

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНІ ТА ЧИСЛОВІ МЕТОДИ В МЕХАНІЦІ ТА ФІЗИЦІ РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

УДК 539.3

МЕТОД РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОНКИХ КРИВОЛІНІЙНИХ ПЛИТ

М. Делявський, д.т.н.

Технологічно-природничий університет в Бидгощі, Польща,

К. Росіньські,

Будівельна Група Альсталь, Польща

Постановка проблеми. Сьогодні загальноприйнятим і найпоширенішим методом розрахунку конструкцій є метод скінченних елементів (МСЕ), який належить до групи чисельних методів. У дослідженні запропоновано інший метод [1-3] розрахунку конструкцій, так званий метод макроелементів (ММЕ). Зазначені методи різняться між собою:

1) способами дискретизації конструкції. Згідно з МСЕ, конструкцію ділимо на багато дрібних частин (скінченних елементів), які позбавлені механічного сенсу. Натомість за використання опрацьованого методу конструкцію розділяємо на досить великі частини – макроелементи. Макроелементи – то частини реальних конструкцій або їх певні узагальнення;

2) підходами до вирішування проблеми. Метод скінченних елементів базується на глобальному підході механіки деформівного твердого тіла (з використанням варіаційних підходів). Метод макроелементів базується на підході локальному, пов'язаному з розв'язуванням диференціальних рівнянь теорії пружності;

3) способами розрахунку конструкцій. У МСЕ кінематичні краєві умови необхідно задовольнити заздалегідь, а рівняння рівноваги і статичні краєві умови задовольняються одночасно, причому наближено (варіаційним чином) у процесі розв'язку задачі. У ММЕ рівняння рівноваги задовольняються точно, а статичні й кінематичні краєві умови в окремих спеціально вибраних вузлах на контурі плити;

4) способом вибору вузлів. У МСЕ положення вузлів визначається сіткою поділу конструкції на скінченні елементи й може змінюватися у процесі дискретизації конструкції. Натомість в опрацьованому методі

вузлами є нульові точки тригонометричних функцій, що входять до моделі макроелемента. Їх положення не залежить від способу дискретизації;

5) точністю розв'язку. У методі скінченних елементів підвищення точності розрахунку конструкції досягають здебільшого за рахунок згущення сітки поділу конструкції на скінченні елементи, а також за рахунок використання точніших моделей скінченних елементів. В опрацьованому підході точність розрахунку зростає завдяки збільшенню числа апроксимацій розв'язку.

Спільним для зазначених підходів є зведення розрахунку конструкції до системи лінійних алгебраїчних рівнянь типу

$$[M]\{q\} + \{P\} = \{0\}. \quad (1)$$

Однак сенс таких рівнянь у цих підходах різний. У методі скінченних елементів – це система рівнянь рівноваги, записана в усіх вузлах розглядуваної конструкції, а в методі мікроелементів – система рівнянь нерозривності переміщень і внутрішніх сил, записана як *краєві* умови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У попередніх публікаціях пропонований метод було застосовано тільки до розрахунку прямокутних плит під косинусоїдальним навантаженням для різних умов опирання. Зокрема розглянуті консольна плита і плита, складена з двох прямокутних плит. Проведені числові розрахунки показали високу точність розв'язків і підтвердили ефективність пропонованого методу.

Постановка завдання. Завдання дослідження – запропонувати метод розрахунку напружено-деформованого стану тонких криволінійних плит під довільним навантаженням для різних краєвих умов. На відміну від методу скінченних елементів, опрацьований метод є аналітико-числовим. Розв'язок отримано повністю в аналітичному вигляді. Задача зведена до системи алгебраїчних рівнянь, і вже на цьому етапі застосовується обчислювальна техніка.

Виклад основного матеріалу. Для визначення плитового мікроелемента розглянемо тонку ізотропну плиту довільної конфігурації, контур якої цілком уміщається у прямокутник (рис. 1).

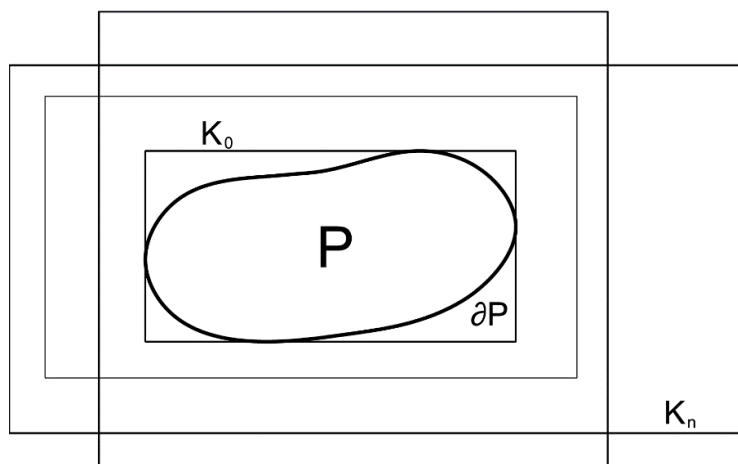


Рис. 1. Контур криволінійної плити, обмежений послідовністю прямокутників

Позначимо цей контур K_n . Очевидно, що він може мати нескінченну кількість спільних точок із контуром реальної плити (якщо вона прямокутна й тих самих розмірів, що й контур K_n), скінченну кількість спільних точок, або взагалі їх не мати. Безумовно, що таких контурів нескінченна кількість. Кожен із них буде описаний довкола контуру реальної плити. Розглянемо послідовність $\{K_n\}$. Нижню границю цієї послідовності $\inf\{K_n\}$ позначимо K_0 і назовемо базовим контуром плити [4]. Прямокутну ділянку, обмежену контуром K_0 , назовемо фізичною моделлю реальної плити. Фізична модель є базовою для всіх плит певного класу. У цій моделі нехтуємо конфігурацією плити і враховуємо лише механічні властивості матеріалу.

Поєднання фізичної моделі плити з її математичним аналогом називаємо плитовим макроелементом.

Побудова математичної моделі прямокутної плити. Розглянемо тонку прямокутну ізотропну плиту товщиною h і розмірами в плані $2a_j$, ($j = 1, 2$). Плита належить до декартової системи координат $Ox_1x_2x_3$ з початком у геометричному центрі плити. Вісь Ox_3 є спрямована донизу, а осі Ox_2 і Ox_1 лежать у серединній площині плити, утворюючи праву систему координат.

Верхня сторона плити завантажена довільно розподіленим навантаженням інтенсивності $q(x_1, x_2)$, нижня – вільна від навантажень (рис. 2).

В основу математичної моделі такої плити закладено точний розв'язок основного диференціального рівняння згину тонких ізотропних плит:

$$\nabla^2 \nabla^2 w = \frac{q}{D}, \quad (2)$$

де w – прогин плити; D – жорсткість плити на згин.

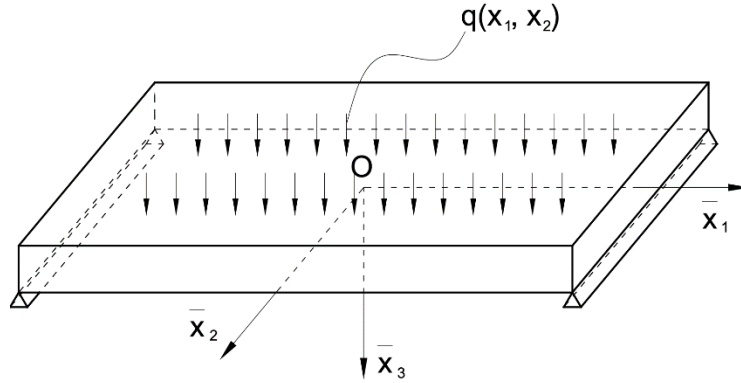


Рис. 2. Схема прямокутної плити

Загальний розв'язок рівняння (2) вибираємо у вигляді суми двох розв'язків:

$$w = w_0 + w_*, \quad (3)$$

а саме загального розв'язку w_0 однорідного рівняння (4)

$$\nabla^2 \nabla^2 w = 0 \quad (4)$$

і часткового розв'язку w_* неоднорідного рівняння (2).

Загальний розв'язок $w_0(x_1, x_2)$ однорідного рівняння (4) вибираємо у вигляді [4]:

$$w_0 = A_i \Phi_i(x_1, x_2) + f_{kp}^{[j]}(x_j) \cdot T_{kp}^{[3-j]}(x_{3-j}), \quad (5)$$

де $\Phi_i(x_1, x_2)$ – задані функції

$$\begin{aligned} \Phi_0(x_1, x_2) &= 1; & \Phi_1(x_1, x_2) &= \frac{x_1}{a_1}; & \Phi_2(x_1, x_2) &= \frac{x_2}{a_2}; \\ \Phi_3(x_1, x_2) &= \frac{x_1 x_2}{a_1 a_2}; & \Phi_4(x_1, x_2) &= \frac{x_1^2}{a_1^2}; & \Phi_5(x_1, x_2) &= \frac{x_2^2}{a_2^2}; \\ \Phi_6(x_1, x_2) &= \frac{x_1^2 x_2}{a_1^2 a_2}; & \Phi_7(x_1, x_2) &= \frac{x_1 x_2^2}{a_1 a_2^2}; & \Phi_8(x_1, x_2) &= \frac{x_1^3}{a_1^3}; \\ \Phi_9(x_1, x_2) &= \frac{x_2^3}{a_2^3}; & \Phi_{10}(x_1, x_2) &= \frac{x_1 x_2^3}{a_1 a_2^3}; & \Phi_{11}(x_1, x_2) &= \frac{x_1^3 x_2}{a_1^3 a_2}; \\ \Phi_{12}(x_1, x_2) &= \frac{x_1^4 - x_2^4}{a_1^4}. \end{aligned} \quad (6)$$

Тут A_i ($i = 0 \div 12$) – невідомі коефіцієнти; а $f_{kp}^{[j]}(x_j)$ – невідомі функції, які визначають у процесі розв'язку задачі. Натомість $T_{kp}^{[j]}(x_j)$ задані тригонометричні функції типу:

$$\begin{aligned} T_{k1}^{[j]}(x_j) &= \cos(\gamma_k^{[j]} x_j); & T_{k2}^{[j]}(x_j) &= \cos(\delta_k^{[j]} x_j); \\ T_{k3}^{[j]}(x_j) &= \sin(\delta_k^{[j]} x_j); & T_{k4}^{[j]}(x_j) &= \sin(\gamma_k^{[j]} x_j); \end{aligned} \quad (7)$$

$$\delta_k^{[1]} = \frac{(2k-1)\pi}{2a_1}; \quad \delta_k^{[2]} = \frac{(2k-1)\pi}{2a_2}, \quad (8)$$

$$\gamma_k^{[1]} = \frac{k\pi}{a_1}; \quad \gamma_n^{[2]} = \frac{k\pi}{a_2};$$

де $k = 1 \div K$, K – кількість наближень розв'язку.

Підставляючи представлення (5) до однорідного рівняння (4), отримуємо систему двох незв'язаних звичайних однорідних диференціальних рівнянь четвертого порядку відносно невідомих функцій

$$\begin{aligned} f_{kp}^{[j]}(x_j) \\ f_{kp}^{[1]^{(IV)}}(x_1) - 2\kappa_{kp}^{[2]^2} f_{kp}^{[1]''}(x_1) + f_{kp}^{[1]}(x_1) = 0; \\ f_{kp}^{[2]^{(IV)}}(x_2) - 2\kappa_{kp}^{[1]^2} f_{kp}^{[2]''}(x_2) + \kappa_{kp}^{[1]^4} f_{kp}^{[2]}(x_2) = 0; \end{aligned} \quad (9)$$

$p, q = 1 \div 4$; $m, n = 1 \div \infty$,
де

$$\kappa_{kp}^{[j]} = \begin{cases} \gamma_k^{[j]}, & p = 1, 3, \\ \delta_k^{[j]}, & p = 2, 4. \end{cases} \quad (10)$$

Тут і далі використано право сумування Ейнштейна: у кожному виразі проводиться сумування згідно з індексом, який повторюється двічі.

Розв'язок цієї системи рівнянь обираємо у вигляді [5]:

$$f_{kp}^{[j]}(x_j) = R_{kp}^{[j]} E_{kp}^{[j]}(x_j), \quad (11)$$

де $R_{kp}^{[j]}$ – невідомі параметри, які визначають із краєвих умов на контурі плити:

$$E_{kp}^{[j]}(x_j) = \exp(\lambda_k^{[j]} x_j),$$

$\lambda_k^{[j]}$ – корені характеристичних рівнянь:

$$\begin{aligned} \lambda_k^{[1]^4} - 2\kappa_{kp}^{[2]^2} \lambda_k^{[1]^2} + \kappa_{kp}^{[2]^4} &= 0; \\ \lambda_k^{[2]^4} - 2\kappa_{kp}^{[1]^2} \lambda_k^{[2]^2} + \kappa_{kp}^{[1]^4} &= 0; \end{aligned} \quad (12)$$

Ці рівняння містять два подвійні протилежні за знаком корені й у результаті функції (11) набувають вигляду

$$f_{pk}^{[j]}(x_j) = R_{pk}^{[j]} B_{pk}^{[j]}(x_j), \quad v = 1 \div 4. \quad (13)$$

Функції

$$\begin{aligned} B_{kp1}^{[j]}(x_j) &= \frac{\cosh(\kappa_{kp}^{[j]} x_j)}{\exp(\kappa_{kp}^{[j]} a_j)}, & B_{kp2}^{[j]}(x_j) &= \frac{x_j \sinh(\kappa_{kp}^{[j]} x_j)}{a_j \exp(\kappa_{kp}^{[j]} a_j)}, \\ B_{kp3}^{[j]}(x_j) &= \frac{\sinh(\kappa_{kp}^{[j]} x_j)}{\exp(\kappa_{kp}^{[j]} a_j)}, & B_{kp4}^{[j]}(x_j) &= \frac{x_j \cosh(\kappa_{kp}^{[j]} x_j)}{a_j \exp(\kappa_{kp}^{[j]} a_j)}, \end{aligned} \quad (14)$$

названо базовими функціями розв'язку,

$$\kappa_{kp}^{[j]} = \begin{cases} \gamma_k^{[j]}, & p = 1, 3, \\ \delta_k^{[j]}, & p = 2, 4. \end{cases} \quad (15)$$

Очевидно, що $B_{k1v}^{[j]}(x_j) = B_{k4v}^{[j]}(x_j)$, а $B_{k2v}^{[j]}(x_j) = B_{k3v}^{[j]}(x_j)$. Враховуючи залежності (3), (5), (13), запишемо вираз на прогин плити у формі

$$w(x_1, x_2) = A_r \varphi_r(x_1, x_2) + R_{kpv}^{[j]} W_{kpv}^{[j]}(x_1, x_2) + w_*(x_1, x_2) \quad (16)$$

Функції

$$W_{kpv}^{[j]}(x_1, x_2) = B_{kpv}^{[j]}(x_j) T_{kp}^{[3-j]}(x_{2-j}) \quad (17)$$

названо координатними функціями прогину плити. Частковий розв'язок $w_*(x_1, x_2)$, який залежить від навантаження, названо силовими функціями прогину [6].

Маючи вираз прогину плити на підставі відомих у теорії плит співвідношень між прогином плити і переміщеннями, моментами та поперечними силами, останні виражаємо через власні координатні та силові функції.

Побудова часткового розв'язку неоднорідного рівняння (2).

Оскільки частковий розв'язок неоднорідного рівняння (2) залежить від навантаження, то його слід апроксимувати певною функцією. Цю функцію пропонується обирати в такому вигляді:

$$q(x_1, x_2) = Q_0 + P_{mp} T_{mp}^{[1]}(x_1) + Q_{nq} T_{nq}^{[2]}(x_2) + Q_{mnpq} T_{mp}^{[1]}(x_1) \cdot T_{nq}^{[2]}(x_2), \quad (18)$$

де $Q_0, P_{mp}, Q_{nq}, Q_{mnpq}$ – коефіцієнти розвинення навантаження $q(x_1, x_2)$ в одинарні та подвійні тригонометричні ряди.

Функції $T_{mp}^{[j]}(x_j)$ визначаються формулами (7), (8).

У подібному вигляді обираємо частковий розв'язок рівняння (1):

$$w_*(x_1, x_2) = A_0(x_1^4 + 6x_1^2x_2^2 + x_2^4) + A_{mp} T_{mp}^{[1]}(x_1) + B_{nq} T_{nq}^{[2]}(x_2) + C_{mnpq} W_{mnpq}^*(x_1, x_2), \quad (19)$$

де $W_{mnpq}^*(x_1, x_2) = T_{mp}^{[1]}(x_1) \cdot T_{nq}^{[2]}(x_2)$.

Невідомі коефіцієнти C_{mnpq} визначаємо з розв'язку рівняння (2). Для цього підставляємо функцію (19) до рівняння (2), і прирівнюючи коефіцієнти за однакових функцій тригонометричних, приходимо до системи алгебраїчних рівнянь, з якої виражаємо невідомі коефіцієнти розв'язку через довільні коефіцієнти навантаження.

Далі ці коефіцієнти виражаємо через навантаження, прикладене до поверхні макроелемента. Для цього на осях симетрії макроелемента наносимо точки з координатами \bar{x}_j (рис. 3), які є нулями функцій тригонометричних $T_{mp}^{[j]}(x_j)$ для заданої апроксимації K . Назвемо їх нульовими точками. Положення цих точок визначаємо за формулами:

$$\cos \gamma_k^{[j]} x_j = \cos \frac{K\pi}{a_j} x_j = 0, \quad (20)$$

звідси
 $\frac{K\pi}{a_j} \bar{x}_j = \frac{(2n-1)\pi}{2}, \quad \bar{x}_j = \frac{(2n-1)\pi}{2K} a_j,$

$$\cos \delta_k^{[j]} x_j = \cos \frac{(2K-1)\pi}{2a_j} x_j = 0, \quad (21)$$

звідси
 $\frac{(2K-1)\pi}{2a_j} \bar{x}_j = \frac{(2n-1)\pi}{2}, \quad \bar{x}_j = \frac{(2n-1)\pi}{2K-1} a_j,$

$$\sin \gamma_k^{[j]} x_j = \sin \frac{K\pi}{a_j} x_j = 0, \quad (22)$$

звідси
 $\frac{K\pi}{a_j} \bar{x}_j = n\pi, \quad \bar{x}_j = \frac{n}{K} a_j,$

$$\sin \delta_k^{[j]} x_j = \sin \frac{(2K-1)\pi}{2a_j} x_j = 0, \quad (23)$$

звідси
 $\frac{(2K-1)\pi}{2a_j} \bar{x}_j = (n-1)\pi, \quad \bar{x}_j = \frac{2(n-1)}{2K-1} a_j.$

Тут n змінюється від 1 до K . Нульові точки парних тригонометричних функцій розміщуємо на додатніх півосях і приймаємо їх координати із знаком „+”. Натомість нульові точки непарних функцій розміщуємо на від’ємних півосях і приймаємо їх координати із знаком „-”.

Отож, для заданої апроксимації K кожна тригонометрична функція має K нульових пунктів, які, за винятком функції $\sin \delta_k^{[j]} x_j$, для $n = 1$ не збігаються з початком системи координат. Для цієї функції пропонується такий вибір нульових точок

$$\bar{x}_j = \begin{cases} \frac{1}{2K} a_j, & n = 1 \\ \frac{2(n-1)}{2K-1} a_j, & n > 1 \end{cases} \quad (24)$$

Далі через нульові точки проводимо лінії, паралельних до координатних осей. Назвемо їх нульовими лініями, а точки їх перетину – вузлами. Саме до вузлів прикладаємо навантаження, розподілене на поверхні реальної плити. До поверхні плити-доповнювача прикладаємо тільки нульове навантаження. Прирівнюючи значення функції в усіх вузлах на поверхні макроелемента до значення зовнішнього навантаження в тих самих точках, доходимо до системи рівнянь, з яких визначаємо невідомі коефіцієнти навантаження.

Задоволення краєвих умов. Краєві умови задовольняємо у вузлах, які є точками перетину нульових ліній із контуром плити (рис. 3).

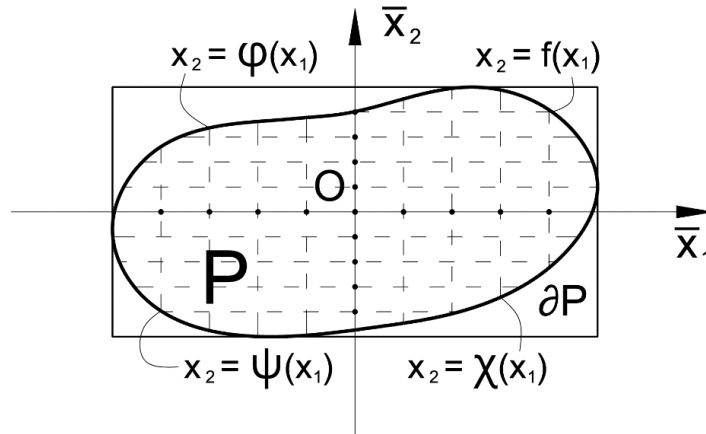


Рис. 3. Реальна плита, доповнена до мікроелемента

Для K -ї апроксимації маємо $16K$ вузлів, які розміщуємо по обидва боки від осей симетрії макроелемента. Крім того, необхідно задати краєві умови в точках перетину цих осей із контуром плити. У кожному вузлі записуємо по дві краєві умови. Для першої апроксимації краєві умови записуємо одразу в шістнадцяти точках.

Якщо ж задача симетрична, то додатково належить накласти умови рівності нулю кутів поворотів нормалей і крутильних моментів у точках перетину контуру плити з осями симетрії макроелемента. Зайві коефіцієнти приймаємо такими, що дорівнюють нулю.

Розв'язуючи отриману систему рівнянь, визначаємо невідомі коефіцієнти, що входять до формули (16) для визначення прогину плити, а далі знаходимо переміщення, моменти і поперечні сили у плиті.

Висновки. Розроблено новий підхід до розрахунку криволінійних плит, названий методом макроелементів. Переміщення, моменти і поперечні сили в плиті виражають через власні координатні й силові функції.

На відміну від методу скінченних елементів, в опрацьованому підході точно задовольняються рівняння рівноваги, а краєві умови – в нульових точках тригонометричних функцій, що суттєво підвищує точність розв'язку.

Бібліографічний список

1. Delyavskyy M. Rozwiązanie konstrukcji inżynierskich w ujęciu makroelementowym. Wybrane zagadnienia konstrukcji i materiałów budowlanych oraz geotechniki / M. Delyavskyy, K. Rosiński. – Wyd : UTP w Bydgoszczy, 2015. – S. 37-44.

2. Delyavskyy M. Rozwiązanie cienkich płyt żelbetowych metodą elementów konstrukcyjnych / M. Delyavskyy, A. Niespodziana, D. Buchaniec. – SCIENTARIUM POLONORUM ACTA : Architektura, 2011. – S. 3-14.
3. Delyavskyy M. Analiza statyczna cienkich płyt ortotropowych w ujęciu macierzowym / M. Delyavskyy, J. Gołaś, M. Olejniczak. – Zagadnienia Mechaniki Stosowanej, 2013. – S. 9-22.
4. Delyavskyy M. Analiza statyczna złożonych konstrukcji płytowych w ujęciu makroelementowym / M. Delyavskyy, K. Rosiński. – Czasopismo Inżynierii Ładowej, Środowiska i Architektury : Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, Kwartalnik. – T. XXXIII. Zeszyt 63. – (№ 1/1/2016). Styczeń –marzec. Rzeszów 2016. – S. 397-404.
5. Визначення напружено-деформованого стану в тонких ортотропних плитах на пружній основі Вінклера / М. Делявський, Н. Здолбіцька, Л. Онишко, А. Здолбіцький // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2014. – № 6. – С. 15-22.
6. Делявський М. В. Метод конструкційних елементів у розрахунку плит складної конфігурації на пружній основі / М. В. Делявський, Н. В. Здолбіцька, А. П. Здолбіцький. – Луцьк : ЛНТУ, 2012.

Делявський М., Росіньські К. Метод розрахунку напружено-деформованого стану тонких криволінійних плит

Запропоновано метод розрахунку тонких непрямокутних плит, названий методом макроелементів. Розглядається тонка плита товщини h і послідовність прямокутників, кожен з яких цілком містить у собі контур реальної плити. Макроелементом є прямокутна плита мінімальних розмірів, контур якої цілком покриває реальну плиту. Нижня границя цієї послідовності названа базовим контуром і позначена через K_0 . Реальна плита доповнена до прямокутної ділянки, обмеженої контуром L_0 , названа базовою плитою. Поєднання базової плити та її математичного аналогу названо макроелементом плитовим. Рівняння рівноваги виконуються для макроелемента, а граничні умови всередині макроелемента на лініях, що відповідають контуру розглядуваної плити. Граничні умови записують у вузлах, які є нульовими точками тригонометричних функцій, що входять до моделі макроелемента.

Ключові слова: метод, макроелементи, математична модель, плита, нульові точки, координатні та силові функції.

Delyavskyy M., Rosiński K. The method to solving of stress and strain state in curve linear thin plates

New approach to solving of thin nonrectangular plates, called the macroelement method has been developed in this paper. There is considered thin plate having a thickness h and a series of rectangles, each of them completely

contains the real contour of the plate. The lower bound of this sequence is contour K_0 of the plate macroelement. Plate macroelement is connection of the real plate P and its addition to the rectangular area bounded by contour K_0 . This plate is named as basic one.

The equilibrium equations are performed for macroelement and boundary conditions are wrote on the line corresponding to contour of real plate in the nodes which are zero points of trigonometric functions, included in the model.

Key words: method, macroelements, mathematical model, plate, zero of a function, shape and force functions

Делявский М., Росиньски К. Метод расчета напряженно-деформированного состояния тонких криволинейных плит

Предложен метод расчета тонких непрямоугольных плит, назван методом макроэлементов. Рассматриваются тонкая плита толщины h и последовательность прямоугольников, каждый из которых вполне содержит в себе контур реальной плиты. Макроэлементом является прямоугольная плита минимальных размеров, контур которой полностью покрывает реальную плиту. Нижняя граница этой последовательности названа базовым контуром и обозначена через K_0 . Реальная плита дополнена в прямоугольной области ограниченной контуром L_0 , названа базовой плитой. Сочетание базовой плиты и ее математического аналога названы макроэлементом плитовым. Уравнения равновесия выполняются для макроэлемента, а граничные условия – внутри макроэлемента на линиях, соответствующие контуру рассматриваемой плиты. Граничные условия записываются в узлах, которые являются нулевыми точками тригонометрических функций, входящих в модель макроэлемента.

Ключевые слова: метод, макроэлементы, математическая модель, плита, нулевые точки, координатные и силовые функции.

УДК 624.07:614.8

**ВПЛИВ ХАРАКТЕРУ ЗМІНИ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
БЕТОНУ НА ТЕМПЕРАТУРНІ ПОЛЯ КОНСТРУКЦІЙ
ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ ЇХ ВОГНЕСТІЙКОСТІ**

*Ю. Боднар, к.т.н., В. Бар, магістр, Р. Мазурак
Львівський національний аграрний університет*

Постановка проблеми. Важливим параметром будівельної конструкції, зокрема залізобетонної, є її межа вогнестійкості. Її можна визначити за