

## НАПРУЖЕННЯ УСАДКИ В ЦЕМЕНТОБЕТОННИХ ТА ІНШИХ ЦЕМЕНТОВМІСНИХ ШАРАХ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ ПРИ ТУЖАВІННІ ТА ТВЕРДІННІ

### CONTRACTION STRESS IN CEMENT-CONCRETE AND OTHER CEMENTED LAYERS OF ROAD CLOTHING FOR SETTING AND HARDENING



**Онищенко Артур Миколайович**, доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри мостів та тунелів, e-mail: [artur\\_onish@bigmir.net](mailto:artur_onish@bigmir.net), +380687771899,

<https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>.



**Лапченко Артем Сергійович**, кандидат технічних наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет доцент кафедри будівництва та експлуатації автомобільних доріг, +38 057707-37-80,

<https://orcid.org/0000-0003-4037-5395>.



**Чиженко Наталія Петрівна**, Національний транспортний університет, старший викладач кафедри мостів та тунелів, e-mail: [chyzhenko\\_np@ukr.net](mailto:chyzhenko_np@ukr.net), +380507355080,

<https://orcid.org/0000-0002-9152-2474>.

**Анотація.** Стаття присвячена напруженням усадки, що виникають в цементобетонному або іншому цементовмісному шарі дорожнього одягу з кристалізаційною структурою при тужавінні та твердінні. Наведено основні причини утворення тріщин в цементовмісних матеріалах. На основі теоретичного рішення виведено математичну залежність, яка моделює та дає можливість оцінити розподіл напружень усадки, що виникають в цементобетонному або іншому цементовмісному шарі дорожнього одягу при тужавінні та твердінні. Теоретичне рішення базується на теорії пружності і враховує наступні параметри: масообмін (водяний пар, рідка фаза води), який формується під впливом втрат вологи на межах шару і викликає нерівномірний розподіл вологості по товщині шару; коефіцієнт вологопровідності, модуль пружності, коефіцієнт усадки, які відображають структуру і характеристики матеріалу; а також час догляду і міру жолоблення. Математична залежність дозволяє визначити напруження від усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу у випадках із можливістю короблення та без. Отримане рішення дозволить уточнити розрахунки довговічності цементобетонного або іншого цементовмісного шару дорожнього одягу з кристалізаційною структурою.

**Ключові слова:** вологопровідність, дорожній одяг, коефіцієнт усадки, масообмін, міра жолоблення, напруження усадки, теоретичне рішення, цементовмісний шар.

**Вступ.** За останніми даними Міністерства Інфраструктури України на долю доріг загального користування з цементобетону припадає менш ніж 3 % від загальної кількості доріг, що кількісно становить 2900 км [1]. Не зважаючи на малу протяжність цементобетонних доріг нинішнім «трендом» стає прихильність саме до такого типу покриття, що особливо актуально для південних регіонів нашої держави. Крім цементобетону в покритті і шарах дорожнього одягу використовуються інші матеріали з кристалізаційною структурою [2-7]: щебеневі, щебенєво-піщані, гравійно-піщані (і навпаки) матеріали, що укріплені неорганічними в'язучими, пісні бетони та інші. Маючи ряд техніко-економічних переваг, шари з цементобетону та інших цементовмісних матеріалів кристалізаційної структури в наслідок підвищеної жорсткості схильні до тріщиноутворення, що знижує їх міцність і довговічність вцілому.

**Мета і методи.** Тріщини в цементовмісних матеріалах можуть виникати через різні фактори [2, 4, 8-16]: різниця коефіцієнтів лінійного термічного розширення; тепловиділення цементу; внутрішні напруження в структурі цементного каменя чи в зоні контакту «цементний камінь – заповнювач»; не належний догляд за влаштованим шаром; постійний тепло і масообмін (водяний пар, рідка фаза води), що викликає нерівномірний розподіл температури і вологості по товщині; усадка під дією фізико-хімічних процесів при твердінні цементного каменя; деформації від транспортних навантажень.

Для розрахунку цементобетонних шарів дорожнього одягу на тріщиностійкість або як записано в ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Дорожній одяг жорсткий» [17] – «6.1.3 Розрахунок монолітного цементобетонного покриття», необхідно знати величину напружень від дії вище перерахованих факторів. Визначити напруження в цементобетонних шарах від транспортних навантажень і перепаду температур можна за ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Дорожній одяг жорсткий» [17], при цьому розрахунок напружень від усадки в момент тужавіння та твердіння не враховується взагалі, що може свідчити про відсутність такого розрахунку. Однак, як показує практика дуже часто напруження від усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу з кристалізаційною структурою досягають величини напруження від дії транспорту і перепаду температур. Саме тому виникла потреба у визначенні напружень в цементовмісних матеріалах з кристалізаційною структурою на стадії тужавіння до досягнення «традиційних» 28 діб.

**Результати і пояснення.** Для детального процесу дослідження усадки цементовмісних матеріалів з кристалізаційною структурою величину усадки ділять на частину, що обумовлена випаровуванням вологи і частину обумовлену процесами твердіння [14, 16]. Для спрощення розрахунків об'єднаємо ці процеси в один.

При нерівномірному розподілі вологи  $W(z, t)$  по товщині  $h$  цементовмісного матеріалу з кристалізаційною структурою в ньому виникають пружні напруження  $\sigma_w(z, W)$ , що описуються формулою:

$$\sigma_w(z, W) = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot \left[ W(z, t) - \frac{1}{h} \cdot \int_0^h W(z, t) dz - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left(\frac{h}{2} - z\right)}{h^3} \cdot \int_0^h W(z, t) \cdot \left(\frac{h}{2} - z\right) dz \right] \quad (1)$$

де,  $\sigma_w(z, W)$  – пружні напруження, МПа;

$z$  – поточна координата по товщині шару, м;

$t$  – час догляду, год;

$h$  – товщина шару, м;

$C_x$  – коефіцієнт міри жолоблення;

$\alpha$  – коефіцієнт усадки, який характеризує зменшення лінійного розміру зразка при видаленні з нього 1 % вологи;

$E$  – модуль пружності, МПа;

$\mu$  – коефіцієнт Пуассона;

$W(z, t)$  – функція розподілу вологи по товщині шару цементобетону.

Формула (1.1) аналогічна формулі акад. С. П. Тимошенко [18] для визначення температурних напруг в бетонних покриттях, тільки замість розрахункової функції розподілення температури по товщині покриття або шару дорожнього одягу використовується функція розподілу вологи.

Поле вологості цементобетонного або іншого цементовмісного шару дорожнього одягу з кристалізаційною структурою формується під дією випаровування води за рахунок температури і вітру,

фізико-хімічних процесів гідратації і гідролізу води з цементом, а також можливою втратою води з цементобетонної суміші через нижче розташований шар або ґрунт земляного полотна [9]:

$$W(z,t) = \frac{z \cdot t \cdot (m - m_1)}{h} - m \cdot t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2h^2}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ [m - m_1 \cdot (-1)^n] \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right] \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} \right\} + W_{II} \quad (2)$$

де:  $m$  – коефіцієнт інтенсивності зміни вологи на верхній поверхні шару цементобетону від температури та швидкості вітру, %/год;

$m_1$  – коефіцієнт інтенсивності зміни вологи на нижній поверхні шару цементобетону, %/год;

$a_1$  – коефіцієнт вологопровідності, м<sup>2</sup>/год;

$W_{II}$  – початкова вологість, %.

Для виразу (2) граничними умовами слугують наступні рівняння:

$$W(z,0) = W_{II} = \text{const}; W(0,t) = W_{II} - m \cdot t; W(h,t) = W_{II} - m_1 \cdot t \quad (3)$$

Підставляючи рівняння (2) до рівняння (1), функція розподілу вологи по товщині шару цементобетону стає підінтегральним виразом. Для другої складової виразу у квадратних дужках рівняння (1) функція розподілу вологи по товщині шару прийме вигляд:

$$\int_0^h W(z,t) dz = \frac{t \cdot (m - m_1)}{h} \cdot \int_0^h z dz - m \cdot t \cdot \int_0^h dz + W_{II} \cdot \int_0^h dz + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ m \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz - m \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz - m_1 \cdot (-1)^n \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz + m_1 \cdot (-1)^n \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \int_0^h \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} dz \right\} \quad (4)$$

Підінтегральна функція синуса матиме вигляд:

$$\int_0^h \sin \left( \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} \right) dz = - \frac{h \cdot \cos \left( \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} \right)}{\pi \cdot n} \Bigg|_0^h = - \frac{h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} + \frac{h}{\pi \cdot n} = \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} \quad (5)$$

Для третьої складової виразу у квадратних дужках рівняння (1) функція розподілу вологи по товщині шару прийме вигляд:

$$\int_0^h W(z,t) \cdot \frac{h}{2} dz = \frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{4} - \frac{h^2 \cdot m \cdot t}{2} + \frac{h^2 \cdot W_{II} \cdot n}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{h^3}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{m \cdot (h - h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{\pi \cdot n} - m \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} - m_1 \cdot (-1)^n \cdot \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} + m_1 \cdot (-1)^n \cdot e^{-\frac{a_1 \cdot t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \frac{h - h \cdot \cos(\pi \cdot n)}{\pi \cdot n} \right\} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 -1 \cdot \int_0^h W(z,t) \cdot z dz = & -\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{3} + \frac{m \cdot t \cdot h^2}{2} - \frac{W_n \cdot h^2}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \times \\
 & \times \left\{ \frac{m \cdot h \cdot (h \cdot \sin(n \cdot \pi) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} - m \cdot e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right. \\
 & \left. + \frac{h \cdot (h \cdot \sin(n \cdot \pi) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} - m_1 \cdot (-1)^n \cdot \frac{h \cdot (h \cdot \sin(\pi \cdot n) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} \right. \\
 & \left. + m_1 \cdot (-1)^n \cdot e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \frac{h \cdot (h \cdot \sin(\pi \cdot n) - n \cdot \pi \cdot h \cdot \cos(\pi \cdot n))}{n^2 \cdot \pi^2} \right\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Враховуючи тільки першу і другу складові виразу у квадратних дужках рівняння (1) можна визначити напруження для вільного краю середини плити, яка не може коробитися. При врахуванні всіх трьох складових виразу у квадратних дужках рівняння (1) можна визначити напруження для вільного краю середини плити, яка може коробитися.

Підставляючи формули (4 - 7) в (1), без врахування третьої складової виразу у квадратних дужках, можемо визначити напруження від усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу при тужавінні та твердінні без можливості коробитися:

$$\begin{aligned}
 \sigma_w(z, W) = & \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left( \frac{z}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \\
 & \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \\
 & + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left( \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} - e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) \quad (8)
 \end{aligned}$$

Підставляючи формули (4-7) в (1) можемо визначити напруження від усадки в цементобетонних та інших цементовмісних шарах дорожнього одягу при тужавінні та твердінні з можливістю коробитися:

$$\begin{aligned}
 \sigma_w(z, W) = & \frac{\alpha \cdot E \cdot t \cdot (m - m_1)}{1 - \mu} \cdot \left( \frac{z}{h} - 0,5 \right) + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m + m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \\
 & \cdot \left\{ \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} - \frac{2}{\pi \cdot n} - e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1}{\pi \cdot n} \right\} + \\
 & + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{2 \cdot h^2 \cdot \alpha \cdot E \cdot (m - m_1)}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left( \sin \frac{\pi \cdot n \cdot z}{h} - e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right) - \frac{12 \cdot (1 - C_x) \cdot \left( \frac{h}{2} - z \right) \cdot \alpha \cdot E}{(1 - \mu)} \cdot \\
 & \left[ -\frac{h^2 \cdot t \cdot (m - m_1)}{12} + \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \left\{ \frac{m}{\pi \cdot n} \right\} + \sum_{n=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{h^4}{\pi^3 \cdot n^3 \cdot a_1} \cdot \right. \\
 & \left. \cdot \left\{ \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} - \frac{2 \cdot m}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} - \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} + \frac{2 \cdot m_1 \cdot (-1)^n}{\pi \cdot n} \cdot e^{-\frac{a_1 t \cdot (\pi \cdot n)^2}{h^2}} \right\} \right] \quad (9)
 \end{aligned}$$

Якщо в формулі (9)  $C_x$  дорівнює одиниці, то це означає відсутність короблення в цементобетонному або іншому цементовмісному шарі дорожнього одягу і формула (9) автоматично перетворюється в формулу (8).

**Результати і пояснення.** На основі теоретичного рішення можна розраховувати напруження від усадки, що виникають в цементобетонному або іншому цементовмісному шарі дорожнього одягу з кристалізаційною структурою при тужавинні та твердінні. Рішення базується на теорії пружності і враховує наступні параметри: масообмін (водяний пар, рідка фаза води), який формується під впливом втрат вологи на межах шару і викликає нерівномірний розподіл вологості по товщині шару; коефіцієнт вологопровідності, модуль пружності, коефіцієнт усадки, які відображають структуру і характеристики матеріалу; а також час догляду і міру жолоблення. Отримані залежності (8, 9) дозволяють розраховувати напруження від усадки на будь-якій глибині шару і в будь-який момент часу догляду за цим шаром, а в подальшому дозволять уточнити розрахунки довговічності цементобетонного або іншого цементовмісного шару дорожнього одягу з кристалізаційною структурою.

### Перелік посилань

1. Розподіл доріг загального користування за типами покриттів. Міністерство інфраструктури України. <https://mtu.gov.ua/content/tehnicnij-stan-avtomobilnih-dorig-avtomobilnih-dorig-zagalnogo-vikoristannya.html>.
2. Бируля А.К. Дороги из местных материалов. – М.: Автотрансиздат, 1955. – 139 с.
3. Дорожно-строительные материалы: Учеб. для вузов / [Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М.]. – М.: Транспорт, 1991. – 357 с.
4. Титар В.С. Будівництво шарів полегшених і перехідних типів дорожнього одягу: Навчальний посібник. – Харків: Видавництво ХНАДУ, 2002. – 120 с.
5. Шари дорожнього одягу з кам'яних матеріалів, відходів промисловості і ґрунтів, укріплених цементом: ГБН В.2.3-37641918-554:2013 (ВБН В.2.3-218-002-95). – [Чинний від 2013-11-01]. – К.: Укравтодор, 2013. – 43 с. – (Нормативний документ Укравтодору).
6. Технология строительства автомобильных дорог. Ч. II Технология строительства дорожных одежд: учебник для вузов / Под ред. Сиденко В.М. – К.: Вища школа, 1970. – 327 с.
7. Жданюк В.К. Дослідження міцності щебенево-піщаних сумішей, укріплених портландцементом / В.К. Жданюк, Д.Ю. Костін, О.О. Арінушкіна, К.А. Павлютін // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології будівництва та експлуатації автомобільних доріг». – Харків: ХНАДУ, 2016.- С.53-57.
8. Толмачов Д. С. Розрахунок імовірності утворення температурних тріщин у монолітних дорожніх бетонах / Д. С. Толмачов, В. П. Сопов, С. М. Толмачов // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. - 2017. - Вип. 66. - С. 113-117.
9. Сіденко В. М. Водно-тепловий режим міських доріг / Сіденко В. М., Фомін В. О. – Харків : Видавництво Харківського університету, 1971. –180 с.
10. Чернявский В.Л. Принцип адаптивности и понятие остаточного ресурса в современном бетоноведении / В.Л. Чернявский, В.К. Жданюк, В.А. Гуркаленко // Международный III научно-практический семинар "Структура, свойства и состав бетона. Вопросы теории бетоноведения и технологической практики", Ровно, 11 – 12 ноября 2003.- С.198 – 205.
11. 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.
12. Сіденко В. М. Эксплуатация автомобильных дорог: учебник для студентов вузов по специальности «Автомобильные дороги» / Сіденко В. М., Михович С. И. – М.: Транспорт, 1976. – 288 с.
13. Полярус О.В. Шляхи визначення енергозберігаючого режиму теплової обробки цементно-водних систем / О.В. Полярус, В. К. Жданюк, О. Л. Вишневецький, С. В. Мінка // Науковий вісник будівництва ХДТУБА. – 2011. – № 63. – С. 261 – 267
14. Котов Д.С. Деформации усадки бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями / Котов Д.С. // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 7. – С. 11-21.
15. Дворкін Л.Й. Бетони і будівельні розчини: Підручник / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін. – К.: Основа, 2008. – 448 с.
16. EN 1992-1-1: 2005-10 Eurocodez «Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for building». – Commition of European Communities. – 248 p.

17. Дорожній одяг жорсткий: ГБН В.2.3-37641918-557:2016 (ВБН В 2.3-218-008-97). – [Чинний від 2017-04-01]. – К.: Міністерство інфраструктури України, 2016. – 70 с. – (Нормативний документ галузі).

18. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки [Перевод с английского В.И. Контовта под редакцией Г.С. Шапиро] / Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. – М.: Гос. изд-во физ-мат. лит, 1963. – 635 с.

## CONTRACTION STRESS IN CEMENT-CONCRETE AND OTHER CEMENTED LAYERS OF ROAD CLOTHING FOR SETTING AND HARDENING

**Onishcheno Artur Mykolayovich**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Bridges and Tunnels, National Transport University, e-mail: artur\_onish@bigmir.net, +380687771899, <https://orcid.org/0000-0002-1040-4530>.

**Lapchenko Artem Sergiyovych**, Candidate of Engineering Sciences, associate professor of the department of construction and operation of highways, Kharkiv National Automobile and Highway University, +38 057707-37-80, <https://orcid.org/0000-0003-4037-5395>.

**Chyzenko Natalia Petrivna**, Senior Lecturer at the Department of Bridges and Tunnels, National Transport University, e-mail: [chyzenko\\_np@ukr.net](mailto:chyzenko_np@ukr.net), +380507355080, <https://orcid.org/0000-0002-9152-2474>.

**Summary:** The article is devoted to shrinkage stresses arising in cement concrete or other cement-containing layer of road clothing with crystallization structure during curing and hardening. The main reasons for the formation of cracks in cement-containing materials are given. Based on the theoretical solution, a mathematical dependence is derived that simulates and allows to estimate the distribution of shrinkage stresses occurring in cement concrete or other cement-containing layer of road wear during curing and curing. The theoretical solution is based on the theory of elasticity and takes into account the following parameters: mass transfer (water vapor, liquid phase of water), which is formed under the influence of moisture losses at the boundaries of the layer and causes an uneven distribution of humidity across the thickness of the layer; moisture coefficient, modulus of elasticity, shrinkage coefficient, which reflect the structure and characteristics of the material; as well as care time and guttering. Mathematical dependence allows to determine the shrinkage stress in cement concrete and other cement-containing layers of road clothing in cases with or without possibility of warping. The obtained solution will allow to clarify the durability calculations of cement concrete or other cement-containing layer of road clothing with crystallization structure.

**Key words:** moisture conductivity, road clothing, contraction coefficient, mass transfer, measure of warping, contraction stress, theoretical solution, cemented layer.

## References

1. Distribution of roads of general use by types of coatings. Ministry of Infrastructure of Ukraine. <https://mtu.gov.ua/content/tehnichniy-stan-avtomobilnih-dorig-avtomobilnih-dorig-zagalnogo-vikoristannya.html>.
2. Birula A.K. Roads from local materials. - Moscow: Autotransmission, 1955. - 139 p.
3. Road-building materials: Textbook. for high schools / [Grushko IM, Korolev IV, Borsch I. M., Mishchenko G. M.]. - М.: Transport, 1991. - 357 pp.
4. Titar V.C. Construction of layers of lightweight and transitional types of road wear: A manual. - Kharkiv: KhNADU Publishing House, 2002. - 120 p.
5. Layers of road clothing made of stone materials, industrial waste and soil, reinforced with cement: ГБН В.2.3-37641918-554: 2013 (ВБН В.2.3-218-002-95). - [Effective from 11/11/2013]. - К.: Ukravtodor, 2013. - 43 p. - (Normative document of Ukravtodor).
6. Technology of road construction. Ch. II Technology of construction of road clothes: a textbook for high schools, Ed. Sidenko V.M. - К.: Higher school, 1970. - 327 pp.
7. Zhdanyuk V.K. Investigation of the strength of gravel-sand mixtures fortified with Portland cement / V.K. Zhdanyuk, D.Yu. Kostin, O.O. Arinushkina, K.A. Pavlutin // Materials of the All-Ukrainian Scientific

and Practical Conference "Modern Technologies of Construction and Operation of Highways" .- Kharkiv: KhNADU, 2016.- P. 53-57.

8. Tolmachov D. S. Calculation of the probability of formation of temperature cracks in monolithic road concrete / D.S. Tolmachev, V.P. Sopov, S.M. Tolmachev // Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. - 2017 - Voip. 66. - P. 113-117.

9. Sidenko V. M. Water-thermal mode of urban roads / Sidenko V. M., Fomin V. O. - Kharkiv: Publishing House of Kharkiv University, 1971. -180 p.

10. Chernyavsky V.L. Principle of adaptability and the concept of residual resource in modern concrete science / V.L. Chernyavsky, V.K. Zhdanyuk, VA Gurkalkenko // International III scientific-practical seminar "Structure, properties and composition of concrete. Problems of the theory of concrete science and technology practice", Rivne, November 11 - 12, 2003.- P.198-205.

11. Sweet S.Y. Estimation of the thermo-stressed condition of road coverings at the early stages of cement concrete hardening / S.Y. Sweet, R.Ya. Left / right roadster of Ukraine. - 2015. - No. 1 - 2. - P. 71 - 74.

12. Sidenko VM The use of highways: a textbook for students of high schools in the specialty "Roads" / Sidenko VM, Mikhovich S.I. - M.: Transport, 1976. - 288 p.

13. Polarus O.V. Ways of determination of energy-saving mode of heat treatment of cement-water systems / O.V. Polarus, VK Zhdanyuk, O. L. Vishnevetsky, SV Minka // Scientific Bulletin of the Construction of the CDTUBA. - 2011. - No. 63. - pp. 261-267

14. Kotov D.S. Deformation of shrinkage of concrete modified with chemical and fine mineral fillers / Kotov D.S. // Engineering Building Magazine. - 2009. - No. 7. - P. 11-21.

15. Dvorkin L.Y. Concrete and building solutions: Textbook / L.Y. Dvorkin, O.L. Dvorkin - K. : Basis, 2008. - 448 p.

16. EN 1992-1-1: 2005-10 Eurocodez "Desing of concrete structures. Part 1: General rules and rules for building ». - Comition of European Communities. - 248 p.

17. Road clothes are rigid: ГБН В.2.3-37641918-557: 2016 (ББН В 2.3-218-008-97). - [Effective from 2017-04-01]. - K. : Ministry of Infrastructure of Ukraine, 2016. - 70 p. - (Normative document of the branch).

18. Tymoshenko S.P. Plates and Shells [Translated from English VI Controller under the editorship of G.S. Shapiro] / Timoshenko SP, Voinovsky-Kryger S. - M. : Gos. Publisher: Phys-mat. Lit. 1963. - 635 p.