

бетонов и других типов армирования, применение их в строительной практике, методики расчета таких конструкций с нетрадиционным армированием изучены и применяются недостаточно. Один из путей решения проблемы – замена традиционного армирования на нетрадиционное (например, на материалы биологического или органического происхождения, различные виды сеток и т.п.).

Представлены результаты экспериментально-теоретических исследований шлакогазобетонных изгибаемых элементов и указано на особенности их работы под нагрузкой.

Ключевые слова: комплексный легкобетонный элемент, газобетон, шлакобетон, нетрадиционное армирование, прочность, несущая способность, деформативность.

УДК 624.12

ВПЛИВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ ЛАЗЕРНОГО ОПРОМІНЕННЯ ЗА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНОГО РОЗТРИСКУВАННЯ БЕТОНУ

*І. Добрянський, д. т. н., професор, Л. Добрянська, к. е. н.,
А. Грицевич, старший викладач, О. Грицина, аспірант
Львівський національний аграрний університет*

Постановка проблеми. Вплив примусового охолодження на термонапружений стан у деформівних твердих тілах, що перебувають в умовах дії концентрованих теплових потоків, досліджено у працях [1–3], де встановлено умови, за яких суттєво відчутний вплив охолодження. Експериментальні дослідження температурних режимів показали, що за відсутності систем примусового охолодження тепловіддача у процесі короткочасного (для чисел Фур'є менше ніж десять) нагрівання становить менше 5% від загальної кількості тепла. Це припущення тим точніше, чим менше число Рейнольдса для повітряного потоку, яке обтікає тіло [4]. Треба відзначити, що адіабатичність вільної поверхні контактуючих тіл вносить найістотніші спрощення у процес розв'язку теплової задачі. Для оцінки максимальної величини критерію Біо $Bi = h_a / K$ за обтікання сфери радіуса R повітрям можна скористатися даними праці [4]. Коефіцієнт тепловіддачі h можна знайти за критерієм Нуссельта – $h = (K_b / R)Nu$, де $K_b = 0,025$ Вт/(м·К) – теплопровідність сухого повітря за температури 20 °С. Отже, $Bi = (K_b a / KR)Nu$. За вимушеної конвенції повітря критерій

Нуссельта є функцією числа Рейнольдса Re й виражається емпіричною залежністю [4]: $Nu = 2 + 0,027 Re^{0,54} + 0,312 Re^{0,58}$. Максимальне значення числа Рейнольдса, за дослідження фізичних процесів та технічних явищ у машинобудуванні, не перевищує 10^8 . За $Re = 10^8$ з формули для числа Нуссельта знаходимо $Nu = 1,41 \cdot 10^4$. Припускаючи, що сфера виготовлена з низьколегованої сталі зі середнім значенням коефіцієнта теплопровідності $K = 20$ Вт/(м·°C) і беручи до уваги, що за локального контакту в рамках теорії Герца $a/R < 0,1$, з виразу для числа Біо отримуємо, що $Bi < 1,8$. Зауважимо, що ця оцінка отримана із значним запасом у бік збільшення, оскільки, по-перше, теплопровідність більшості сталей вища за прийняту, по-друге, як правило, $Re < 10^6$.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд праць, у яких започатковано підходи до знаходження нестационарної температури і квазістатичних температурних напружень у півпросторі з неоднорідним тепловим потоком тепла, зазначено у [5]. У цих дослідженнях припускалося, що поверхня поза ділянкою контакту теплоізолювана. Однак врахування конвективного теплообміну точніше відображає проблему.

Постановка завдання. Наше завдання – розглянути процедуру побудови розв’язку задачі відповідної квазістатичної незв’язаної термопружності для півбезмежного тіла, що нагрівається рівномірно розподіленим тепловим потоком за змішаних граничних умов. Далі на цій основі подати підхід до розрахунку параметрів лазерного терморозтріскування, який використовує деякі критеріальні рівняння механіки крихкого руйнування. Для цієї мети на основі визначеного нестационарного розподілу температури необхідно мати квазістатичний термонапружений стан для півбезмежного тіла, що нагрівається у круговій ділянці граничної поверхні тепловим потоком з нормальним (гаусовим) розподілом потужності.

Виклад основного матеріалу. Для визначення нестационарного температурного поля $T(r, z, t)$ в системі у довільній точці $0 \leq r \leq \infty$, $0 \leq z \leq \infty$ та моменту часу $t > 0$ у припущенні, що теплофізичні властивості не залежать від температури, маємо рівняння нестационарної теплопровідності, нульову початкову умову, умови зникнення на безмежності та змішану граничну умову на поверхні

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} -q, & r \leq a, z = 0, \\ hT, & r > a, z = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Точний розв’язок відповідної задачі теплопровідності за заданої умови (1) не знайдено, і вирішення цієї проблеми в математичному аспекті досить

складне. Розглянемо побудову цієї задачі, використовуючи деякі припущення. Замінюємо умову (1) на таку:

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = -qH(a-r) + hT \text{ за } r \geq 0, z = 0. \quad (2)$$

Замінімо температуру у правій частині умови (2) в ділянці нагріву $0 \leq r \leq a$ середньою температурою в цій ділянці відповідно до формули

$$\theta = \frac{2}{a^2} \int_0^a T(r, 0, t) r dr \quad (3)$$

Тоді з використанням (3) матимемо таку умову:

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = -q + h\theta \text{ за } 0 \leq r \leq a, z = 0. \quad (4)$$

Умова (4) збігається з умовою (1) у ділянці нагріву з точністю до деякого сталого множника λ , який слід обрати із залежності

$$-q = \lambda(-q + h\theta) \quad (5)$$

Тоді на основі (5) матимемо

$$\lambda = \frac{1}{1 - h\theta/q} > 1 \quad (6)$$

Отже, наближений розв'язок вихідної змішаної задачі теплопровідності можна подати як

$$T(r, z, t) = \lambda T_0(r, z, t), \quad (7)$$

де $T_0(r, z, t)$ – розв'язок рівняння нестационарної теплопровідності за сформульованої граничної умови (2). Ввівши безрозмірні змінні $\rho = r/a$, $Z = z/a$, $F_0 = kt/a^2$, $\Lambda = q_0 a/K$, запишемо крайову задачу для знаходження розподілу $T_0(r, z, t)$

$$\frac{\partial^2 T_0}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T_0}{\partial \rho^2} + \frac{\partial^2 T_0}{\partial Z^2} = \frac{\partial T_0}{\partial F_0}, \quad \rho \geq 0, Z \geq 0, F_0 > 0, \quad (8)$$

$$T_0(r, z, 0) = 0, T_0(\infty, z, t) = T_0(r, \infty, t) = 0 \quad (9)$$

$$K \frac{\partial T_0}{\partial Z} = -\Lambda H(1 - \rho) + \text{Bi} T_0 \text{ за } \rho \geq 0, Z = 0, \quad (10)$$

Із (6) отримуємо $\lambda = \frac{1}{1 - \text{Bi}\theta/\Lambda} > 1$, причому згідно зі залежністю (3)

матимемо

$$\theta = 2 \int_0^1 T(r, 0, t) \rho d\rho. \quad (11)$$

Розв'язок сформульованої крайової задачі (8) – (10) може бути побудованим із використанням інтегральних перетворень: застосування інтегрального перетворення Ганкеля за радіальною координатою ρ та інтегрального перетворення Фур'є з узагальненим тригонометричним ядром за змінною Z виду $N(Z, \zeta) = \zeta \cos(\zeta Z) + Bi \sin(\zeta Z)$ [6; 7] забезпечує такий вираз для розв'язку вихідної крайової задачі (8) – (10)

$$T_0(r, z, t) = \Lambda \int_0^{\infty} \xi \varphi(\xi) \Phi_0(\xi, Z, Fo) J_0(\xi \rho) d\xi, \quad (12)$$

$$\text{де } \Phi_0(\xi, Z, Fo) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^{\infty} \frac{N(Z, \zeta)}{\zeta^2 + Bi^2} \tilde{\Phi}_0(\xi, \zeta, Fo) d\zeta.$$

Отже, розв'язок (12) змішаної задачі теплопровідності, записаний у вигляді інтеграла Ганкеля, містить деяку невідому поки що функцію, яка у свою чергу записується як інтеграл Фур'є. Використовуючи довідкові дані для обчислення інтегралів [8] та формулюючи відповідну задачу згідно з методикою, поданою у працях [3; 6], отримуємо такий вираз:

$$\begin{aligned} \Phi_0(\xi, Z, Fo) = & \frac{1}{2} \left[\frac{e^{-\xi Z}}{Bi + \xi} \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{Fo}} - \xi \sqrt{Fo} \right) + \right. \\ & \left. + \frac{e^{\xi Z}}{Bi - \xi} \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{Fo}} + \xi \sqrt{Fo} \right) \right] - \\ & - \frac{Bi e^{BiZ}}{Bi^2 - x^2} e^{-Bi^2 - x^2 Fo} \operatorname{erfc} \left(\frac{Z}{2\sqrt{Fo}} + Bi \sqrt{Fo} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Стационарна температура в центрі круга нагрівання ($\rho = 0, Z = 0$) на основі співвідношень (11) – (13) визначається так:

$$T_0(0, 0, \infty) = \Lambda \int_0^{\infty} \frac{J_1(\xi)}{Bi + \xi} d\xi = \Lambda \left\{ 1 + \frac{1}{Bi} + \frac{\pi}{2} [Y_1(Bi) - H_1(Bi)] \right\}.$$

Сталий множник, який залежить від параметра Bi та значення усередненої температури в ділянці нагріву, знаходився на основі отриманих співвідношень чисельним шляхом.

Перемноженням знайденої температури (12), що відповідає випадку теплообміну на всій граничній поверхні, на множник λ отримуємо шуканий температурний розподіл, який відповідатиме розв'язку вихідної змішаної задачі без урахування теплообміну в ділянці нагріву.

Під час знаходження відповідного термонапруженого стану, зумовленого нестационарним температурним розподілом (12), застосовуємо

залежності осесиметричної квазістатичної задачі термопружності [9], де напруження виражаються через термопружний потенціал переміщень Ψ та функцію Лява L . Повне поле квазістатичних температурних напружень σ_{ij}^t отримуємо суперпозицією напружень, що відповідають потенціалу переміщень Ψ та функції Лява. Після проведення необхідних перетворень подамо їх вирази у вигляді

$$\sigma_{ij}^* = \int_0^{\infty} \phi(\xi) S_{ij}(\xi, \rho, Z, F_0) d\xi - T^* \varepsilon_{ij}, \quad (14)$$

причому величини $S_{ij}(\xi, \rho, Z, F_0)$ визначаються через дві функції – $\Phi_1(\xi, Z, F_0)$ і $\Phi_2(\xi, Z, F_0)$, які визначені у праці [3].

Метод керованого лазерного терморозколювання отримав теоретичне обґрунтування у працях [10; 11]. Розрахункова схема методу має такий вигляд: визначається температурне поле, що виникає в результаті опромінення поверхні термопружного тіла тепловим потоком, який діє на ділянці радіусом a граничної поверхні; з умови перевищення градієнтом температур значення термостійкості матеріалу визначаються оптимальні параметри процесу лазерного терморозтріскування, такі, наприклад, як відстань від границі лазерної плями до фронту охолодження тощо.

Подана математична модель осесиметричної квазістатичної задачі термопружності з урахуванням конвективного теплообміну з навколишнім середовищем використана для числового моделювання терморозтріскування конструктивних матеріалів.

У побудові чисельного алгоритму вивчення зародження зон передруйнування і терморозтріскування звичайного бетону (вид **I**, $\sigma_c = 30$ МПа) та бетону підвищеної міцності (вид **II**, $\sigma_c = 65$ МПа) використовували числові дані термопружних параметрів, запозичених з праці [12]. В обчисленнях приймали, що густина теплового потоку, емітованого лазером, змінювалася за нормальним законом, а коефіцієнт теплового поглинання становив $A = 0,6$ [13].

Як показують числові дослідження головних напружень, обчислених із використанням залежностей (14), напруження σ_1 додатне, тобто розтягувальне, і сягає свого найбільшого значення в точці $z \approx 0,1$ мм; тоді як головне напруження σ_3 стискальне в зоні $0 \leq z \leq 0,06$ мм, і для значень глибини $z > 0,06$ мм воно повністю зникає.

Підставляючи величини σ_1 і σ_3 у критеріальні рівняння [14; 15] і здійснюючи відповідні розрахунки, встановлено, що виникає три зони

напруженого стану, зумовлені лазерним опроміненням. У ділянці $0 \leq z \leq 0,02$ мм, безпосередньо під нагрітою поверхнею, напружений стан визначається умовою McClintock-Walsh, тобто руйнуванням стиску. У зоні $0,02 \leq z \leq 0,05$ мм визначальними є зсувні напруження відповідно до модифікованого критерію Griffith. Ділянка розтягальних напружень розміщується нижче за $z > 0,05$ мм; у цій ділянці використовують класичний критерій Griffith.

Для набору параметрів, який використовується за числового аналізу, дія розтягальних напружень виявляється в зоні $z > 0,05$ мм, і при цьому визначальними в оцінці стану передруйнування є головні напруження.

У межах зони розтягу ($z > 0,05$ мм) поверхня, якою відбувається розколювання, відповідає тій координаті за глибиною, де головне напруження сягає межі міцності конкретного матеріалу. Оскільки попереднє зростання тріщини відбувається за нормаллю до напрямку дії основного головного напруження, то поверхні однакового рівня напружень, які саме є перпендикулярними до напрямку дії головного напруження в кожній точці бетонного масиву, становлять поверхні, якими відбувається відколювання. Величина приведенного головного напруження спадає з глибиною, тому криві еквівалентних напружень в умовах одноосного деформування за розтягу бетону визначають максимально можливе поширення тріщини.

Висновки. Розвинута модель терморозтріскування підтверджує, що процеси термовідколювання можливі лише на початкових стадіях нагрівання в ділянці зони центру плями нагріву. Відколювання складових бетону в напрямі від кратера може посилюватися за подальшого опромінення лазером. Числовий аналіз показав, що температура в ділянці зони дії лазера може сягати значень кількох тисяч градусів за Цельсієм, що істотно перевищують відповідні величини температур фазового переходу складових бетону. Отож, відколювання матеріалу можливе на площі діаметром від 1 до 2 мм.

Отримані результати можуть бути основою подальшого вивчення ефектів дії лазерних джерел у процесах термообробки будівельних матеріалів та конструкцій.

Бібліографічний список

1. Галазюк В. А. Нестационарный фрикционный разогрев выступов микронеровностей скользящего контакта / В. А. Галазюк, А. А. Евтушенко, И. Н. Турчин // Инж.-физ. журн. – 1996. – Т. 69, № 5. – С. 768–772.
2. Gecim B. Steady temperature in a rotating cylinder subject to the surface heating and convective cooling / B. Gecim, W. O. Winer // J. Tribology. Trans. ASME. – 1984. – V. 106, № 1. – P. 120–127.

3. Евтушенко А. А. Влияние конвективного охлаждения на температуру и напряженное состояние при торможении / А. А. Евтушенко, Е. Г. Иваник, Н. В. Горбачева // Трение и износ. – 1997. – Т. 18, № 5. – С. 578–587.
4. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – М. : Атомиздат, 1979. – 228 с.
5. Євтушенко О. О. Аналітичні методи теплового розрахунку гальм (огляд робіт) / О. О. Євтушенко, Є. Г. Іваник, Н. В. Горбачова // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – № 6. – С. 52–56.
6. Галицын А. С. Интегральные преобразования и специальные функции в задачах теплопроводности / А. С. Галицын, А. Н. Жуковский. – К. : Наук. думка, 1976. – 282 с.
7. Снеддон И. Преобразования Фурье / И. Снеддон. – М. : Изд-во иностр. лит., 1955. – 668 с.
8. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М. : Наука, 1986. – 1108 с.
9. Новацкий В. Вопросы термоупругости / В. Новацкий. – М. : Изд-во АН СССР, 1962. – 364 с.
10. Миркин Л. И. Физические основы обработки материалов лучами лазера / Л. И. Миркин. – М. : Изд-во МГУ, 1975. – 383 с.
11. Структура и прочность материалов при лазерных воздействиях / [М. С. Бахарев, Л. И. Миркин, С. А. Шестериков и др.]. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 224 с.
12. Sala A. Radiant properties of materials / A. Sala. – Warsaw : Polish Sci. Publ., 1986. – 479 p.
13. Roźniakowski K. Some experimental results of laser beam interaction with surface layer of brick / K. Roźniakowski, P. Klemm, A. J. Klemm // Building and Environment. – 2000. – Vol. 36, № 4. – P. 485–491.
14. Griffith A. A. The theory of rupture / A. A. Griffith // Proc. 1st Int. Congr. Appl. Mech., Delft. – 1924. – P. 55–63.
15. McClintock F. A. Friction of Griffith cracks in rock under pressure / F. A. McClintock, J. B. Walsh // Proc. 4th U.S.Nat. Congr. Appl. Mech. Berkeley.

Добрянський І., Добрянська Л., Грицевич А., Грицина О. Вплив конвективного теплообміну лазерного опромінення за дослідження термічного розтріскування бетону

Запропоновано методику побудови розв'язку задачі квазістатичної термопружності для тіла за змішаних граничних умов, що піддається нагріванню в обмеженій ділянці граничної поверхні тепловим потоком. На основі побудованого розв'язку розвинуто підхід до розрахунку параметрів терморозтріскування, який використовує критеріальні рівняння (Грифітса та МакКлінтока-Велша) механіки крихкого руйнування. Схема апробована на бетонних зразках двох типів з різною міцністю на стиск.

Ключові слова: температура, температурні напруження, концентровані теплові потоки, критеріальні рівняння механіки крихкого руйнування, бетон.

Dobrzajnskyj I., Dobrzajnska L., Grytsevych A., Grytsyna O. The effect of convective heat transfer of laser irradiation study on thermal cracking of concrete

The method of solving the quasi-static thermoelasticity problem for body under variable boundary conditions is suggested. This body is subjected to heating by heat flow in the restricted domain of boundary surface. Because of such solving an approach to calculating of the parameters of thermocracking which uses the criterial equations of brittle fracture (Griffiths and McClintock-Welsh) is developed. The scheme was approved on concrete samples of two types having different compressive strength.

Key words: temperature, thermal stress, concentrated heat flows, criterial equations of brittle fracture mechanics, concrete.

Добрянський І., Добрянська Л., Грыцевыч А., Грицина О. Влияние конвективного теплообмена лазерного облучения исследование термического растрескивания бетона

Предложена методика построения решения задачи квазистатической термоупругости для тела при смешанных граничных условиях, подвергшегося нагреву в ограниченном участке граничной поверхности тепловым потоком. На основе построенного решения развит подход к расчету параметров терморастрескивания, который использует критериальные уравнения (Грифитса и МакКлинтока-Уэлша) механики хрупкого разрушения. Схема апробирована на бетонных образцах двух типов с разной прочностью на сжатие.

Ключевые слова: температура, температурные напряжения, концентрированные тепловые потоки, уравнения механики хрупкого разрушения, бетон.