

Ряпухін В.М., канд. техн. наук, Дорожко Є.В.

**АНАЛІЗ ВПЛИВУ СКЛАДОВИХ ТЕМПЕРАТУРНОГО
ДЕФОРМУВАННЯ ЦЕМЕНТОБЕТОННОЇ ПЛИТИ НА НАПРУЖЕНО-
ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ШАРУ НА
ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ**

Анотація. У статті наведено результати моделювання температурних деформацій асфальтобетонних шарів та жорсткої основи. Моделювання виконано для усіх 12 місяців в режимі нагрівання та охолодження. Виконано аналіз впливу складових температурного деформування асфальтобетонного шару та жорсткої основи на загальний напружено-деформований стан асфальтобетонного шару.

Ключові слова: асфальтобетонний шар, жорстка основа, температурні напруження, температурні деформації.

Аннотация. В статье приведены результаты моделирования температурных деформаций асфальтобетонных слоев и жесткого основания. Моделирование выполнено для всех 12 месяцев в режиме нагревания и охлаждения. Выполнен анализ влияния составляющих температурного деформирования асфальтобетонного слоя и жесткого основания на общее напряженно-деформированное состояние асфальтобетонного слоя.

Ключевые слова: асфальтобетонный слой, жесткое основание, температурные напряжения, температурные деформации.

Annotation. The article shows the modeling results of the temperature deformation behavior of the asphalt layers and rigid base. The modeling is done for all 12 months both heating and cooling. The analysis of influence of the temperature deformation behavior of the asphalt layers and rigid base components on the total stress-deformed state of asphalt layer was also made.

Keywords: asphalt concrete, a rigid base, the temperature stress, the temperature deformation.

Температурне розширення (або стискання) асфальтобетонного шару і цементобетонної плити залежать від коефіцієнтів теплодеформативності (ТКЛР) цих матеріалів і градієнтів температур, при цьому ТКЛР асфальтобетону у декілька разів більше ніж цементобетону [1, 2, 3]. Для прийнятої умови забезпеченого надійного зчеплення контакту асфальтобетонного шару і цементобетонної плити, при зміні температури такої комбінованої плити, температурні деформації на стику шарів, незалежно від матеріалу шарів, коефіцієнтів теплодеформативності шарів та градієнту температур, будуть однакові.

При зміні температури комбінованої плити в асфальтобетонному шарі виникають вимушені (нереалізовані) деформації та відповідні температурні напруження. Це пояснюється тим, що асфальтобетонний шар має меншу товщину і значно менший модуль пружності ніж цементобетонна плита та асфальтобетонний шар вимушений деформуватися так як цементобетонна плита в основі.

Температурні напруження в асфальтобетонному шарі необхідно визначати за величиною нереалізованої температурної деформації [4]:

$$\sigma_{аб} = \frac{\varepsilon_{аб}^H \cdot R_{аб}^t}{(1 - \mu_{аб}^t)}, \quad (1)$$

де $\sigma_{аб}$ – температурні напруження в асфальтобетонному шарі, МПа;

$\varepsilon_{аб}^H$ – нереалізована температурна деформація асфальтобетонного шару;

$R_{аб}^t$ – функція релаксації асфальтобетону при температурі (t), МПа;

$\mu_{аб}^t$ – коефіцієнт Пуассону асфальтобетону при температурі (t).

Нереалізована температурна деформація асфальтобетонного шару дорівнює різниці між деформацією при вільному подовженні (вільний контакт

асфальтобетонного шару та цементобетонної плити) та фактичної деформації [4]:

$$\varepsilon_{аб}^H = \varepsilon_{аб}^B - \varepsilon_{аб}^\Phi, \quad (2)$$

де $\varepsilon_{аб}^B$ – температурна деформація асфальтобетонного шару при умові вільного контакту асфальтобетонного шару та цементобетонної плити;

$\varepsilon_{аб}^\Phi$ – фактична температурна деформація асфальтобетонного шару (при умові надійного зчеплення контакту асфальтобетонного шару та цементобетонної плити);

При умові вільного контакту асфальтобетонного шару з цементобетонною плитою відносна деформація асфальтобетонного шару дорівнює:

$$\varepsilon_{аб}^B = \alpha_{аб} \cdot \Delta t_{аб}^{cp}, \quad (3)$$

де $\alpha_{аб}$ – ТКЛР асфальтобетону, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

$\Delta t_{аб}^{cp}$ – зміна температури в середині асфальтобетонного шару, $^{\circ}\text{C}$.

Оскільки, для прийнятої умови надійного зчеплення контакту шарів, лінійна температурна деформація асфальтобетонного шару і цементобетонної плити буде однакою, то визначити фактичну температурну деформацію асфальтобетонного шару можна за деформацією цементобетонної плити:

$$\varepsilon_{аб}^\Phi = \varepsilon_{цб}^\Phi, \quad (4)$$

де $\varepsilon_{цб}^\Phi$ – фактична температурна деформація цементобетонного шару.

При зміні температури цементобетонна плита внаслідок її монолітності матиме фактичну зміну лінійних розмірів по всій товщині плити однакою [3], тоді відносна деформація цементобетонної плити дорівнює:

$$\varepsilon_{цб}^B = \alpha_{цб} \cdot \Delta t_{цб}^{cp}, \quad (5)$$

де $\alpha_{цб}$ – ТКЛР асфальтобетону, $^{\circ}\text{C}^{-1}$;

$\Delta t_{\text{цб}}^{\text{сп}}$ – зміна температури в середині цементобетонної плити, °С.

За формулою (5) визначається деформація, яка буде при вільному сковзанні плити по основі та без врахування напружень, що виникають при жолобленні плити.

При переміщенні нижньої поверхні плити по основі виникає сила тертя-зчеплення, яка заважає вільному подовженню плити (вільному температурному деформуванню плити). Ці сили стримують переміщення цементобетонних плит на величину [4]:

$$\varepsilon_{\text{цб}}^{\text{тр}} = \frac{(\rho \cdot f + 0,5 \cdot C) \cdot (1 - \mu_{\text{цб}})}{E_{\text{цб}}}, \quad (6)$$

де $\varepsilon_{\text{цб}}^{\text{тр}}$ – величина деформації цементобетонної плити, на яку затримається вільна деформація за рахунок сил тертя-зчеплення на підшві плити;

ρ – питомий тиск на підшві плиті, від ваги комбінованої плити та автомобіля, МПа;

f – коефіцієнт тертя між цементобетонною плитою та основою;

C – зчеплення цементобетонної плити та основи, МПа.

$\mu_{\text{цб}}$ – коефіцієнт Пуассона цементобетону;

$E_{\text{цб}}$ – модуль пружності цементобетону, МПа;

Від позacentрового прикладання навантаження тертя-зчеплення на підшві плит виникає напруга розтягування або стиснення в верхній площині цементобетонної плити (при підвищенні температури будуть напруження розтягування, при зниженні температури – стиснення). Ці напруження збільшують величину вільного температурного деформування поверхні цементобетонної плити. Величина на яку збільшаться, деформації верхньої площини цементобетонної плити від позacentрового прикладення сил тертя-зчеплення [4]:

$$\varepsilon_{\text{цб}}^{\text{пц}} = \frac{L \cdot (\rho \cdot f + 0,5 \cdot C) \cdot (1 - \mu_{\text{цб}})}{h_{\text{цб}} \cdot E_{\text{цб}}}, \quad (7)$$

де L – довжина цементобетонної плити, м.

$h_{\text{цб}}$ – товщина цементобетонної плити, м;

Перепад температури по товщині цементобетонної плити приводить до появи напружень жолоблення. Ці напруження також змінюють характер температурного деформування цементобетонної плити, оскільки на цементобетонну плиту діють додаткові об'ємні сили жолоблення плити. Напруження жолоблення зменшать величину вільного температурного деформування поверхні цементобетонної плити на величину [4]:

$$\varepsilon_{\text{цб}}^{\text{ж}} = \frac{2}{3} \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot (t_{\text{цб}}^{\text{в}} - t_{\text{цб}}^{\text{н}}) \cdot m \quad (\text{при нагріванні}) \quad (8)$$

$$\varepsilon_{\text{цб}}^{\text{ж}} = \frac{1}{3} \cdot \alpha_{\text{цб}} \cdot (t_{\text{цб}}^{\text{в}} - t_{\text{цб}}^{\text{н}}) \cdot m \quad (\text{при охолодженні}) \quad (9)$$

де $t_{\text{цб}}^{\text{в}}$ – температура поверхні цементобетонної плити, °С;

$t_{\text{цб}}^{\text{н}}$ – температура низу цементобетонної плити, °С;

m – емпіричний коефіцієнт міри напруженості [3].

Підсумкове фактичне температурне деформування поверхні цементобетонної плити та низу асфальтобетонного шару з врахуванням дії сил тертя-зчеплення по підшві цементобетонної плити та напружень жолоблення:

$$\varepsilon_{\text{аб}}^{\Phi} = \varepsilon_{\text{цб}}^{\Phi} = \varepsilon_{\text{цб}}^{\text{в}} - \varepsilon_{\text{цб}}^{\text{тр}} + \varepsilon_{\text{цб}}^{\text{пц}} - \varepsilon_{\text{цб}}^{\text{ж}} \quad (10)$$

Для визначення впливу складових температурного деформування цементобетонної плити на загальний напружено-деформований стан асфальтобетонного шару на жорсткій основі виконано моделювання температурних деформацій асфальтобетонного шару та цементобетонної плити. Моделювання температурних деформацій виконано для усіх 12 місяців в режимі нагрівання та охолодження. Температурний режим обраний для міст Умань, Кіровоград та Луганськ, оскільки згідно з [5, 6] там спостерігаються максимальні температурні перепади впродовж доби. Добові температурні перепади в цих містах, що прийняті до розрахунку визначались за останні 4 роки. Для моделювання температурних деформацій використані різні товщини асфальтобетонного шару (2 см, 5 см, 7 см) та цементобетонної плити (20 см, 24

см, 28 см). Розмір цементобетонної плити прийнято 6 м на 3 м. Розрахунки виконано для двох види асфальтобетону:

- асфальтобетон дрібнозернистий, тип Б, з розміром зерна до 20 мм, з використанням 6% БНД 40/60;

- ЩМА-15, з використанням 6,2 % БМП 60/90-52.

Приклад результатів розрахунків для конструкції з дрібнозернистого асфальтобетонного шару товщиною 2 см на цементобетонній плиті товщиною 20 см наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Зведена таблиця результатів моделювання температурних деформацій

| Асфальтобетон дрібнозернистий, тип Б, розмір зерна до 20 мм, з використанням 6% БНД 40/60 | | | | | | | | |
|---|--------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|------------|
| товщина шарів, см | місяць | температурний режим | $\varepsilon_{аб}^в$ | $\varepsilon_{цб}^в$ | $\varepsilon_{цб}^{тр}$ | $\varepsilon_{цб}^{пц}$ | $\varepsilon_{цб}^ж$ | |
| | | | | | | | | $h_{аб}$ |
| 2 | 20 | січень | нагрівання | 0,00015800 | 0,00003513 | 0,00000338 | 0,00010146 | 0,00002366 |
| | | | охолодження | 0,00018079 | | | | 0,00000153 |
| | | лютий | нагрівання | 0,00025076 | 0,00005672 | 0,00000338 | 0,00010146 | 0,00003705 |
| | | | охолодження | 0,00028730 | | | | 0,00000186 |
| | | березень | нагрівання | 0,00034397 | 0,00008120 | 0,00000023 | 0,00000702 | 0,00005264 |
| | | | охолодження | 0,00038757 | | | | 0,00000342 |
| | | квітень | нагрівання | 0,00037939 | 0,00012475 | 0,00000023 | 0,00000702 | 0,00005166 |
| | | | охолодження | 0,00044721 | | | | 0,00000274 |
| | | травень | нагрівання | 0,00049061 | 0,00016025 | 0,00000023 | 0,00000702 | 0,00005223 |
| | | | охолодження | 0,00057830 | | | | 0,00000305 |
| | | червень | нагрівання | 0,00055673 | 0,00018789 | 0,00000023 | 0,00000702 | 0,00004949 |
| | | | охолодження | 0,00065625 | | | | 0,00000156 |
| | | липень | нагрівання | 0,00056940 | 0,00018866 | 0,00000023 | 0,00000702 | 0,00005138 |
| | | | охолодження | 0,00067117 | | | | 0,00000241 |
| | | серпень | нагрівання | 0,00051363 | 0,00016707 | 0,00000023 | 0,00000702 | 0,00005262 |
| | | | охолодження | 0,00060544 | | | | 0,00000324 |
| | | вересень | нагрівання | 0,00039817 | 0,00012969 | 0,00000023 | 0,00000702 | 0,00005202 |
| | | | охолодження | 0,00046934 | | | | 0,00000315 |
| | | жовтень | нагрівання | 0,00032496 | 0,00007529 | 0,00000023 | 0,00000702 | 0,00005254 |
| | | | охолодження | 0,00036615 | | | | 0,00000415 |
| | | листопад | нагрівання | 0,00017663 | 0,00004050 | 0,00000023 | 0,00000702 | 0,00002877 |
| | | | охолодження | 0,00019902 | | | | 0,00000249 |
| | | грудень | нагрівання | 0,00011470 | 0,00002472 | 0,00000181 | 0,00005424 | 0,00001758 |
| | | | охолодження | 0,00013142 | | | | 0,00000153 |

Аналогічні розрахунки виконано для усіх вище зазначених обраних матеріалів та товщин конструктивних шарів. Для аналізу впливу складових

температурного деформування визначено скільки у відсотках складає кожна окрема деформація по відношенню до вільної температурної деформації асфальтобетонного шару. Приклад результатів розрахунків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2 – Складові температурних деформацій у відсотковому відношенні до вільної деформації асфальтобетонного шару

| Асфальтобетон дрібнозернистий, тип Б, розмір зерна до 20 мм, з використанням 6% БНД 40/60 | | | | | | | | |
|---|-----------------|----------|---------------------|--|-------------------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| товщина шарів, см | | місяць | температурний режим | Деформації у відсотковому відношенні до вільної деформації асфальтобетону, % | | | | |
| h _{аб} | h _{цб} | | | $\epsilon_{аб}^B$ | $\epsilon_{цб}^B$ | $\epsilon_{цб}^{TP}$ | $\epsilon_{цб}^{III}$ | $\epsilon_{цб}^J$ |
| 2 | 20 | січень | нагрівання | 100,0 | 22,2 | 2,1 | 64,2 | 15,0 |
| | | | охолодження | 100,0 | 19,4 | 1,9 | 56,1 | 0,8 |
| | | лютий | нагрівання | 100,0 | 22,6 | 1,3 | 40,5 | 14,8 |
| | | | охолодження | 100,0 | 19,7 | 1,2 | 35,3 | 0,6 |
| | | березень | нагрівання | 100,0 | 23,6 | 0,1 | 2,0 | 15,3 |
| | | | охолодження | 100,0 | 21,0 | 0,1 | 1,8 | 0,9 |
| | | квітень | нагрівання | 100,0 | 32,9 | 0,1 | 1,9 | 13,6 |
| | | | охолодження | 100,0 | 27,9 | 0,1 | 1,6 | 0,6 |
| | | травень | нагрівання | 100,0 | 32,7 | 0,0 | 1,4 | 10,6 |
| | | | охолодження | 100,0 | 27,7 | 0,0 | 1,2 | 0,5 |
| | | червень | нагрівання | 100,0 | 33,7 | 0,0 | 1,3 | 8,9 |
| | | | охолодження | 100,0 | 28,6 | 0,0 | 1,1 | 0,2 |
| | | липень | нагрівання | 100,0 | 33,1 | 0,0 | 1,2 | 9,0 |
| | | | охолодження | 100,0 | 28,1 | 0,0 | 1,0 | 0,4 |
| | | серпень | нагрівання | 100,0 | 32,5 | 0,0 | 1,4 | 10,2 |
| | | | охолодження | 100,0 | 27,6 | 0,0 | 1,2 | 0,5 |
| | | вересень | нагрівання | 100,0 | 32,6 | 0,1 | 1,8 | 13,1 |
| | | | охолодження | 100,0 | 27,6 | 0,0 | 1,5 | 0,7 |
| | | жовтень | нагрівання | 100,0 | 23,2 | 0,1 | 2,2 | 16,2 |
| | | | охолодження | 100,0 | 20,6 | 0,1 | 1,9 | 1,1 |
| | | листопад | нагрівання | 100,0 | 22,9 | 0,1 | 4,0 | 16,3 |
| | | | охолодження | 100,0 | 20,3 | 0,1 | 3,5 | 1,3 |
| | | грудень | нагрівання | 100,0 | 21,5 | 1,6 | 47,3 | 15,3 |
| | | | охолодження | 100,0 | 18,8 | 1,4 | 41,3 | 1,2 |

Аналогічні розрахунки виконано для усіх вище зазначених обраних матеріалів та товщин конструктивних шарів.

Аналіз отриманих значень відсоткових відношень деформацій до вільної деформації асфальтобетонного шару дає змогу зробити наступні висновки:

1. Зміна вільної деформації цементобетонної плити, яка виникає за рахунок дії сил тертя-зчеплення на підшві плити (формула 6) має невеликий вплив на роботу конструкції. Її відношення до вільної температурної

деформації асфальтобетонного шару не перевищує 5 % як при нагріванні так і при охолодженні, тому нею можна знехтувати при розрахунках.

2. Зміна вільної деформації цементобетонної плити, яка виникає за рахунок позацентрового прикладання сил тертя-зчеплення на підшві плити (формула 7) значно змінюється протягом року. Взимку дію позацентрово прикладеної сили тертя-зчеплення варто враховувати, оскільки температурна деформація, що виникає від діє позацентрово прикладеної сили тертя-зчеплення на підшві плити складає понад 30 % від величини вільної температурної деформації асфальтобетонного шару. На весні, влітку та восени значення деформації від позацентрового прикладання сил тертя-зчеплення не перевищує 5 % від вільної температурної деформації асфальтобетонного шару, тому в цей період дію позацентрово прикладеної сили тертя-зчеплення можна знехтувати. Підвищення деформації від діє позацентрово прикладеної сили тертя-зчеплення взимку пояснюється примерзанням цементобетонної плити до основи та підвищенням зчеплення. Тож дію позацентрово прикладеної сили тертя-зчеплення при розрахунку температурних деформацій варто враховувати лише в період, коли відбувається примерзання цементобетонної плити до основи.

3. Значення зміни вільної деформації поверхні цементобетонної плити, що викликані перепадом температури по товщині цементобетонної плити при нагріві конструкції сягають приблизно 10 % – 15 % у порівнянні з вільною температурною деформацією асфальтобетонного шару. При режимі охолодження значення деформацій, що викликані перепадом температури по товщині цементобетонної плити становлять менше 5 % у порівнянні з вільною температурною деформацією асфальтобетонного шару. Тому зміну вільної деформації цементобетонної плити, яка виникає внаслідок перепаду температури по товщині цементобетонної плити (формули 8 та 9) варто враховувати лише для режиму нагріву конструкції.

4. Значення відношення вільної деформації цементобетонної плити (формула 5) до вільної деформації асфальтобетонного шару сягає близько 20 % – 40 %. Зважаючи на це, вони постійно мають бути враховані у подальших розрахунках.

З урахуванням вище наведених висновків формула (10) матиме наступний вигляд:

- при можливості примерзання цементобетонної плити до основи:

$$\varepsilon_{аб}^{\phi} = \varepsilon_{цб}^{\phi} = \varepsilon_{цб}^B + \varepsilon_{цб}^{пц} - \varepsilon_{цб}^ж \quad (\text{при нагріві}), \quad (11)$$

$$\varepsilon_{аб}^{\phi} = \varepsilon_{цб}^{\phi} = \varepsilon_{цб}^B + \varepsilon_{цб}^{пц} \quad (\text{при охолодженні}), \quad (12)$$

- за відсутності можливості примерзання цементобетонної плити до основи:

$$\varepsilon_{аб}^{\phi} = \varepsilon_{цб}^{\phi} = \varepsilon_{цб}^B - \varepsilon_{цб}^ж \quad (\text{при нагріві}), \quad (13)$$

$$\varepsilon_{аб}^{\phi} = \varepsilon_{цб}^{\phi} = \varepsilon_{цб}^B \quad (\text{при охолодженні}). \quad (14)$$

Література

1. Богуславский, А. М. О деформативной способности асфальтобетона при охлаждении // Труды ХАДИ, Вып.26. – Харьков, 1961. – С. 81-90.
2. Ряпухін В.М., Дорожко Є.В. Експериментальне визначення чисельного значення температурного коефіцієнта лінійного розширення асфальтобетону // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво, НТУ. – 2013. - №89. – С. 61-71.
3. Горецкий Л.И. Теория и расчет цементобетонных покрытий на температурные воздействия – М.: Транспорт, 1965. – 284 с.
4. Дорожко Є.В., Ряпухін В.М. Визначення температурних напружень в тонких асфальтобетонних шарах на жорсткій основі // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – 2014. – №46. – С. 147–153.
5. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика.
6. ДСТУ-Н Б В.1.1 – 27:2011. Будівельна кліматологія. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі.