

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОПЕРЕЧНОГО ПРОФІЛЮ ЖОРСТКОГО АЕРОДРОМНОГО ПОКРИТТЯ МІЖНАРОДНОГО АЕРОПОРТУ «ЛЬВІВ»

Запропоновано методику оптимального проектування з чисельними дослідженнями і розрахунками на міцність плит жорстких аеродромних покриттів в просторовій постановці задачі при моделюванні ґрунтового простору з включенням бетонних шарів.

Ключові слова: жорсткі аеродромні покриття, ґрунтовий півпростір, чисельні дослідження на міцність, метод скінченних елементів.

У рамках реалізації інфраструктурних проектів «Укрєвроінфра-проект» в Міжнародному аеропорту «Львів» передбачалося здійснення комплексної реконструкції аеродрому і будівництво нового пасажирського терміналу, що включає реконструкцію існуючої злітно-посадкової смуги (ЗПС) з її подовженням майже на 800 м та будівництво нового перону на 17 літаків з улаштуванням жорсткого покриття здатного сприймати навантаження повітряних суден (ПС) класу «D».

Задача оптимального проектування конструкцій жорстких аеродромних покриттів «Міжнародного аеропорту Львів» здійснювалася наступним чином.

Для оптимізації вибрані характерні ділянки зі слабкою ґрунтовою основою. На кожній ділянці визначені поперечні профілі певних пікетів (2-3 перерізи) за геологічними даними найнесприятливіших умов. Для кожного вибраного профілю поперечного перерізу летовища, що включає ЗПС та дві бокові смуги безпеки розв'язувалися задача оптимізації жорсткого бетонного покриття на слабкій ґрунтовій основі від колісної дії ПС А380-800. Задача зведена до одномірної оптимізації за редуційованим параметром коефіцієнта постелі.

Основою такого підходу є вибір оптимальної конструкції двохшарового бетонного покриття на жорсткій основі (рис.1):

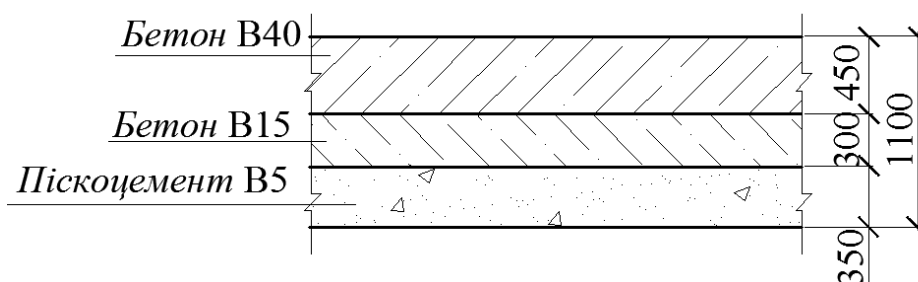


Рис. 1. Конструктивна схема основного аеродромного покриття

- верхній шар з високоміцного бетону класу В40, товщиною – 0,45 м;
- нижній шар з «пісного» бетону класу В15, товщиною – 0,30 м;
- жорстка основа з піскоцементу класу В5, товщиною – 0,35 см.

Загальна товщина штучного покриття складає – 1,1 м.

Запропонована конструкція покриття апробовувалась та багатократно прораховувалась на колісну дію ПС В747-400, А380-800 в магістерських роботах на кафедрі Реконструкції аеропортів та автошляхів НАУ при проектуванні аеродромних покриттів аеропорту в м. Бориспіль, м. Донецьк та ін.

Задача визначення оптимального коефіцієнта постелі (внутрішня) є просторовою, при її розв'язанні враховується взаємодія всього колісного шасі ПС (враховуючи симетрію) з дев'ятьма аеродромними плитами скінченних розмірів.

У розрахунковій схемі враховується адекватна модель конструкції стикових з'єднань аеродромних плит. В інженерних розрахунках стикові з'єднання не враховуються, вважається, що плита є безкінечною.

З точки зору будівельної механіки ця задача є лінійною. Система рівнянь рівноваги в різних постановках досягає дванадцяти і більше тисяч лінійних рівнянь при реалізації одновимірного пошуку оптимального розв'язку за параметром коефіцієнта постелі.

Для здійснення розрахунку уточненого аеродромного покриття при взаємодії 18 плит скінченних розмірів і колісному навантаженні всіх коліс шасі повітряного судна використовується метод скінченних елементів (МСЕ), а саме одна з найбільш універсальних схем МСЕ – моментна схема скінченних елементів (МССЕ) [1, 2, 3, 4].

Розрахунок на міцність виконується шляхом дискретного моделювання набору плит (18 плит скінченних розмірів) скінченних елементів (по розрізній і нерозрізній схемам) на пружній вінклерівській основі з урахуванням односторонніх в'язів. У даній методиці використовується спрощена математична модель пружної основи з припущенням пропорційності між позитивним прогином пластинки та реакцією основи і залежить від координат точки серединної поверхні пластинки (вузла), у якій визначається прогин і реакція основи:

$$q(x^2, x^3) = -c(x^2, x^3)\omega, \quad (1)$$

де $c(x^2, x^3)$ – функція коефіцієнта пропорційності (постелі); ω – додатній прогин у даній точці по нормалі до поверхні пластинки у деформованому стані.

Функція (1) може бути описана шляхом двохвимірної апроксимації [5] з використанням певного ряду значень коефіцієнта постелі для розглянутої

ділянки геологічного розрізу з урахуванням багатошаровості ґрунтів, що залягають в основі покриття та його товщини, якщо в основу покладена величина еквівалентного загального модуля деформації ґрунту в даному перерізі. Знаючи ряд значень коефіцієнта постелі в залежності від середнього, по вертикалі товщі основи, загального модуля деформації ґрунту і використовуючи ту чи іншу аналітичну функцію: сплайн, тригонометричну, показову, степеневу або іншу, – отримуємо конкретну функцію в даній області розрахункової моделі. Наприклад, у разі наявності лінзоподібного ґрунтового прошарку з відомими граничними значеннями коефіцієнтів постелі C_0 і C_{\max} , а також використовуючи аналітичний сплайн за законом синуса, маємо:

$$C_N(x^2, x^3) = C_0 - (C_{\max} - C_0) \cdot \sin \frac{\pi x_N^2}{l^2} \cdot \sin \frac{\pi x_N^3}{l^3}, \quad (2)$$

де x_N^2, x_N^3 – поточні місцеві координати вузлів розрахункового фрагмента в глобальній системі координат; l^2, l^3 – розміри розрахункового фрагмента в глобальній системі координат відповідно по z^2 і z^3 .

У розглянутій схемі МСЕ дискретна модель має дві обмежуючі поверхні – нижню і верхню, тобто плита розглядається одношарова – умовна (еквівалентна за згинальною та поздовжньою жорсткостями). Тому необхідно побудувати еквівалентний аналог умовної плити виходячи з умови еквівалентності за вказаними жорсткостями для погонного розміру плити [1]:

$$\begin{cases} E_{(e)} \frac{t_e^3}{12} \cdot 100 = EI_{(o\bar{x})}^0; & (1) \\ E_{(e)} \cdot 100 \cdot t_e = EF_{(o\bar{x})}^0. & (2) \end{cases} \quad (3)$$

де $EI_{(o\bar{x})}^0, EF_{(o\bar{x})}^0$ – дійсні жорсткості конструкції багатошарової плити, причому згинальна $EI_{(o\bar{x})}^0$ (відносно системи координат $O\bar{X}$ у центрі ваги плити з урахуванням жорсткої основи) враховує тільки верхній і нижній шар, а поздовжня жорсткість $EF_{(o\bar{x})}^0$ враховує два шари і жорстку основу. Таким чином визначено параметри еквівалентної умовної плити дискретної моделі розрахункового фрагмента даної конструкції покриття.

Для числових розрахунків розрахункова схема покриття побудована так, щоб було включено колісне навантаження від всього шасі повітряного судна з урахуванням того, що основна опора літака розміщується на середній плиті розрахункового фрагмента.

Побудована дискретна модель містить дев'ять плит покриття – для перону з розмірами $7,5 \times 7,5$ м; для ШЗПС – $10,0 \times 7,5$ м кожна, з урахуванням симетрії за фюзеляжем літака. Розрахункова схема і скінченноелементна модель розрахункового фрагменту покриття ШЗПС

представлена на рис. 2. Еквівалентні дискретні відбитки колісних

пневматиків з тиском $P_a = 1,41$ МПа згідно з представленою СЕ-моделлю розміщені на одній середній плиті, тобто на десяти дискретних областях рівномірного поверхневого навантаження, приведеного до вузлового. Дискретна модель побудована так, що основна шестиколісна опора (під фюзеляжем літака А380-800) розташована в куті середньої плити розрахункового фрагмента, а основна чотириколісна опора розміщена з дотриманням параметрів шасі літака.

Початок сіткових координат S_1, S_2, S_3 і глобальних координат $OZ^1 Z^2 Z^3$ розрахункового фрагмента у вузлі №1: $S_1^1 = 1$; $S_2^1 = 1$; $S_3^1 = 1$ – $Z_1^1 = 0$; $Z_1^2 = 0$; $Z_1^3 = 0$. Розміри сіткової області складають: $M1 \times M2 \times M3$ ($2 \times 35 \times 50$), а розміри розрахункового фрагменту - 16310×3000 . Усього вузлів в СЕ-моді - $N_u = 2 \cdot 35 \cdot 50 = 3500$, що відповідає системі рівнянь рівноваги $k_{ip} = 3500 \cdot 3 = 10500$ (без накладених в'язів) і кількості скінченних елементів – $M_e^p = (M2 - 1) \times (M3 - 1) = (35 - 1) \cdot (50 - 1) = 1666$.

Згідно прийнятої моделі стикового з'єднання плит покриття в структурі представленої дискретної моделі на границях плит введені врізки-вставки (ребра), фрагменти яких також описуються сітковими координатами - всього вісім фрагментів.

Відповідно розрахунковим схемам дискретних моделей плит введені граничні (крайові) кінематичні умови зв'язку в глобальній системі координат $OZ^1 Z^2 Z^3$: вздовж координатних ліній OZ^3 (площина симетрії) – накладаються в'язі на переміщення u_N^2 та кути повороту v_N^2 ; вздовж координатних ліній OZ^2 (модель шарнірних тангенціальних закріплень) та по краях розрахункових фрагментів (при $Z_N^2 = 1631$ см і $Z_N^3 = 2250$ см реалізована модель шарнірних тангенціальних закріплень) – накладаються в'язі на переміщення, u_N^3, u_N^2 .

За результатами розрахунків побудовані епюри переміщень і погонних згинальних моментів у перерізах 1-1 і 2-2 (рис. 3) для двох випадків: для постійного коефіцієнта постелі K_{se}^{const} у межах розрахункового фрагмента (криві 1); для змінного коефіцієнта постелі $K_{se}^{nep.}$ (криві 2) з крайніми значеннями - $C_0 = 2$ кгс/см³ і $C_{max} = 6$ кгс/см³. Епюри прогинів мають плавний характер, максимальне значення прогину при змінному коефіцієнті постелі складає - 2,12 мм $u_{1855}^1 = -2,12$ мм, що перевищує значення інженерного розрахунку в 1,5 рази.

Аналіз отриманих числових результатів дослідження НДС покриття ШЗПС показує, що значення максимального погонного згинального

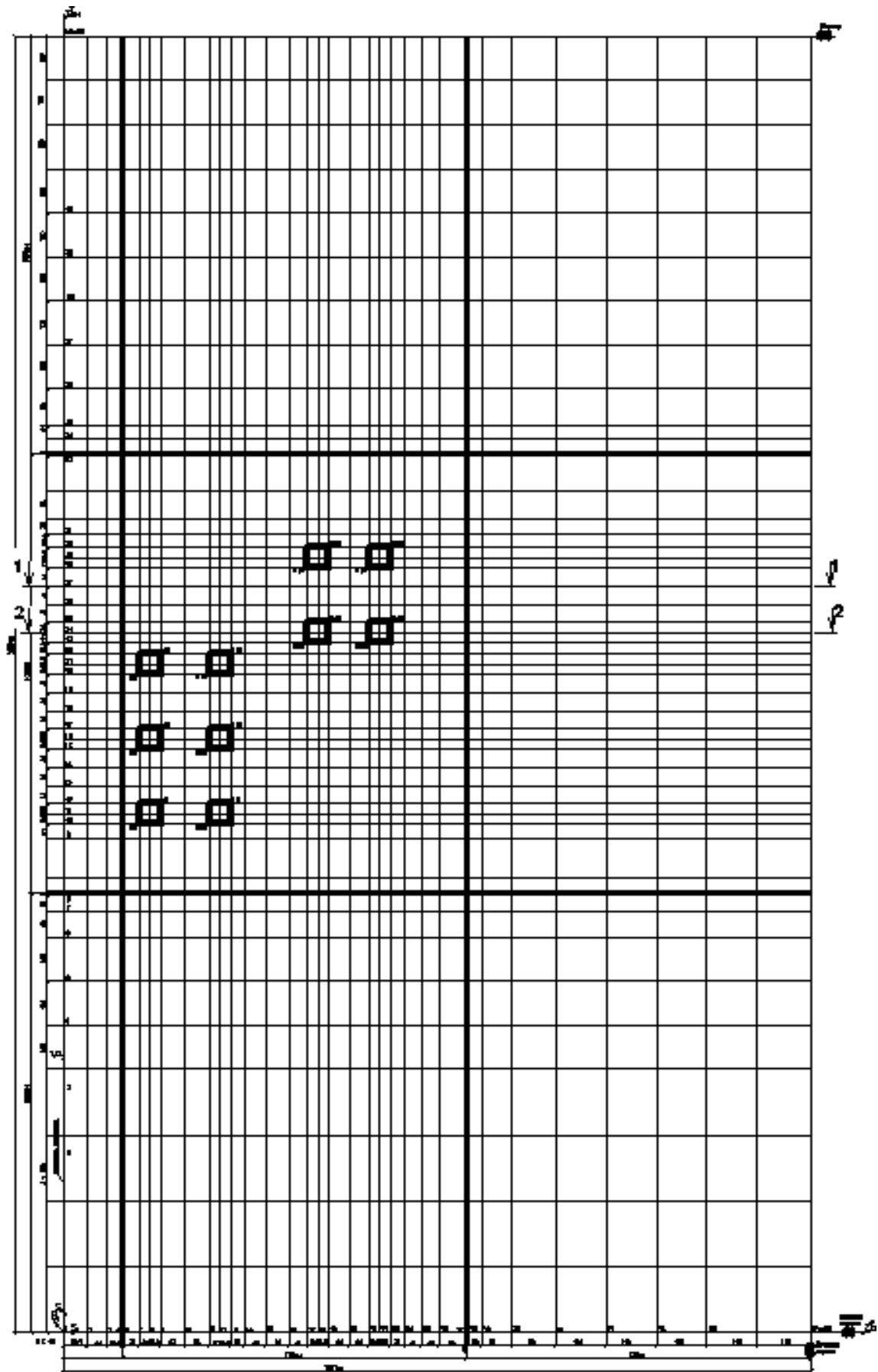


Рис. 2. Розрахункова схема покриття ШЗПС при колісному впливі шасі літака А380-800

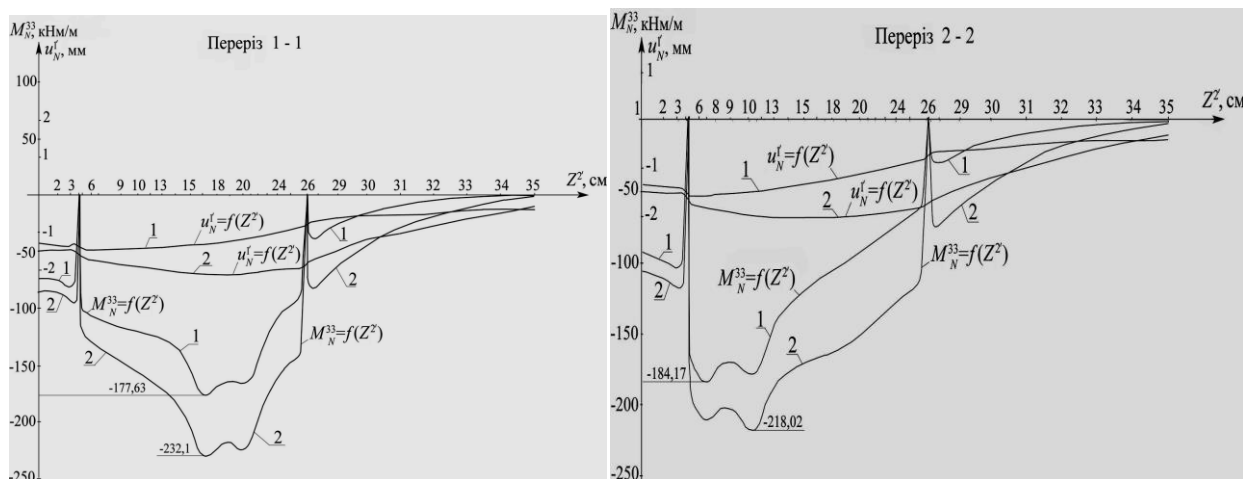


Рис. 3. Епюри переміщень і згинальних моментів у перерізах 1-1 і 2-2:

крива 1 - для постійного коефіцієнта постелі, K_{se}^{const} ;

крива 2 - для змінного коефіцієнта постелі – K_{se}^{nep} .

моменту під лівим нижнім колесом основної опори літака А380-800 досягає величини $M_{1853}^{33} = -232,1$ кНм/м. Для даної схеми МСЕ мінус вказує на те, що розтягнуто нижнє волокно умовної плити. Розрахунковий опір міцності бетону нижнього шару для класу В15 становить $R_{bt} = 11,7$ кгс/см²; $R_{btb} = 23,4$ кгс/см², значення розтягнення в крайньому волокні, тобто у випадку чистого вигину $\sigma_{2,inf} < R_{btb}$, $13,31 < 23,4$ кгс/см².

У випадку складного напруженого стану, при одночасному впливі температурних і згинальних напружень $\sigma_{2,inf} \approx R_{bt}$ і незначно перевищує допустимі напруження, тобто діючий СНиП 2.05.08-85 [6] передбачає зниження на один клас бетону в порівнянні зі СНиП 2.03.01-84*, тому можна вважати, що для другого шару бетон класу В20 (без зміни модуля пружності E_b), для якого $R_{bt} = 14,3$ кгс/см² $> \sigma_{2,inf} = 13,31$ кгс/см² забезпечує міцність на можливі напруження розтягу.

Отже, результати чисельного розрахунку показують, що в екстремальних умовах навантаження конструкція покриття працює в граничному стані, що відповідає умовам діючих норм і явних запасів міцності нема, чого не можна сказати, якщо користуватися інженерними наближеними розрахунками.

Список використаних джерел

1. Цыхановский В.К., Козловец С.М., Коряк А.С. Расчет тонких плит на упругом основании методом конечных элементов. – К.: Изд-во «Сталь», 2008 – 234с.

2. Баженов В.А., Сахаров А.С., Цыхановский В.К. Моментная схема метода конечных элементов в задачах нелинейной механики сплошной среды// Прикладная механика. –К.: Ин-т механики НАН Украины, 2002. –Т.38(48), №6, июль. – С.24 – 63.
3. Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. – М.: Мир, 1976. – 464 с.
4. Цыхановський В.К. Метод скінченних елементів у задачах взаємодії гнучких оболонки-пластинок з пружною ґрунтовою основою при розрахунках нежорстких аеродромних покриттів //Матер. V Міжнар. наук.-техн. конф. Т. IV. Аеропорти та їх інфраструктура. – К.: НАУ, 2003. – С. 42.40 – 42.43.
5. Горбунов-Посадов М.И. Устойчивость фундаментов на песчаном основании. – М.: Госстройиздат, 1962.
6. СНиП 2.05.08-85 Аэродромы. – М.: Госкомитет СССР по делам строительства, 1985. – 58 с.

Аннотация

Предложена методика оптимального проектирования с численными исследованиями и расчетами на прочность плит жестких аэродромных покрытий в пространственной постановке задачи при моделировании грунтового пространства с включением бетонных слоев.

Ключевые слова: жесткие аэродромные покрытия, грунтовое полупространство, численные прочностные исследования, метод конечных элементов.

Annotation

The technique of optimal design with numerical investigations on strength of airdrome strict outercoverses in space putting of task with model soil space and concrete inclusions are given.

Keywords: airdrome strict outercoverses, soil half-space, numerical investigations on strength, method of finite element.