolmachev, O.A. Belichenko & H.V. Brazhnyk // Proceedings of Concrete Solutions, 6-th International conference on concrete repair, Thessaloniki, Greece, 20 – 23 June 2016 // Taylor & Francis Group, London (UK), 2016 – P. 99 – 103.
8. Mauroux T. Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation / T. Mauroux, F. Benboudjema, P. Turcry, A. Апт-Mokhtar, O. Deves // Cement and Concrete Research. – 2012. – № 42 (2012). – P. 1014 – 1023.
9. Laurence O. La fissuration due au retrait restreint dans les ruperations minces en buton: apport combinu de l'expurimentation et de la modulisation / O. Laurence // PhD Thesis, ENPC-Laval University, 2001. – P. 235 – 246.
10. Colina H. Drying cracks: kinematics and scale laws / H. Colina, P. Acker // Mater. Struct. – 2000. – № 33 (2000). – P. 101 – 107.
11. De Sa C. Analysis of microcracking induced by differential drying shrinkage / C. De Sa, F. Benboudjema, M. Thiery, J. Sicard // Cem. Concr. Compos. – 2008. – № 30 (2008). – P. 947 – 956.
12. Суханов В.Г. Структура матеріалу у структурі конструкції / В.Г.Суханов, В.М.Вировой, О.О.Коробко // Одеса : ОДАБА, 2022.- 412 с.
13. Вировой В. Структуроутворення та руйнування будівельних композитів / В.Вировой, О.Коробко, В.Суханов, Н.Казмірчук, С.Макарова // Одеса : ОДАБА, 2020.- 172 с.
14. Чернявский В.Л. Адаптация абиотических систем : бетон и железобетон / В.Л.Чернявский // Днепрпетровск : ДНУЖТ, 2008.- 412 с.
15. Sanytsky M. Mechanisms of cement minerals dissolution / M. Sanytsky // 19 Internationale Baustofftagung, Deutschland: Tagungsbericht. - Weimar, 2015. - Band 1. - P. 1-607 – 1-614.
16. Солодкий С.Й. Оцінювання термонапруженого стану дорожніх покриттів на ранніх стадіях тверднення цементного бетону / С.Й. Солодкий, Р.Я. Лівша // Автошляховик України. – 2015. – № 1 – 2. – С. 71 – 74.
17. Сопов В.П. Расчет температурных полей в бетоне / В.П. Сопов, Е.В. Поклонский, И.М. Белых // Харків. – ХОТВ АБУ. – 2009. – № 54. – С. 374 – 378.
18. Толмачов Д.С. Розрахунок імовірності утворення температурних тріщин у монолітних дорожніх бетонах / Д.С. Толмачов, В.П. Сопов, С.М. Толмачов // Вісник ОДАБА, Одеса «Зовнішпрекламсервіс», 2017. – 66. – С. 113 – 117.