

УДК 625.033.772

## ВПЛИВ ВИПАДКОВИХ ДЕФЕКТІВ НА КОНЦЕНТРАЦІЮ НАПРУЖЕНЬ В АСФАЛЬТОБЕТОНІ ТА НА ВИЗНАЧЕННЯ ЙОГО МОДУЛЯ ПРУЖНОСТІ

В.В. Маляр, доц., к.т.н., Я.В. Ільїн, асп.,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* Наведено результати розрахунків концентрацій напружень від пор та тріщин у структурі асфальтобетону. Показано вплив поверхневих тріщин на значення розрахункових модулів пружності асфальтобетону.

*Ключові слова:* асфальтобетон, вібростенд, концентрація напружень, метод скінченних елементів, модуль пружності, штучні дефекти, напружено-деформований стан.

## ВЛИЯНИЕ СЛУЧАЙНЫХ ДЕФЕКТОВ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ В АСФАЛЬТОБЕТОНЕ И НА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ

В.В. Маляр, доц., к.т.н., Я.В. Ильин, асп.,  
Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет

*Аннотация.* Приведены результаты расчётов концентраций напряжений от пор и трещин в структуре асфальтобетона. Показано влияние поверхностных трещин на значения расчётных модулей упругости асфальтобетона.

*Ключевые слова:* асфальтобетон, вибростенд, концентрация напряжений, метод конечных элементов, модуль упругости, искусственные дефекты, напряженно-деформированное состояние.

## INFLUENCE OF RANDOM DEFECTS ON STRESS CONCENTRATION IN ASPHALT AND DETERMINATION OF ITS MODULUS OF ELASTICITY

V. Malyar, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.), Ya. Ilyin, P. G.,  
Kharkiv National Automobile and Highway University

*Abstract.* The results of calculations of stress concentrations caused by pores and cracks in the structure of asphalt concrete are given. The effect of surface cracks on the values of elastic modulus of asphalt concrete is shown.

*Key words:* asphalt concrete, vibrostand, stress concentration, finite element method, elastic modulus, artificial defects, stress-strain state.

### Вступ

Водонасичення асфальтобетону, його циклічне заморожування, відтавання, дія агресивного середовища тощо призводять до появи тріщин в об'ємі асфальтобетону. Ці тріщини можна віднести до дефектів структури, які знижують суцільність матеріалу, що викли-

кає зниження значень розрахункових характеристик.

Розтріскування матеріалу або поява тріщини у площині, перпендикулярній до однієї з координатних осей, призводить до падіння жорсткості матеріалу в цьому напрямку. Під «тріщиною» розуміється утворення в нескінченно малому елементі середовища зони зі

зниженими механічними характеристиками внаслідок накопичення пошкоджень.

### Аналіз публікацій

В [1] надано класифікацію дефектів структури органобетонних композитів (рис. 1). До дефектів структури належать тріщини (1), пори (2), не покриті в'язучим частинки (3), пусті об'єми (4) та відсутність зв'язків (5) у контактній зоні.

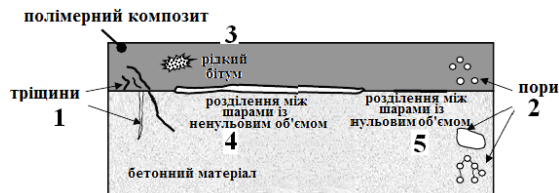
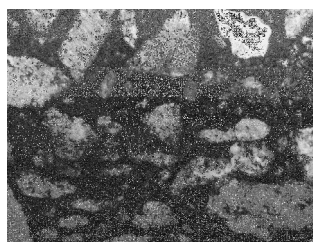


Рис. 1. Дефекти структури, що мають полімербетонні композити (асфальтобетони)

Дефекти структури асфальтобетонів зароджуються також на стадії виготовлення сумішей, на стадії їх ущільнення та розвиваються в експлуатаційних умовах під дією транспортних навантажень та кліматичних факторів. Вони можуть зароджуватись на стадії експлуатації покриття, якщо асфальтобетон піддається навантаженням та агресивній дії навколишнього середовища, на протидію яким він не розрахований (перевантаження, жаркий або холодний клімат, перезволоження, сонячна інсоляція тощо). Дефекти можуть утворюватись через невідповідність конструкції дорожнього одягу транспортним навантаженням, що викликає надмірні деформації, розтяг чи згин.

### Мета і постановка завдання

Завдання цього дослідження стосуються структурних дефектів асфальтобетону, які утворюються на технологічній стадії й яким можна запобігти, визначивши закономірності впливу дефектів на деформаційні характеристики асфальтобетону та його довговічність.



До першого відносяться модулі пружності та параметри їх міцності поведінки, до другого – утомленість асфальтобетонів, яка може бути циклічною або статичною.

Як об'єкт досліджень було взято дрібнозернистий асфальтобетон типу «Б» за ДСТУ, який найчастіше використовується для влаштування покриттів автомобільних доріг. Для досліджень використовували стандартні зразки асфальтобетону. Ці зразки розрізали, а потім сканували площину розрізу (рис. 2). Чітко видимими були зерна наповнювача з розмірами більше 3–5 мм. На основі фотографії поверхні подано геометричну модель зразка асфальтобетону з розмірами зерен наповнювача більше 5 мм (рис. 1).

Частка наповнювача в матриці становила 38 %, що відповідає структурі дрібнозернистого асфальтобетону типу «Б». Така геометрична модель може відображати макроструктуру асфальтобетону, аналогічним чином можна подати мезо- і мікроструктуру асфальтобетону.

На макрорівні матрицю можна вважати однорідною, ізотропною з великою кількістю макропор із розмірами 1–2 мм. Тому в модель, подану на рис. 2, повітряні пори були введені штучно – способом випадкового видалення елементів матриці. Також у модель було включено тріщини довжиною 4 мм, розташовані горизонтально і вертикально по відношенню до навантаження. Перша горизонтальна тріщина розташована в матриці між включеннями, друга горизонтальна тріщина – на границі розподілу фаз «кам'яний матеріал–матриця».

Вхідні параметри фізичної моделі були подані: модулями пружності матриці макроструктури (асфальтового розчину) і наповнювача (гранітного щебеню), їх коефіцієнтами поперечної деформації.



Рис. 2. Фотографія поверхні розрізаного асфальтобетонного зразка та зображення двовимірної геометричної моделі асфальтобетону

Дані за модулем пружності матриці взято на підставі аналітичних розрахунків. Відповідно до [2]

$$E_{\text{mix}} = P_c \left[ E_{\text{agg}} \cdot (1 - VMA) + E_b \cdot VMA \cdot VFA \right] + \frac{1 - P_c}{\frac{(1 - VMA)}{E_{\text{agg}}} + \frac{VMA}{E_b \cdot VFA}}, \quad (1)$$

де контактну функцію подано у вигляді

$$P_c = \frac{\left( P_0 + E_b \cdot \frac{VFA}{VMA} \right)^{P_1}}{P_2 + \left( E_b \cdot \frac{VFA}{VMA} \right)^{P_1}}, \quad (2)$$

де  $P_0$ ,  $P_1$  і  $P_2$  – емпіричні коефіцієнти;  $E_{\text{agg}}$  – модуль пружності кам'яного матеріалу;  $E_b$  – модуль в'язучого;  $VMA$  – пористість мінерального матеріалу;  $VFA$  – частка між зернових пор, заповнених в'язучим.

З урахуванням [3] модуль в'язучого (релаксації)

$$E(t) = E_g \left[ 1 + \left( \frac{E_g t}{3\eta} \right)^b \right]^{-\left(1 + \frac{1}{b}\right)}, \quad (3)$$

де  $E_g$  – константа;  $t$  – час;  $\eta$  та  $b$  – змінні, які виражаються через стандартні показники бітуму.

Для взятого типу асфальтобетону використовували такі значення показників: температура розм'якшеності бітуму – 50 °С; глибина проникнення голки бітуму – 80 1/10 мм; густина бітуму – 1030 кг/м<sup>3</sup>; середня щільність

кам'яного матеріалу – 2442 кг/м<sup>3</sup>;  $VMA = 0,177$  (матриці);  $VFA = 1$  (матриці).

Значення модуля пружності змінюються залежно від температури (табл. 1) і частот деформування (часу дії навантаження).

Таблиця 1 Дані, що стосуються модуля пружності матриці

| Температура, °С               | 0    | 10   | 20   | 30  | 40  |
|-------------------------------|------|------|------|-----|-----|
| Модуль пружності матриці, МПа | 7186 | 3724 | 1445 | 485 | 201 |

У цих розрахунках час дії навантаження взятий за нормативами (0,1 с). Отримані дані добре узгоджуються з [4].

### Результати модельних розрахунків та експериментальних досліджень

Було обрано найбільш несприятливу для асфальтобетону схему навантаження – схему на розтяг ( $\sigma = 0,6$  МПа). Розрахунок напружено-деформованого стану асфальтобетону використовували за допомогою чисельного методу скінченних елементів на основі програмного комплексу. Результати розв'язку включали значення напружень у кожній точці матеріалу.

На рис. 3 подано значення розтягуючих напружень фрагмента зразка у вигляді ізоліній. Як видно з рисунка, розподіл напружень у матеріалі є неоднорідним. Найбільш небезпечними ділянками є також пори та тріщини, що розташовані поперек дії розтягування. Тут спостерігаються концентрації напружень. Концентрація напружень – явище виникнення підвищених місцевих напружень в областях різких змін форми пружного тіла, а також у зонах контакту.

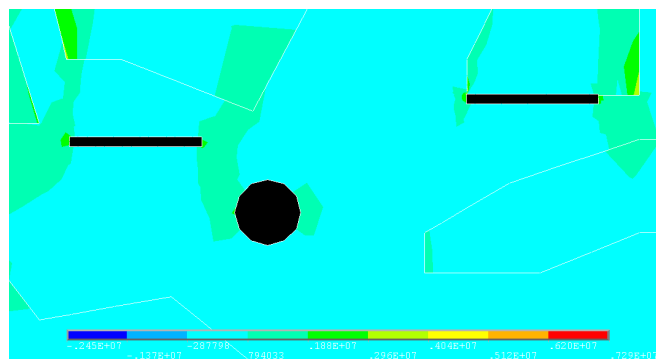


Рис. 3. Розтягуючі напруження у фрагменті асфальтобетонного зразка

Область простору, в якій виникають ці напруження, називається концентратором напружень. Концентрація напружень характеризується теоретичним коефіцієнтом концентрації напружень  $k$  – відношенням максимального напруження в області концентратора  $\sigma_{\max}$  до номінального напруження (обчисленого у припущенні відсутності концентратора)  $\sigma$

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} \quad (4)$$

Пори дають значення концентрації напружень 3,13, що узгоджується із класичною задачею Кірша, де коефіцієнт концентрації дорівнює 3. По боках тріщин виникають ще більші концентрації напружень (рис. 4), значення коефіцієнта яких, залежно від положення тріщини й температури асфальтобетону, наведено у табл. 2.

Таблиця 2 Значення коефіцієнта концентрації напружень

| Положення тріщини  | $k$ , за температури, °С |      |      |      |      |
|--|--------------------------|------|------|------|------|
|  | 0                        | 10   | 20   | 30   | 40   |
| В матриці  | 3,48                     | 3,44 | 3,35 | 3,27 | 3,23 |
| На границі розподілу фаз в'язучого та мінеральної поверхні | 4,85                     | 4,30 | 3,50 | 2,83 | 2,72 |

Найбільш небезпечними є тріщини, розташовані між матрицею та наповнювачем, тобто такі, що виникли при порушенні адгезійних зв'язків між в'язучим та кам'яним матеріалом. Останні, зазвичай, є наслідком водонасичення, циклічного заморожування-відтавання та дії агресивного середовища. За температури 0 °С концентрація напружень у зоні тріщини є максимальною. У той же час за цієї температури, згідно [5], розраховують допустиме розтягуюче напруження асфальтобетону при згині за одним із трьох критеріїв граничного стану.

#### Вплив поверхневої тріщини на визначення модуля пружності асфальтобетону

При визначенні модуля пружності асфальтобетону для розрахунків дорожнього одягу використовують різні прилади та обладнання, у тому числі й на вібростенді ХНАДУ [6].

Випробування проводять на зразках-балках за схемою – розтяг при згині.

На першому етапі моделювання визначали вплив розмірів та положення тріщини за висотою зразка асфальтобетону. Тріщину розташовували на боковій поверхні, перпендикулярній до напрямку дії сили від штока динаміка вібростенда (рис. 5).

Визначали зміну модуля пружності від геометричних параметрів тріщини. Вплив одного фактора визначали за постійних двох інших. Базовими були розміри: висота розташування тріщини – 42 мм; глибина тріщини – 5 мм; товщина тріщини – 1,0 мм. Результати розрахунків наведені у табл. 3–5.

Таблиця 3 Вплив висоти розташування тріщини на зміну модуля пружності асфальтобетону

| Висота розташування тріщини, мм  | 21   | 42   | 84   | 126  | 168  | 210  | 247 |
|--|------|------|------|------|------|------|-----|
| Значення модуля пружності зразка із тріщиною в % відносно значення суцільного зразка | 93,1 | 94,3 | 96,2 | 97,8 | 99,0 | 99,7 | 100 |

Таблиця 4 Вплив глибини тріщини на зміну модуля пружності асфальтобетону

| Глибина тріщини, мм  | 3    | 5    | 7,5  | 10   |
|--|------|------|------|------|
| Значення модуля пружності зразка із тріщиною в % відносно значення суцільного зразка | 97,6 | 94,3 | 88,6 | 81,4 |

Таблиця 5 Вплив товщини тріщини на зміну модуля пружності асфальтобетону

| Товщина тріщини, мм  | 1,0  | 0,8  | 0,6  | 0,4  |
|--|------|------|------|------|
| Значення модуля пружності зразка із тріщиною в % відносно значення суцільного зразка | 94,3 | 94,5 | 94,8 | 95,1 |

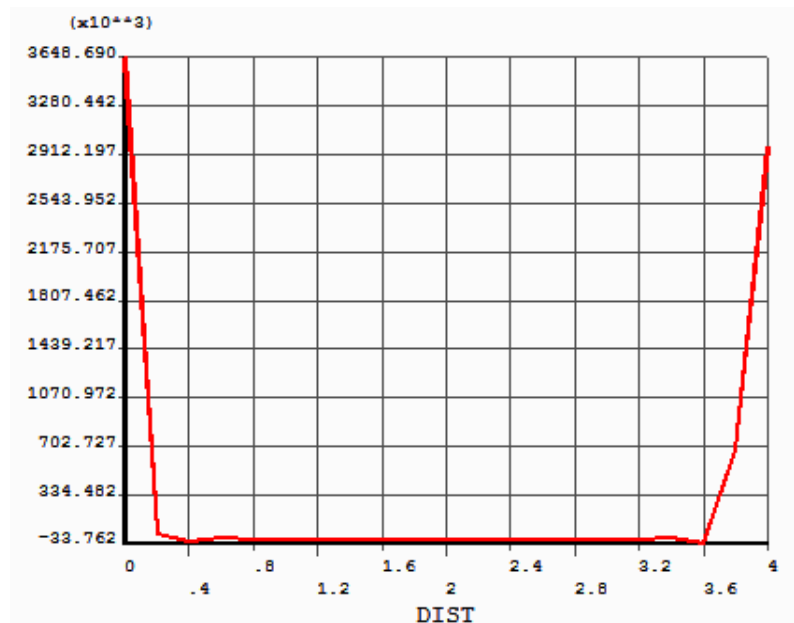


Рис. 4. Значення розтягуючих напружень (в Па) вздовж тріщини (в мм), розташованої на границі розподілу фаз

Результати розрахунків показали, що найбільш впливовим фактором є глибина тріщини (табл. 4). Так, тріщина із глибиною 10 мм знижує значення модуля пружності на 19 %. Товщина тріщини змінює значення модуля пружності, а розташування випадкової тріщини по висоті зразка найбільш сильно впливає тоді, коли вона розташована близько до його закріплення.

#### Експериментальні дослідження модуля пружності асфальтобетону зі штучними дефектами на вібростенді ХНАДУ

На балках асфальтобетону були штучно зроблені пропили товщиною 0,6 мм. Спочатку були зроблені два пропили з двох боків на відстані 5 см від кінця консолі глибиною по 3 мм, потім – ще два на відстані 5 см від основи консолі (за аналогією з моделлю на рис. 5). Визначали модуль пружності на вібростенді до пропилів та після кожної пари. Результати вимірювань за розрахункової температури 10 °С та за різних частот деформування наведені у табл. 6.

Аналіз експериментальних даних показує, що зменшення модуля пружності зразків із поверхневими дефектами коливається у межах 5–17 % (в середньому 11 %), залежно від частоти деформування.

Таблиця 6 Значення модуля пружності асфальтобетону зі штучними дефектами за температури 10 °С

| Частота, Гц | Модуль пружності, МПа |                             |  |
|-------------|-----------------------|-----------------------------|--|
|             | базового зразка       | зразка з верхніми пропилами | зразка з верхніми та нижніми пропилами |
| 0,01        | 6620                  | 5880                        | 5760                                   |
| 0,05        | 8720                  | 7750                        | 7260                                   |
| 0,1         | 9580                  | 8640                        | 8420                                   |
| 0,5         | 11860                 | 11260                       | 10740                                  |
| 1           | 13170                 | 11900                       | 11640                                  |
| 5           | 14780                 | 13250                       | 13990                                  |
| 10          | 14890                 | 13360                       | 13990                                  |

Це узгоджується з теоретичними розрахунками залежно від розмірів тріщини (6–12 %). Тобто випадкові одиничні поверхневі тріщини впливають на визначення модуля пружності асфальтобетону в середньому приблизно на 10 %.

З різних причин структурна неоднорідність асфальтобетону формується різними рівнями. На її формування впливають різний вміст компонентів структури, які мають різні фізико-механічні властивості (модуль пружності, коефіцієнт поперечної деформації, тощо), пори і мікротріщини. Під впливом неоднорідностей в окремих об'ємах бетону за зовнішніх навантажень виникають концентрації напружень.

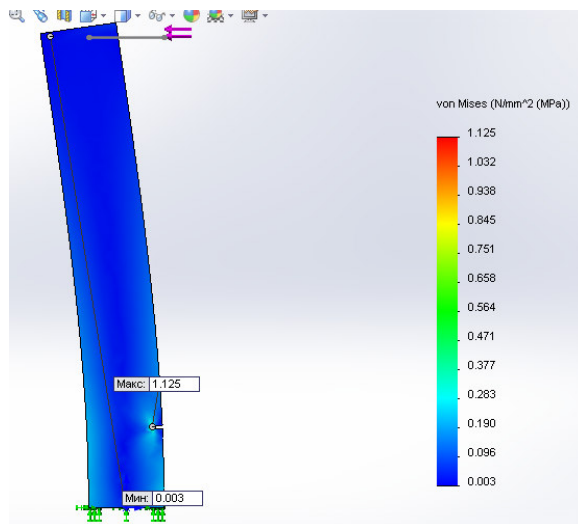


Рис. 5. Модель зразка балки із тріщиною

Поблизу пор і пустот концентрації напружень у декілька разів перевищують напруження, що викликані навантаженням.

Руйнування асфальтобетону відбувається поступово. Спочатку виникають перенапруги, потім – мікротріщини. Розвиток цього процесу супроводжується перерозподілом напруг і залученням у тріщиноутворення більшого об'єму матеріалу. Процес розвитку мікротріщин визначається структурою асфальтобетону, зокрема розміром і числом дефектних місць, видом та режимом прикладеного навантаження.

Найбільш слабким місцем у структурі асфальтобетону є зона контакту між бітумом і зернами наповнювача. Міцність зчеплення залежить від хімічної активності бітуму, його в'язкості, шорсткості та чистоти поверхні щебеню, пористості асфальтобетону та ін.

### Висновки

На основі скінченно-елементного моделювання макроструктури асфальтобетону були розраховані концентрації напружень від пор та тріщин, що можуть виникати під час водонасичення, циклічного заморожування-відтавання та дії агресивного середовища.

Показано, що максимальне значення коефіцієнта концентрації напружень 4,85 спостерігається за температури 0 °С в гирлі тріщини, розташованій на границі розділу фаз «кам'яний матеріал – в'язуче».

Випадкові одиничні поверхневі тріщини впливають на значення модуля пружності асфальтобетону (в середньому приблизно 10 %), що необхідно враховувати під час проведення розрахунків конструкцій дорожнього одягу.

### Література

1. Garbacz A. Ultrasonic evaluation methods applicable to polymer concrete composites / Andrzej Garbacz, Edward J. Garboczi. – National institute of standards and technology (USA), 2003. – 68 p.
2. Christensen D. T. Bonaquist, Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. / D. T. Christensen, R. F. Pellinen // Journal of Association of Asphalt Paving Technologists. – 2003. – Vol. 72. – P. 97–121.
3. Радовский Б.С. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям / Б.С. Радовский, Б.Б. Телтаев. – Алматы: «Білім» баспасы, 2013. – 152 с.
4. You Z. Three-Dimensional Discrete Element Models for Asphalt Mixtures / Z. You, S. Adhikari, Q. Dai // Journal of Engineering Mechanics. – 2008. – Vol. 134(12). – P. 1053–1063.
5. Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3-218-186-2004 – [Чинний від 2005-01-01] – К.: Державна служба автомобільних доріг України «УКРАВТОДОР», 2004. – 137 с. – (Відомчі будівельні норми України).
6. Золотарёв В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В.А. Золотарёв. – Х.: Вища школа, 1997. – 116 с.

Рецензент: В.О. Золотарьов, професор, д.т.н., ХНАДУ.