

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

#### *Актуальність теми*

Здебільшого плитно-ребристі залізобетонні системи перекриттів, що є статично невизначуваними системами, здебільшого працюють в пластичній стадії роботи матеріалу.

Ця стадія роботи елемента під навантаженням характеризуються тріщиноутворенням, а прогини системи є значно більшими, ніж показує розрахунок системи в пружній постановці.

Наявність тріщин обумовлює перерозподіл жорсткостей елементів плитно-ребристих систем, що в свою чергу викликає перерозподіл та зміни у величинах моментів як на вигин, так і на кручення.

Створення коректної кінцевоелементної розрахункової схеми дозволить виконати числовий експеримент щодо дослідження впливу нормальних тріщин на зміни й перерозподіл внутрішніх зусиль в елементах плитно-ребристих систем перекриття.

**Метою** роботи є визначення та оцінювання напружено-деформованого стану кінцевоелементної схеми ячейки перекриття з ребристих плит з урахуванням утворення нормальних тріщин.

**Задачі**, які потрібно вирішити для досягнення мети:

- пошук та аналіз методик що існують, щодо визначення жорсткостей на вигин та кручення залізобетонних елементів систем перекриття та покриття з урахуванням тріщиноутворення в літературних джерелах;

- формулювання питання дослідження роботи на основі аналізу джерел;

- побудова кінцевоелементної моделі плитно-ребристого конструктиву ячейки перекриття;

- складання алгоритму числового експерименту;

- виконання числового експерименту, використовуючи ітераційні розрахунки;

- аналіз результатів числового експерименту

**Об'єкт дослідження** – залізобетонна плитна система перекриття

**Предмет дослідження** – напружено-деформований стан елементів залізобетонної плитної системи з урахуванням тріщиноутворення.

**Практичне значення одержаних результатів**

Практичним шляхом можуть бути підтверджені теоретичні передбачення щодо важливості врахування при статичних розрахунках не лише жорсткості при вигині, але й жорсткості при крученні для плитно-балочних, плитних залізобетонних систем.

**Апробація та публікація результатів роботи**

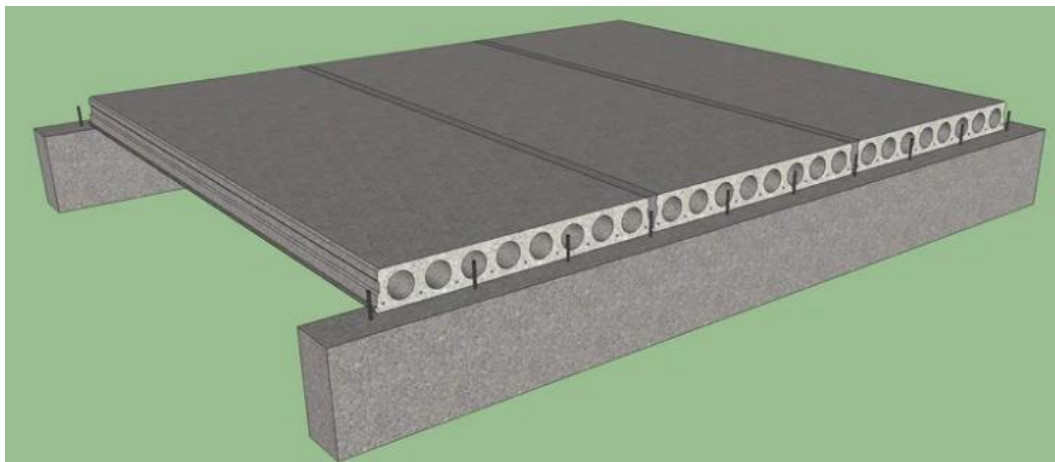
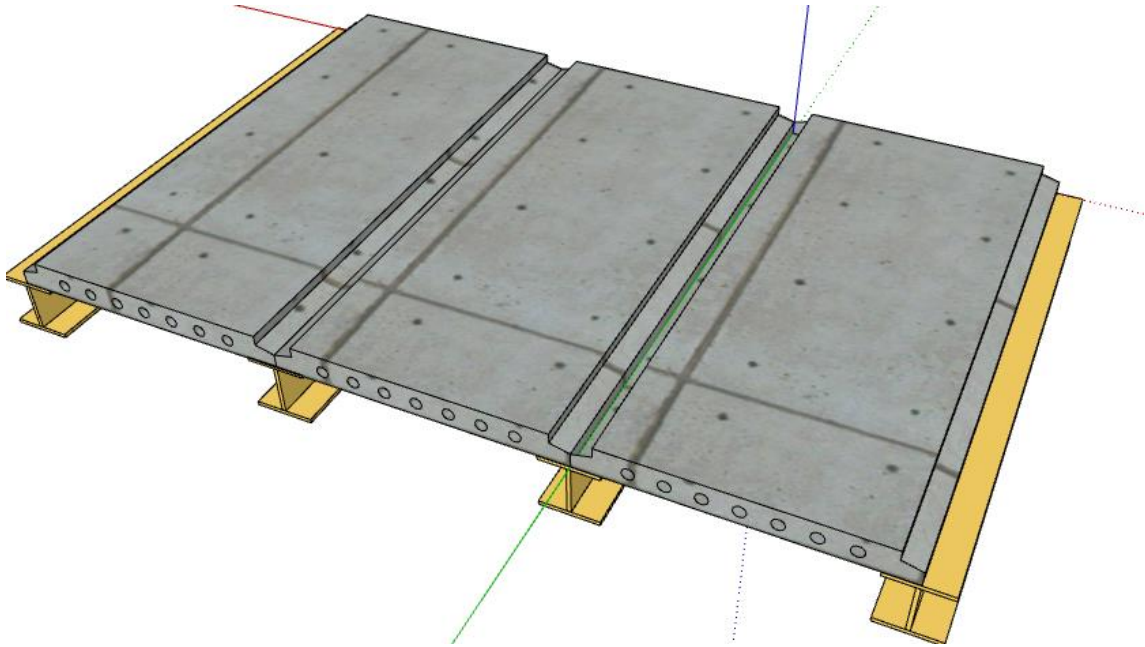
Результати дослідження опубліковано в матеріалах науково-практичної студентської конференції.

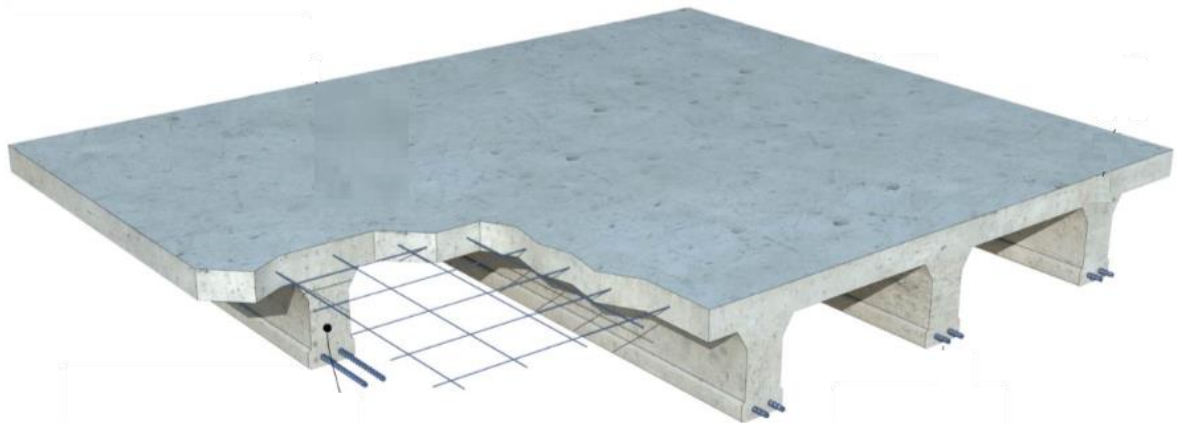
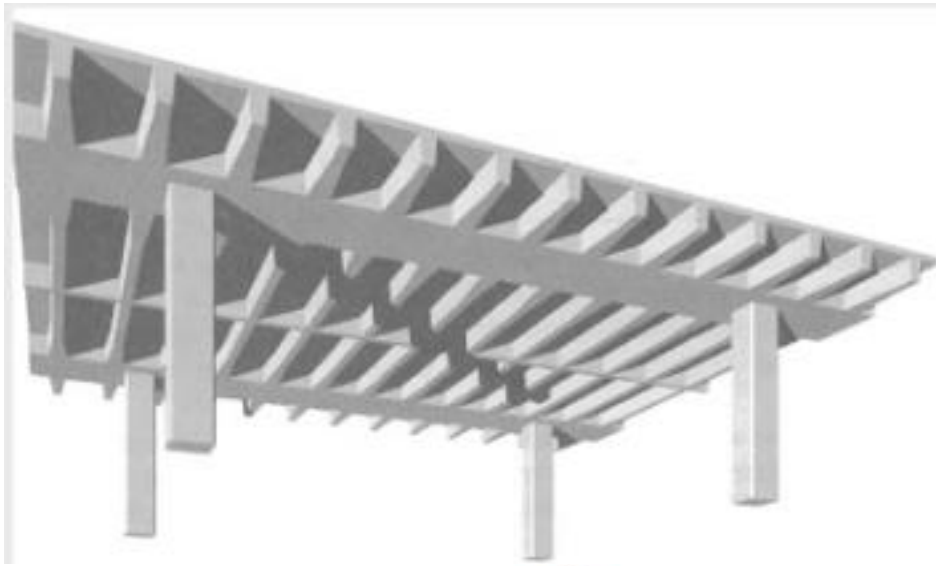
Шейбсак О.В., Срібняк Н.М., Галушка С.А. Алгоритм числового експерименту щодо впливу тріщиноутворення на роботу статично невизначуваних систем перекриття // Матеріали Всеукраїнської наукової конференції студентів та аспірантів, присвяченої Міжнародному дню студента (13-17 листопада 2023 р.)– Суми, 2023.С.146

## РОЗДІЛ 2

### БІБЛОГРАФІЧНИЙ ОГЛЯД ДОСЛІДЖЕНЬ

В конструкціях перекриття, що працюють на вигин (рис. 2.1), здебільшого утворюються нормальні від вигину тріщини (рис.2.2).





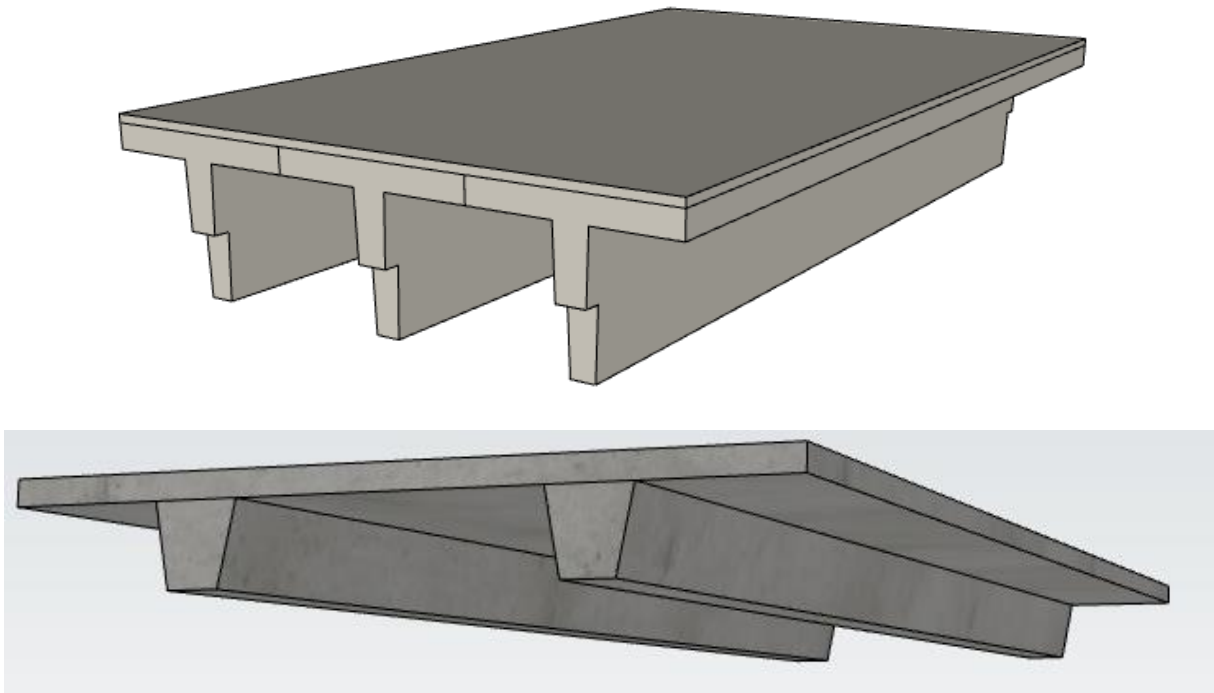


Рис. 2.1 Приклади залізобетонних плит перекриття (багатопорожнистих та ребристих)

За різних факторів, як то локальне завантаження залізобетонного диску перекриття, влаштування в конструкції отворів, несиметрична перехресно-балочна система обумовлюють виникнення в елементах такого перекриття не лише моментів вигину, але й суттєвих крутних моментів [3,5,11,14].

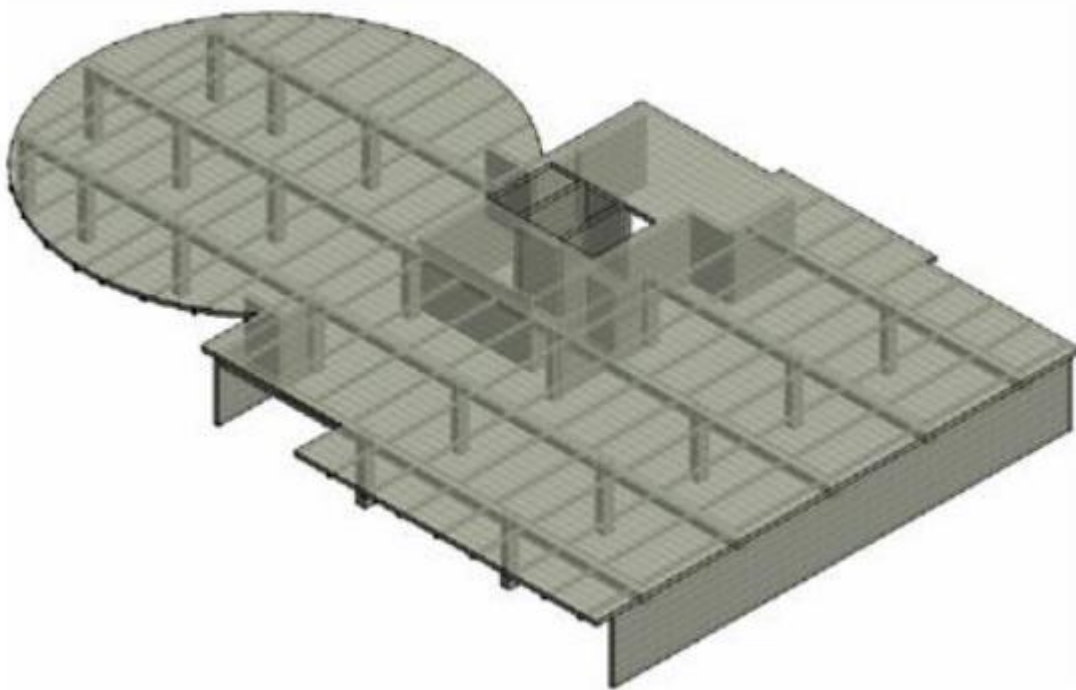
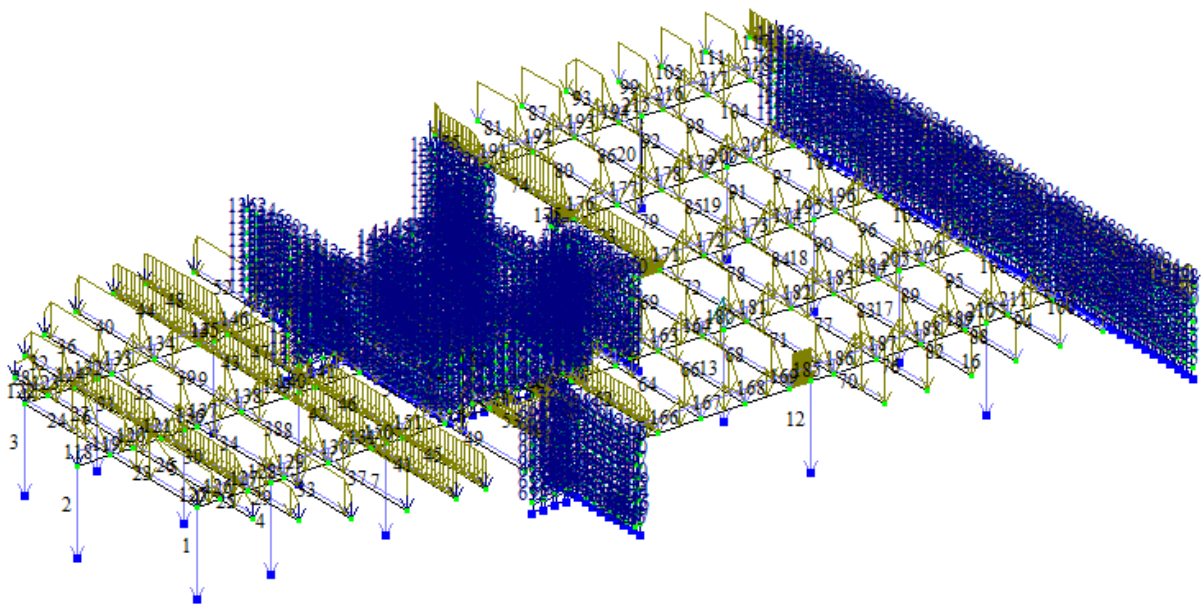


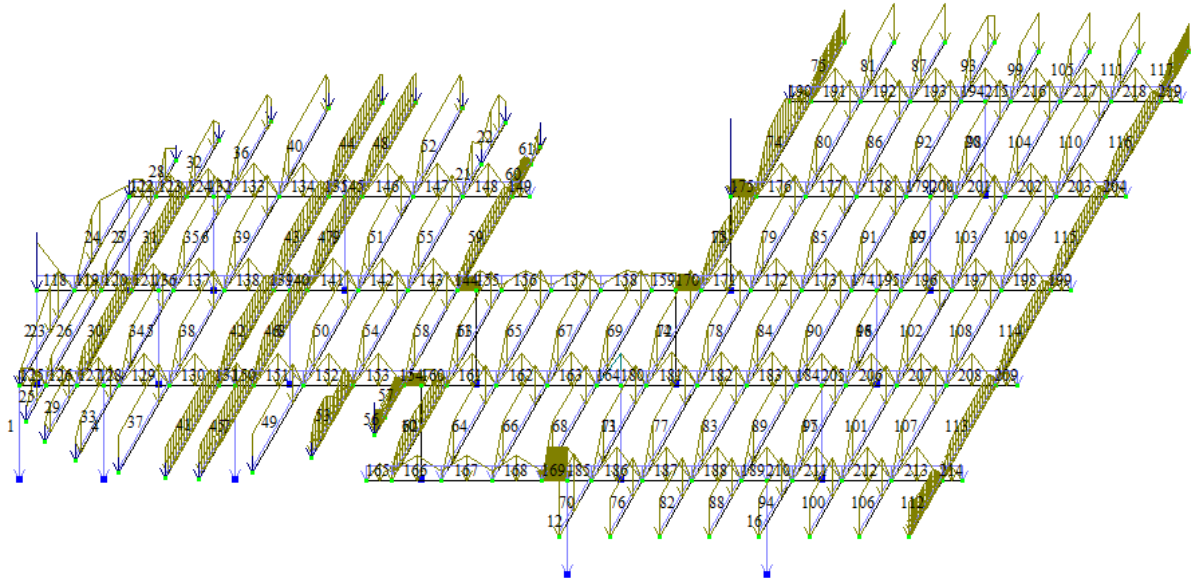
Рис. 2.2 Приклад несиметричної плитно-балочної системи у вигляді монолітного перекриття [18]

Розташування балочних елементів, як показано на рис. 2.1 призводить до завантаження балок погонним навантаженням різної інтенсивності (рис. 2.3).



a)





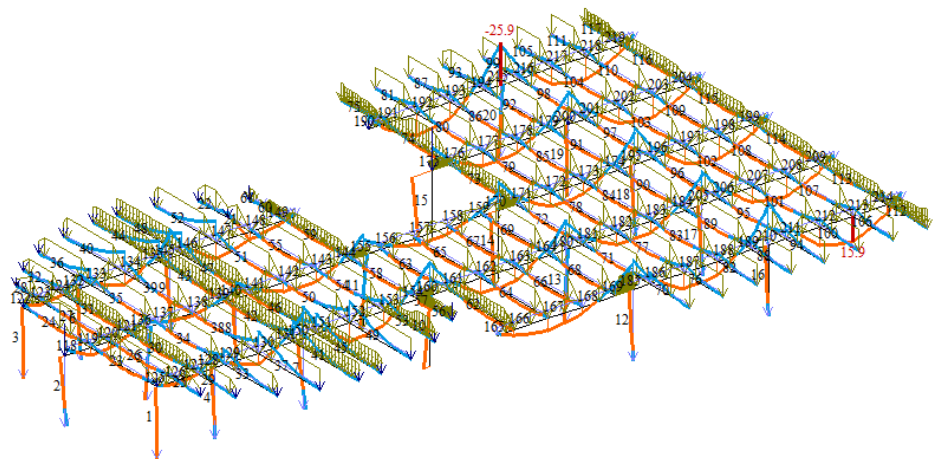
б)

Рис. 2.4 Система стержнів (КЕ №10) в площині XOY-а; система стержнів із навантаженням в диметричній проекції -б

На рис.2.3 наведена стержнева система перекриття. Плитна частина умовно не показана, але її вага врахована в погонних навантаженнях, що прикладені до системи стержнів (рис. 2.4,б).

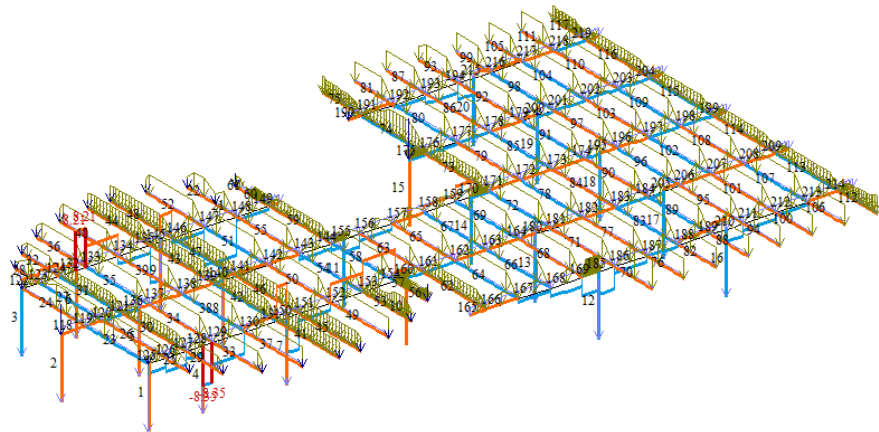
На рис. 2.5 наведено епюри моментів кручення після пружного розрахунку стержневої системи перекриття.

YDL1Y  
Епора Мy  
Одиниці виміру - т\*м



Мінімальне значення -25.9399; Максимальне значення 15.9113

YDL1Y  
Епора Mx  
Одиниці виміру - т\*м



Мінімальне значення -8.3502; Максимальне значення 8.20522

Рис. 2.5 Епюри моментів вигину (а) та кручення (б) після пружного розрахунку стержневої системи перекриття за рис.2.3

Навіть після пружного розрахунку системи (без врахування виникнення нормальних тріщин) можна констатувати факт, що в балочних елементах перекриття виникають значні крутні моменти, максимальне значення яких сягає до 8,3 тм.

Очевидно, пониження жорсткості як при крученні, так і при вигині, призведе до перерозподілу крутних й згинальних моментів.

І, як показують дослідження [5,16,17] величини крутних моментів можуть суттєво, в рази збільшитися від значень крутних моментів, отриманих при пружному розрахунку.

На перерозподіл зусиль в пластичній стадії роботи таких систем значним чином впливають тріщини різних типів та різного характеру утворення.

Найбільш характерними для плитно-балочних систем перекриттів є нормальні (перпендикулярні до поздовжньої осі елемента) тріщин. Вони обумовлюються дією моменту згину (рис. 2.6) .



a)



b)

Рис. 2.6 Нормальна тріщина в мостовій балці переходить в похилу (дія крутного моменту обумовлює розвиток похилої тріщини [19] -а; нормальні від вигину тріщини в залізобетонних мостових балках (м. Умань, Україна) -б

На рис. 2.6, б показано фото залізобетонної балки мосту, яка працює в складному напруженому стані, але на гранях такої мостової балки можна чітко розрізнити нормальні саме від вигину тріщини.

В роботах [14,15,16] показано важливість врахування впливу нормальних від вигину тріщин на крутильну жорсткість залізобетонних елементів перекриттів. Вплив нормальних тріщин на зміну крутильної жорсткості залізобетонних стрижневих елементів показано в низці робіт [4,19, 20].

Отже, можа констатувати факт, що:

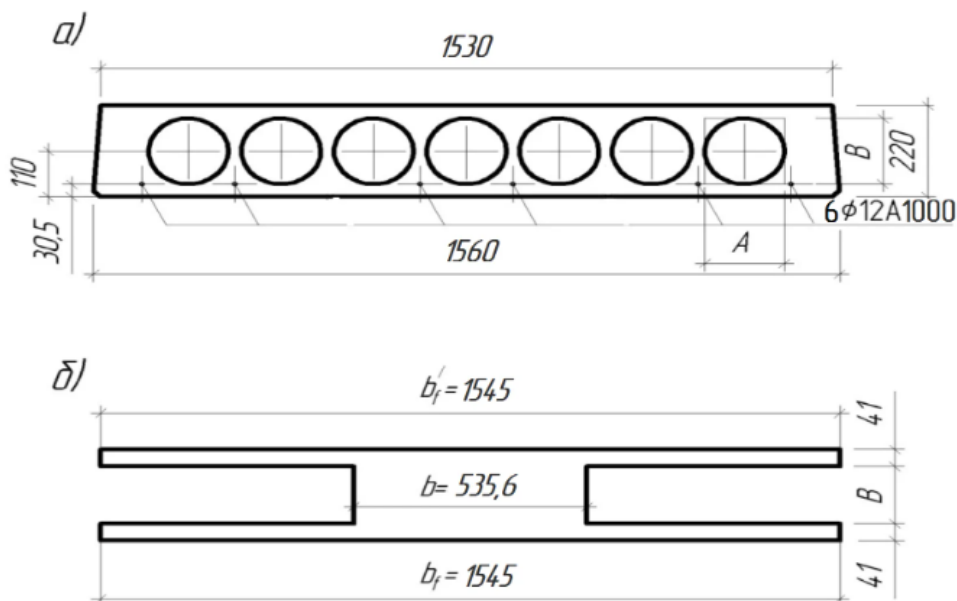
- в залізобетонних плитно-балочних системах перекриттів за певних умов крутні моменти досягають значних величин;
- в залізобетонних плитно-балочних системах перекриттів, що є статично невизначуваними, вагому частку всіх можливих за характером тріщин становлять перпендикулярні до поздовжньої осі елемента (нормальні) тріщини;
- виникнення нормальних тріщин обумовлює ослаблення перерізу елемента, а також і перерозподіл жорсткостей перерізу як на вигин, так і на кручення;
- зміна (перерозподіл) жорсткостей в наслідок тріщиноутворення обумовлює зміну максимальних величин і характер епюр  $M_y$  та  $M_k$ .
- для більш точного та коректного статичного розрахунку системи перекриття слід враховувати вплив зміни нормальних та крутильних жорсткостей при утворенні нормальних тріщин.

Методики визначення жорсткості при крученні для стержньового елемента з нормальними тріщинами з різними формами поперечного перерізу наведені в роботах учнів школи Т.Н. Азізова: Срібняк Н.М. - переріз стержня прямокутної форми [19]; Стадника В.І.- переріз стержня у вигляді тавра [23]; Орлова О.М. – переріз стержня у вигляді двотавра [22]; Мельник О.В. – коробчата форма перерізу стержня [25]; Мельник О.С. – переріз стержнів порожнистого трикутного перерізу [26].

Створення тієї чи іншої кінцевоелементної схеми з використанням тих чи інших методів, а також застосування тих чи інших кінцевих елементів (стержньових, пластинчатих, об'ємних) насамперед обумовлюється конкретною розрахунковою задачею та її цілями.

*Апроксимація ячеек з плит пластинчатими кінцевими елементами*

Апроксимувати конструктивне вирішення ячейки з плит можна використовуючи пластинчаті кінцеві елементи. Так, для апроксимації ячейки з багатопорожнистих плит можна прийняти кінцеві елементи типу пластина (КЕ №41 типу плита або КЕ №44 типу «оболонка»). В параметрах жорсткості пластинчатого кінцевого елемента вказують, що такий елемент має властивості ортотропії. Тобто ячейка, яка моделюється в площині ХОУ, має певні характеристики жорсткості в поздовжньому перерізі (відносно осі Y) та в поперечному перерізі (відносно осі X).



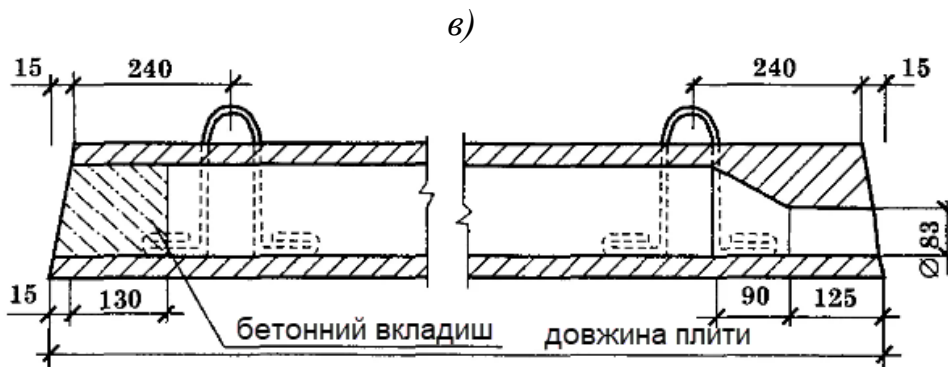


Рис. 2.7 Реальний переріз багатопорожнстої плити-а; приведений двотавровий переріз багатопорожнстої плити-б; поздовжній переріз плити-в

Характеристики пластини з ортотропними властивостями зручно в даному випадку задати використовуючи тип жорсткості для пластинчатого кінцевого елемента.

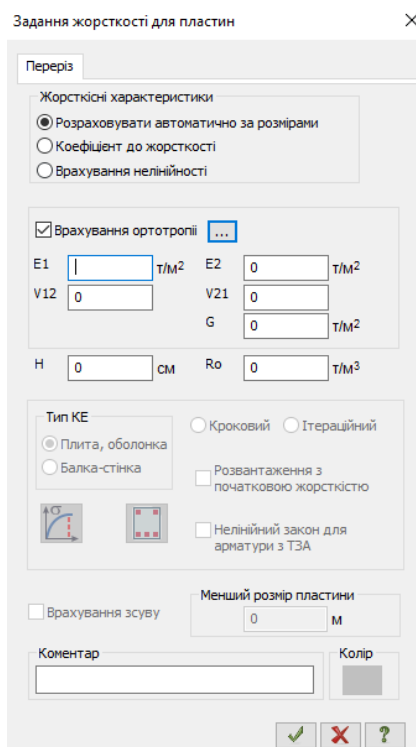


Рис. 2.8 Вікно для завдання жорсткостей для пластинчатого кінцевого елемента з урахуванням ортотропії

У двох взаємно перпендикулярних напрямках характеристики жорсткості такої плити є різними. Так, в поперечному напрямку вказують опис жорсткості (приведений модуль пружності  $E_1$ ) поперечного перерізу в вигляді двотавру (рис. 2.7,б), а в поздовжньому напрямку – приведений модуль пружності  $E_2$  для приведенного перерізу в поздовжньому напрямку

(рис. 2.7, в). Приймають  $E_1$  та  $E_2$  – модулі пружності, відповідні напрямкам головних осей ортотропії.

Результатами статичного розрахунку пластинчатої кінцевоелементної схеми є погонні моменти при вигині та при крученні. Але складність становить завдання зміненої (пониженої) жорсткості при вигині та крученні в наслідок утворення нормальних тріщин.

Тому цей спосіб моделювання є не досить зручним для виконання мети дослідження.

Розглянемо інший спосіб моделювання ячейки з багатопорожнистих плит- спосіб представлення плит перехресною стержневою системою.

#### *Метод стержньової апроксимації*

Розглянемо інший метод апроксимації конструктивного рішення ячейки з багатопорожнистих плит перекриття – метод апроксимації системою перехресних стержнів.

Так, для дослідження впливу зміни жорсткостей на напружений стан елементів, як один із можливих варіантів можна обрати метод апроксимації плитних систем системою перехресних стержнів.

Такий метод запропоновано Т.Н. Азізовим та описано в його роботах [6,7,8,9,10].

Загалом методику апроксимації перехресно-стержньовою системою можна застосовувати для будь-якого суцільного елемента (конструкції).

Застосування формул теорії пружності може бути виправдане тільки при розрахунку в пружній стадії роботи елемента і не може бути застосовано для розрахунку з урахуванням тріщиноутворення [8], яке відбувається саме в пластичній стадії його роботи.

Розрахунок із застосуванням методу кінцевих елементів [1, 21] є найбільш прийнятним. Однак метод кінцевих елементів має й певні недоліки [21]: необхідність розв'язання системи рівнянь великих розмірів та пов'язані з цим проблеми обумовленості, а для визначення параметрів

напружено-деформованого стану в окремій (локальній) області необхідно розраховувати всю конструкцію [8].

У роботі [4] показано, що при розрахунку залізобетонних перекриттів (суцільного перерізу, багатопорожнистих, ребристих) з урахуванням тріщиноутворення зручно користуватися методом стержневої апроксимації. Така можлива стержньова апроксимація пов'язана з тим, що вплив тріщин різного типу як на жорсткість при вигині, так і на жорсткість при крученні саме для стержньових залізобетонних елементів достатньо вивчено [8].

У дослідженні [4] показано також, що плити суцільного перерізу можна розраховувати апроксимувавши її перехресно-стержневою системою. В роботах А.Р. Ржаніцина пропонується апроксимація конструктивів суцільних плит як поздовжніх, поперечних та діагональних стержнів без урахування їх крутильної жорсткості. В [8] пропонується апроксимувати плитну конструкцію системою лише взаємноперпендикулярних поздовжніх та поперечних стержнів. При цьому враховується жорсткість на кручення цих стержнів.

В роботі [8] наведено вдосконалену методику стержньової апроксимації конструкцій суцільних плит, що спираються по контуру. Також наведено методику визначення жорсткостей при крученні для стержнів, якими така плита апроксимована.

На рис. 2.9 наведено залізобетонну плиту суцільного перерізу з розмірами в плані  $l_1$  та  $l_2$ .

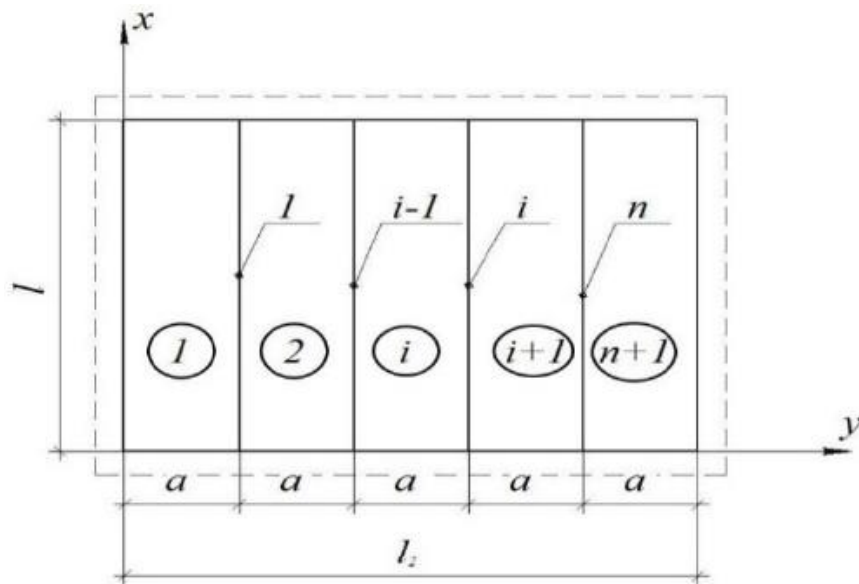


Рис. 2.9 Схема розрізання суцільної плити на смуги [8]

В [8] пропонується згідно методики [4] розрізати вертикальними площинами  $n$ , паралельними осі  $X$  на смуги в кількості  $n + 1$  із шириною  $a$ . За методом перерізів, якщо умовно «розрізати» напружений елемент площиною  $i$  «відкинути» одну з його частин, то для того, щоб загалом система перебувала в статичній рівновазі, відкинуту частину замінюють групою сил (внутрішніх зусиль), що еквівалентні «відкинутій» частині.

Такі внутрішні зусилля є функціями деякої сили (внутрішньої сили) по довжині елемента.

Вздовж ліній перетину в кожному  $i$ -му перерізі будуть виникати невідомі погонні зусилля, які можна описати трьома функціями [8]:

- функцією вертикальних зусиль  $S_i(x)$ ;
- поперечних моментів вигину  $m_i(x)$ ;
- крутних моментів  $m_{ii}(x)$ - моментів відносно смуг, що паралельні осі  $Y$

На рис. 2.10 наведена схема прикладення цих невідомих зусиль.

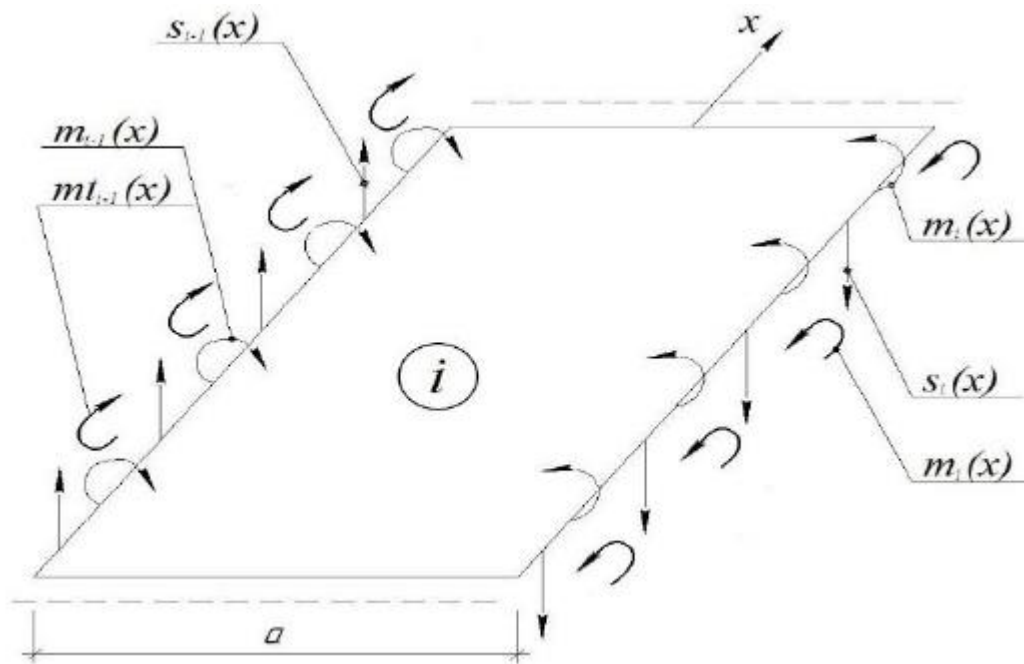


Рис.2.10 Схема дії зусилля вздовж ліній розсічення в  $i$ -тій смузі [8]

Для розрахунку суцільної плити пропонується дискретно-континуальний метод [27]. Цей метод ще називають методом смуг й він є різновидом методу кінцевих елементів. В дискретно-континуальному методі дискретизація елемента виконується в одному з двох напрямків, а за іншим напрямом розв'язання задачі залишається неперервним (аналітичним).

Систему за рис.2.9 за одним напрямком (вздовж  $Y$ ) поділимо дискретно на смуги, а за напрямом осі  $X$  приймаємо умову спільності деформацій як для континуального середовища [8] – рис. 2.11.

Враховуючи, що для розрахунку за [4, 8] використовується балочна теорія, то суцільна смуга може бути представлена як поздовжній стержень шириною перерізу  $a$  та певна множини поперечних стрижнів з одиничною шириною (рис. 2.11) [8].

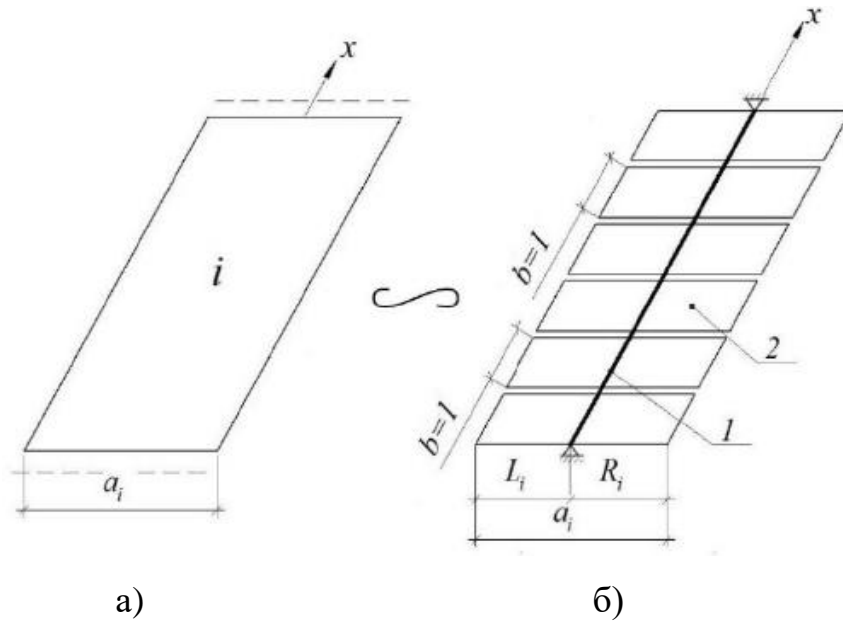


Рис. 2.11 Розбиття суцільної  $i$ -ї смуги на систему поздовжніх та поперечних стержнів [8]

Жорсткість стержня на вигин в позиції 1 (рис.2.11, б) приймається рівною реальній жорсткості смуги із шириною  $a$  та висотою  $h$ , яка дорівнює товщині плити. Жорсткість при вигині стержнів в позиції 2 (рис.2.11,б) дорівнює жорсткості на вигин смуги, що має одиничну ширину та висоту  $h$  [8].

Для визначення невідомих зусиль в певному  $i$  – му перерізі складають рівняння, що являє собою умову спільності деформацій зліва від цього перерізу та справа від нього. Ця умова являє собою умову рівності вертикальних переміщень, умову рівності кутів повороту відносно осі  $Y$  (ліній, що є паралельними осі  $Y$ ), умову рівності кутів повороту відносно осі  $X$ . Застосовуючи принципи, наведені в [2], складемо три типових рядка для системи диференціальних рівнянь для кожного  $i$  – го перерізу. Для рівності других похідних вертикальних переміщень:

$$\begin{aligned} \frac{MQ_i}{EI_i} - \frac{MS_{i-1}}{EI_i} + \frac{MS_i}{EI_i} + MS_{i-1}^{II} \cdot \frac{L_i R_i}{GI_i} + MS_i^{II} \frac{R_i^2}{GI_i} + MS_i^{IV} \frac{R_i^3}{3D_i} + M_{i-1} \frac{R_i}{GI_i} - M_i \frac{R_i}{GI_i} - M_i^{II} \frac{R_i^2}{2D_i} - \frac{MK_{i-1}}{EI_i} + \frac{MK_i}{EI_i} = \frac{MQ_{i+1}}{EI_{i+1}} - \\ MS_i \frac{1}{EI_{i+1}} + MS_{i+1} \frac{1}{EI_{i+1}} - MS_i^{II} \frac{L_{i+1}^2}{GI_{i+1}} - MS_{i+1}^{II} \frac{L_{i+1} R_{i+1}}{GI_{i+1}} - MS_i^{IV} \frac{L_{i+1}^3}{3D_{i+1}} - M_i \frac{L_{i+1}}{GI_{i+1}} + M_{i+1} \frac{L_{i+1}}{GI_{i+1}} - M_i^{II} \frac{L_{i+1}^2}{2D_{i+1}} - \\ MK_i \frac{1}{EI_{i+1}} + MK_{i+1} \frac{1}{EI_{i+1}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Для рівності кутів повороту відносно осі X:

$$MS_{i-1}^{II} \frac{L_i}{GI_i} + MS_i^{II} \frac{R_i}{GI_i} + MS_i^{IV} \frac{R_i^2}{2D_i} + \frac{M_{i-1}}{GI_i} - \frac{M_i}{GI_i} - M_i^{II} \frac{R_i}{D_i} = MS_i^{II} \frac{L_{i+1}}{GI_{i+1}} + MS_{i+1}^{II} \frac{R_{i+1}}{GI_{i+1}} + MS_i^{IV} \frac{L_{i+1}^2}{2D_{i+1}} + \frac{M_i}{GI_{i+1}} - \frac{M_{i+1}}{GI_{i+1}} + M_i^{II} \frac{L_{i+1}}{D_{i+1}} \quad (2.2)$$

Для рівності кутів повороту щодо осі Y:

$$\frac{\int MQ_i}{EI_i} - \frac{\int MS_{i-1}}{EI_i} + \frac{\int MS_i}{EI_i} - \frac{\int MK_{i-1}}{EI_i} + \frac{\int MK_i}{EI_i} + MK_i^I \frac{R_i}{GI_{pol}} = \frac{\int MQ_{i+1}}{EI_{i+1}} - \frac{\int MS_i}{EI_{i+1}} + \frac{\int MS_{i+1}}{EI_{i+1}} - \frac{\int MK_i}{EI_{i+1}} + \frac{\int MK_{i+1}}{EI_{i+1}} - MK_i^I \frac{L_{i+1}}{GI_{pol}} \quad (2.3)$$

В формулах 2.1-2.3 прийнято:

$EI_i, GI_i$  – жорсткість при вигині та при крученні відповідно  $i$ -ї смуги;

$D_i$  – циліндрична жорсткість поперечного стержня з одиничною шириною та висотою  $h$ ;

$L_i, R_i$  – відстані зліва та справа відповідно від  $i$ -го стержня до перерізу;

$GI_{pol}$  – жорсткість при крученні поперечних стержнів;

$MS_i = MS_i(x)$  – функція моментів згину від зусиль  $S_i(x)$ , що пов'язана диференційною залежністю опору матеріалів  $MS_i^{II} = S_i$ ;

$M_i = m_i(x)$  – функція поперечних моментів згину (см. рис. 2.8), що пов'язана диференційною залежністю опору матеріалів;

$MK_i = MK_i(x)$  – функція сумарних моментів кручення від погонних моментів  $mti(x)$ , пов'язана з ними диференційною залежністю  $MK_i^I = m_{ti}$ ;

$MQ_i = MQ_i(x)$  – функція моментів згину від зовнішнього навантаження, що задане на  $i$ -ту смугу.

Рівняння (2.1) – (2.3) складають для всіх перерізів. Перерізи, для яких ці рівняння складаються, рахують від 2-го до  $n-1$ .

Враховуючи граничні умови, рішення для невідомих функцій можна записати як тригонометричні ряди [8]:

$$\begin{aligned}
 MS_i(x) &= \sum_{k=1}^{\infty} as_k \text{Sin} \left( \frac{\pi \cdot k \cdot x}{l} \right) \\
 M_i(x) &= \sum_{k=1}^{\infty} am_k \text{Sin} \left( \frac{\pi \cdot k \cdot x}{l} \right) \\
 MK_i(x) &= \sum_{k=1}^{\infty} at_k \text{Cos} \left( \frac{\pi \cdot k \cdot x}{l} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Підставляючи (2.4) до системи (2.1–2.3) та продиференціювавши та проінтегрувавши та скоротивши на вираз  $\text{Sin} \left( \frac{\pi \cdot k \cdot x}{l} \right)$  отримаємо систему алгебраїчних рівнянь. З системи алгебраїчних рівнянь знаходять невідомі коефіцієнти  $as_k$ ,  $am_k$ ,  $at_k$  в рядах Фур'є.

Після обчислення невідомих функцій кожна смуга уявляється в вигляді балки, що завантажена зовнішнім навантаженням та внутрішніми зусиллями зліва та справа, що знайдені із системи рівнянь.

В [8] також наведена методика визначення жорсткості при крученні  $GJ_t$  поздовжніх стержнів та жорсткості при крученні  $GI_{pol}$  поперечних стержнів.

**Висновок:** для моделювання розрахункової схеми приймемо другий можливий спосіб моделювання ячейки з багатопорожнистих плит – використання систем перехресних стержнів. Прийнято кінцевий елемент у вигляді універсального стержня (КЕ №10).

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Методика досліджень, що застосовані в цій роботі полягає в наступному:

- **аналітичний метод:** проаналізовано сучасні дані щодо важливості врахування в статично невизначуваних системах зміну жорсткостей при різних силових впливах при наявності тріщин;

- *числовий метод розрахунку* – метод кінцевих елементів: дозволяє апроксимувати кінцевими елементами реальне конструктивне рішення перекриття, задати необхідні параметри та умови й виконати статичний розрахунок кінцевоелементної схеми.

- *аналіз результатів розрахунку (масивів даних) з використанням Excel 2021* для Windows

## РОЗДІЛ 4

### АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ЯЧЕЙКИ ІЗ ПОРОЖНИСТИХ ПЛИТ

#### 4.1 Особливості побудови кінцево-елементної схеми ячейки з порожнистих плит

В програмному комплексі ЛІРА-САПР 2021 побудуємо кінцевоелементну схему ячейки з чотирьох багатопорожнистих плит. Плити прийнято із розмірами в плані 1,5 х 6,0 м з висотою перерізу 220 мм (за серією 1.137.1-9 вип.1) – див. рис.4.1

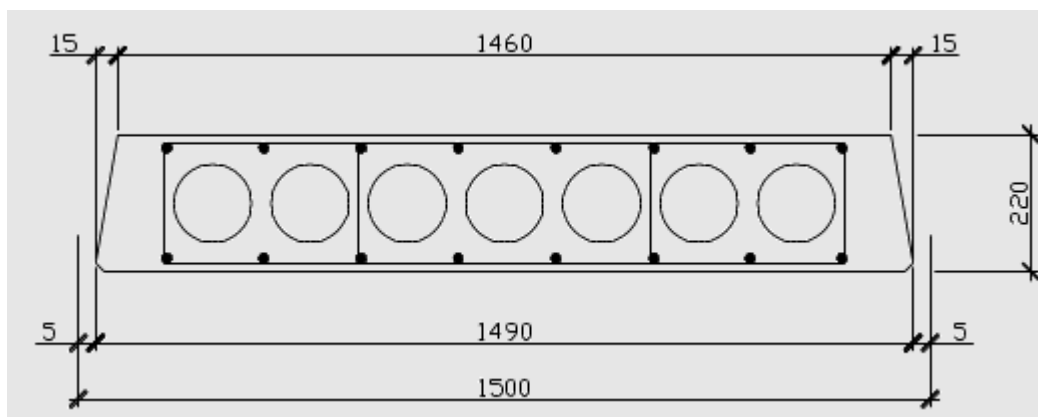


Рис.4.1 Переріз збірної багатопорожнистої плити .

за серією 1.137.1-9 \вип.1

Прийнято плиту із бетону класу С20/25 з наступними характеристиками [13]:  $f_{cd} = 14,5$  МПа,  $f_{ctk,0,05} = 1,5$  МПа = 0,15 кН/см<sup>2</sup>,  $E_{cd} = 23$  ГПа =  $2,3 \cdot 10^4$  МПа = 2 300 кН/см<sup>2</sup>

Збірна залізобетонна плита працює за розрізною балочною схемою, отже граничні умови (спосіб спирання на опори) прийнято шарнірним. В

таблиці наведено ступені совободи опорних вузлів для прийнятої розрахункової схеми (рис. 4.2, 4.4).

Таблиця 4.1 Граничні умови для КЕ схеми ячейки з плит

№ опорного вузла	Напрями, за якими накладено в'язі
1	X, Y, Z, Uy
2	Y, Z, Uy
3	Y, Z, Uy
4	Y, Z, Uy
5	X, Z, Uy
6	Z, Uy
7	Z, Uy
8	Z, Uy

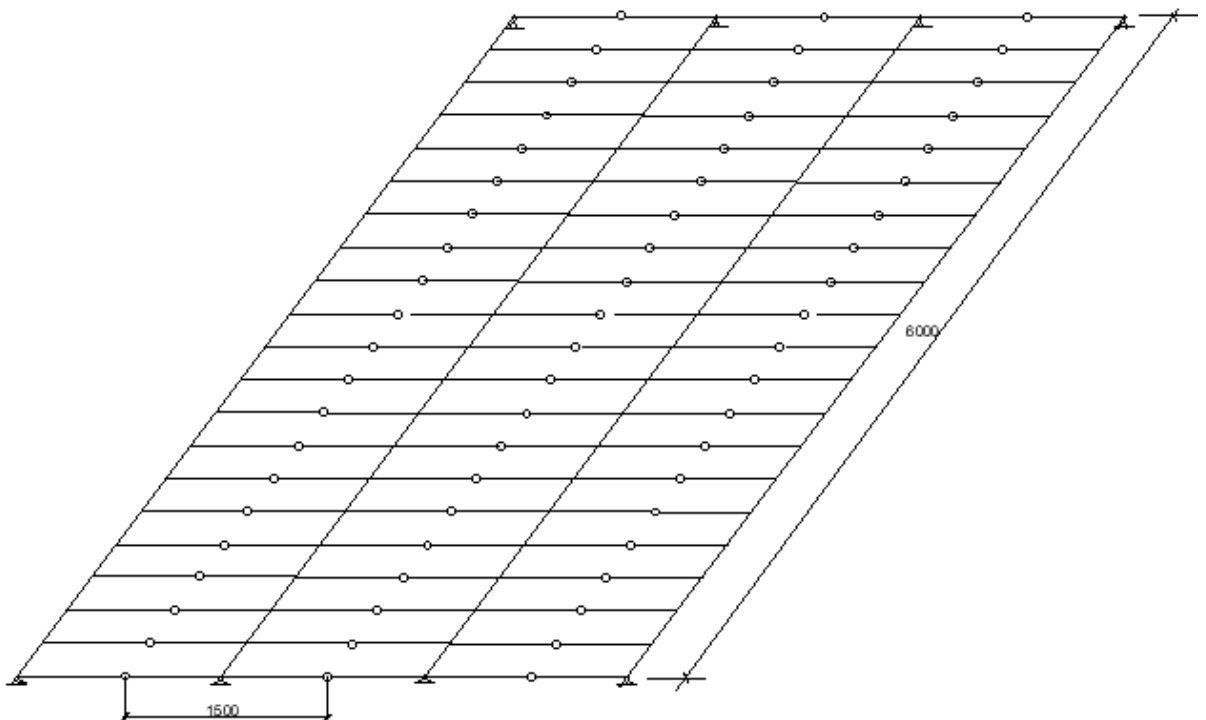


Рис.4.2 Геометрична схема ячейки із збірних плит 1,5х6,0 м

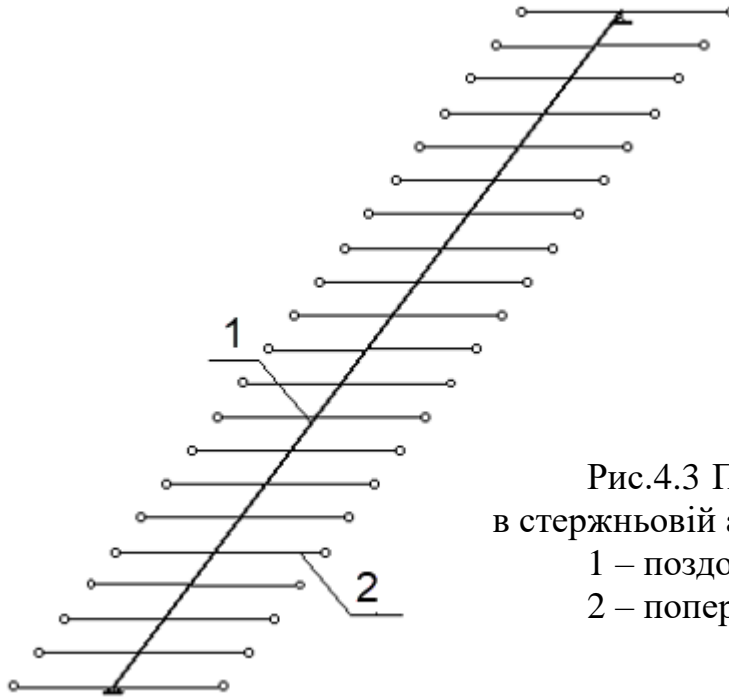


Рис.4.3 Плита 1,51,5х6,0 м  
в стержньовій апроксимації;  
1 – поздовжній стержень,  
2 – поперечний стержень

Жорсткість поздовжнього стержня (поз. 1 на рис. 4.3) дорівнює реальній жорсткості смуги шириною  $a$  і товщиною  $h$ , що дорівнює товщині плити. Жорсткість на згин поперечного стержня дорівнює згинальній жорсткості смужки шириною  $l$  і висотою  $h$  [8].

Моделювання  
шпоночних швів

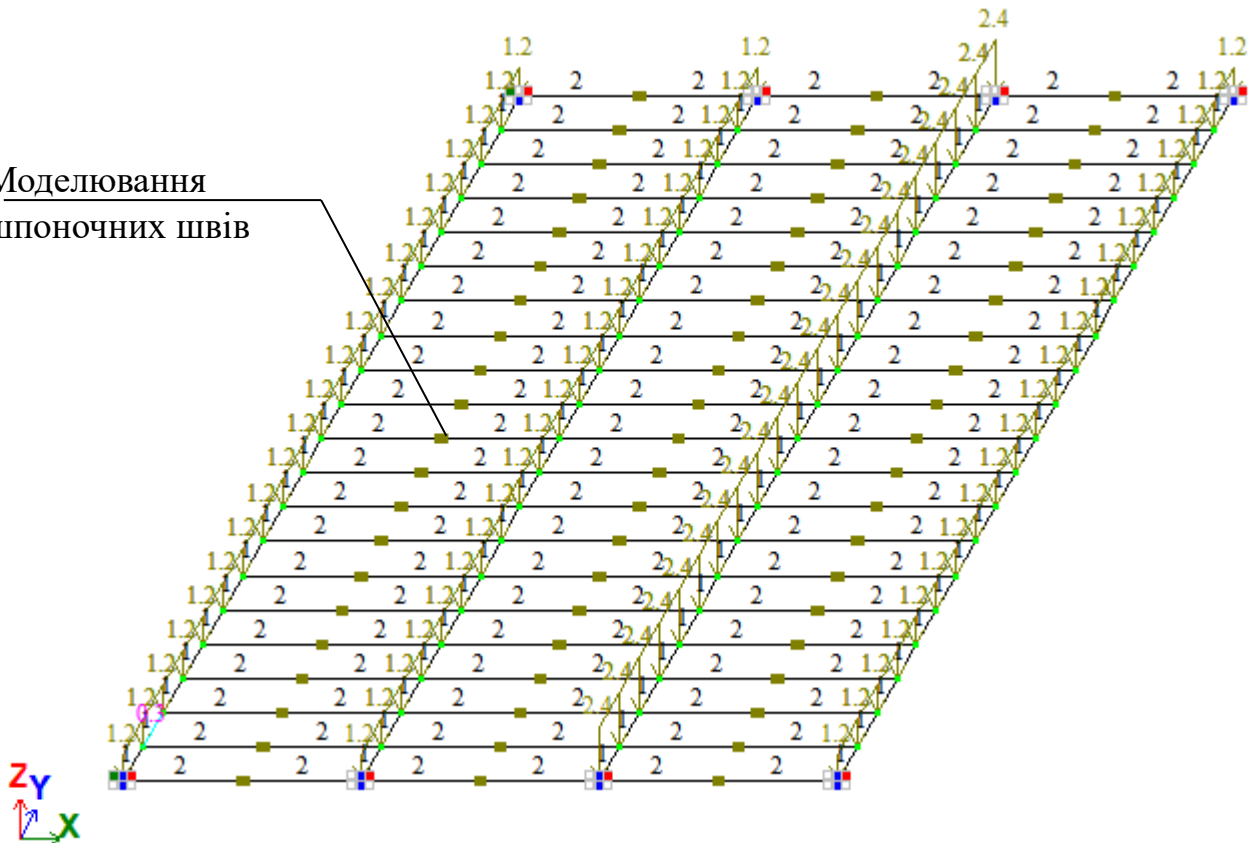


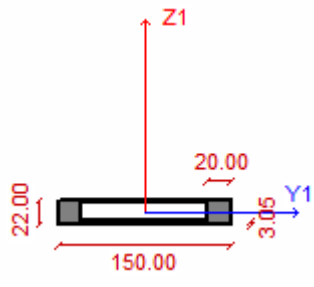
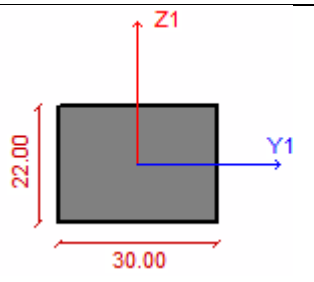
Рис.4.4 Кінцево-елементна схема ячейки з плит перекриття в ПК ЛІРА-САПР: 1- перший тип жорсткості; 2- другий тип жорсткості

Моделювання шпоночних швів між плитами в КЕ схеми прийнято через інструмент об'єднання переміщень вузлів відносно осі Z.

#### 4.2 Параметри жорсткості елементів розрахункової схеми при пружному розрахунку

В таблиці 4.2 наведено жорсткісні характеристики стержньових кінцевих елементів, з яких змодельована КЕ схема. Ці типи жорсткості призначені стержньовим елементам кінцево-елементної схеми при пружному розрахунку (див. «крок 1» на рис.4.6 ).

Таблиця 4.2 Жорсткості елементів при пружному розрахунку

Тип жорсткості	Тип КЕ	Поперечний переріз	E, т/м <sup>2</sup>	$\nu$
1	10 (універсальний стержень)		2.3e+006	0,2
2	10 (універсальний стержень)		2.3e+007	0,2

Для стержня типу №1 прийнято приведений коробчатий переріз (рис. 4.5) реального поперечного перерізу плити (рис. 4.1)

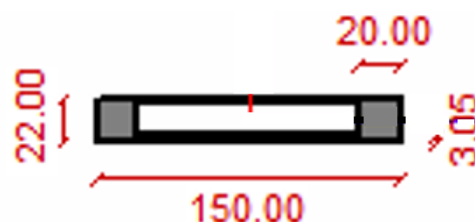


Рис. 4.5 Приведений коробчатий переріз багатопорожнистої плити за  
рис.4.1

Для з'єднувальних елементів прийнято стержні прямокутного перерізу 30 x 22,0 см із модулем пружності  $E$ , що збільшено в 10 разів в порівнянні з початковим модулем пружності бетону  $E_0$ .

### **4.3 Навантаження**

Навантаження прийнято рівномірно розподіленим по довжині стержня та прикладене на поздовжні стержні (тип 1, рис. 4.4) та становить  $q_1 = 1,2$  т/м на 1-й, 2-й та 4-й поздовжній стержні. Завантажимо 3-й стержень погонним навантаженням  $q_2 = 2,4$  т/м, таким чином створивши збільшене локальне завантаження на окремі поздовжньо розташовані стержень.

### **4.4 Алгоритм виконання числового експерименту**

Для виконання поставленої мети роботи виконаємо одну із задач- проведемо за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР 2021 числовий експеримент на стержньовій скінченоелементній моделі ячейки перекриття із збірних залізобетонних багатопорожнистих плит (рис.4.4).

На рис.4.6 наведено поетапну схему (алгоритм) виконання числового експерименту.

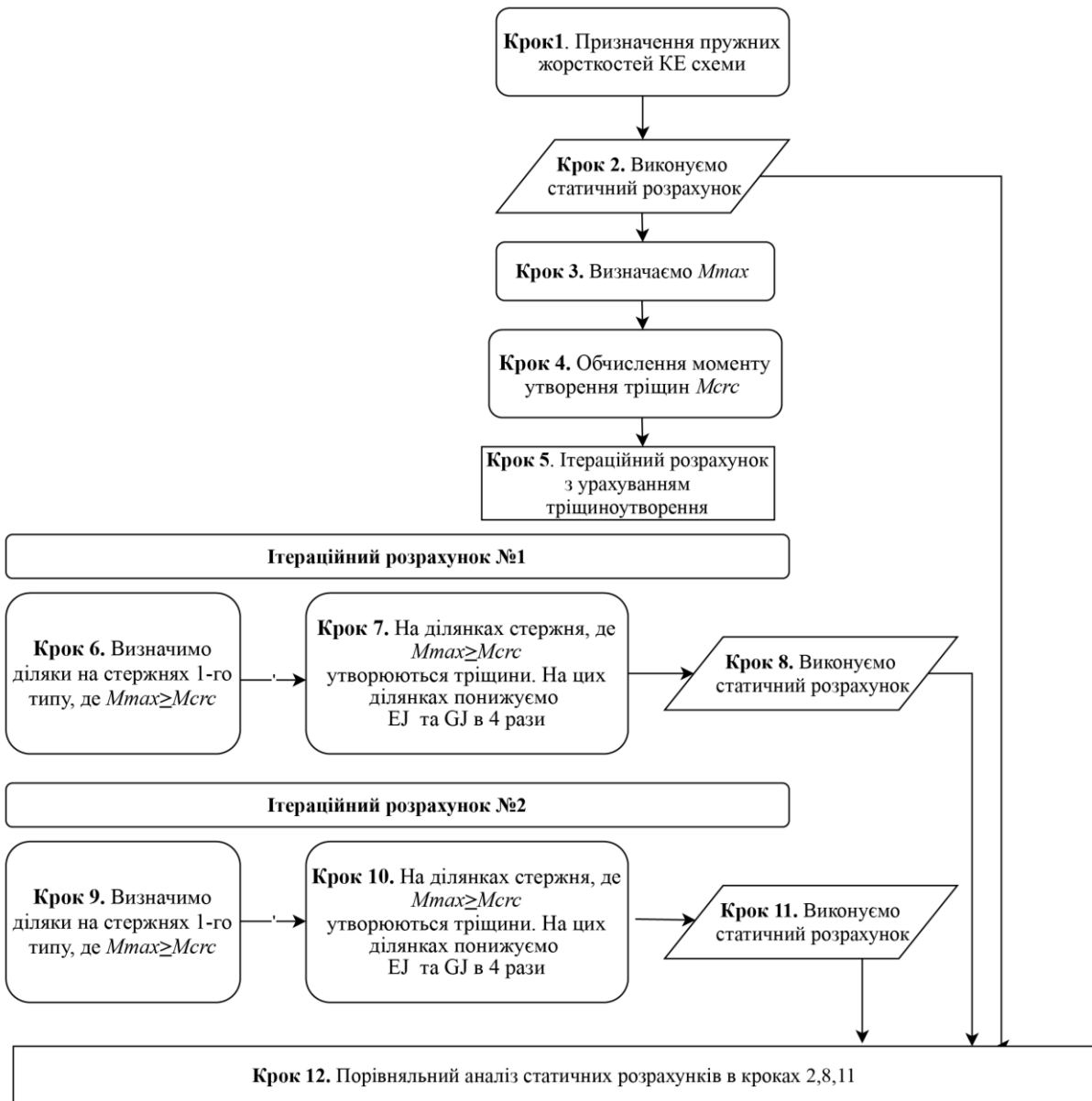


Рис.4.6 Алгоритм виконання числового експерименту

На першому етапі планується виконати статичний розрахунок системи за рис.4.4, елементам якої призначено пружні значення жорсткості (таблиця 4.2). Далі обчислюємо момент тріщиноутворення  $M_{crc}$  й виконуємо порівняльний аналіз моменту вигину  $M_y$  на ділянках стержнів 1-го типу кінцевоелементної схеми за рис.4.4. На ділянках, де максимальний момент вигину  $M_{max} > M_{crc}$  - з'являються нормальні від вигину тріщини.

Тріщиноутворення понижує значення жорсткостей перерізу стержня, як на вигин, так і жорсткість на кручення. Логічно припустити, що суттєво зменшить своє значення жорсткість при вигині.

Але численні як експериментальні, так і теоретичні дослідження показують, що при виникненні нормальних тріщин в балочних елементах перекриттів суттєво змінюється й жорсткість при крученні таких елементів [11,12]. Тому дослідити ступінь зміни жорсткості на кручення цих стержнів є актуальною задачею.

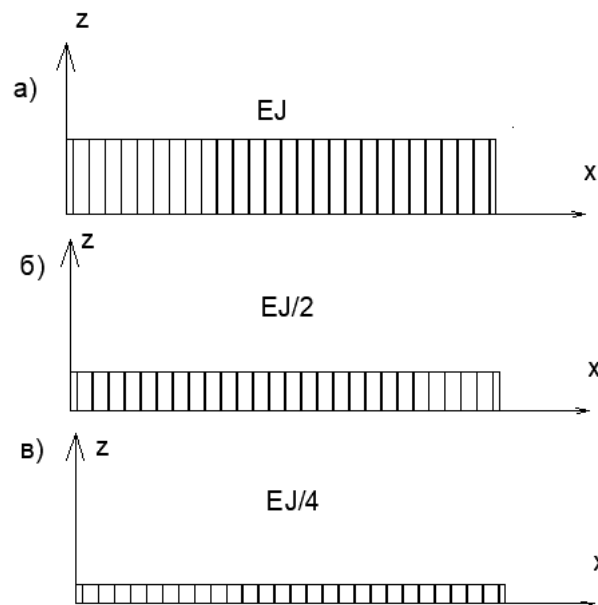


Рис. 4.7 Жорсткості при вигині  $EJ$  стержня 1-го типу: жорсткість пружна (на ділянках без тріщин) -а; жорсткість на ділянках, де виникають нормальні тріщини зменшена в 2 рази – б; жорсткість на ділянках, де виникають нормальні тріщини зменшена в 4 рази – в

Виконаємо розрахунок кінцевоелементної схеми з  $M_{max} \geq M_{crc}$ .

На наступному етапі (крок 7) понизимо на ділянках, де виникають нормальні тріщини  $M_{max} \geq M_{crc}$ , жорсткості при вигині та при крученні в 4 рази. Виконаємо статичний розрахунок (Крок 8).

Аналіз епюри моментів згину після першого ітераційного розрахунку із зменшенням жорсткостей на певних ділянках дозволяє виявити нову картину перерозподілу зусиль, в тому числі й моментів вигину.

З'являються в стержнях з 1-м типом жорсткості нові ділянки, де виникають нормальні тріщини тобто де  $M_{max} \geq M_{crc}$ .

На наступному етапі (ітерації) на ділянках, де утворилися тріщини знову, слід також зменшити  $EJ$  та  $GJ_k$  в 4 рази.

Ітераційні розрахунки потрібно проводити до тих пір, поки на усіх ділянках стержнів, де попередньо були призначені пружні жорсткості та йде виникають тріщини ця жорсткість не буде понижена.

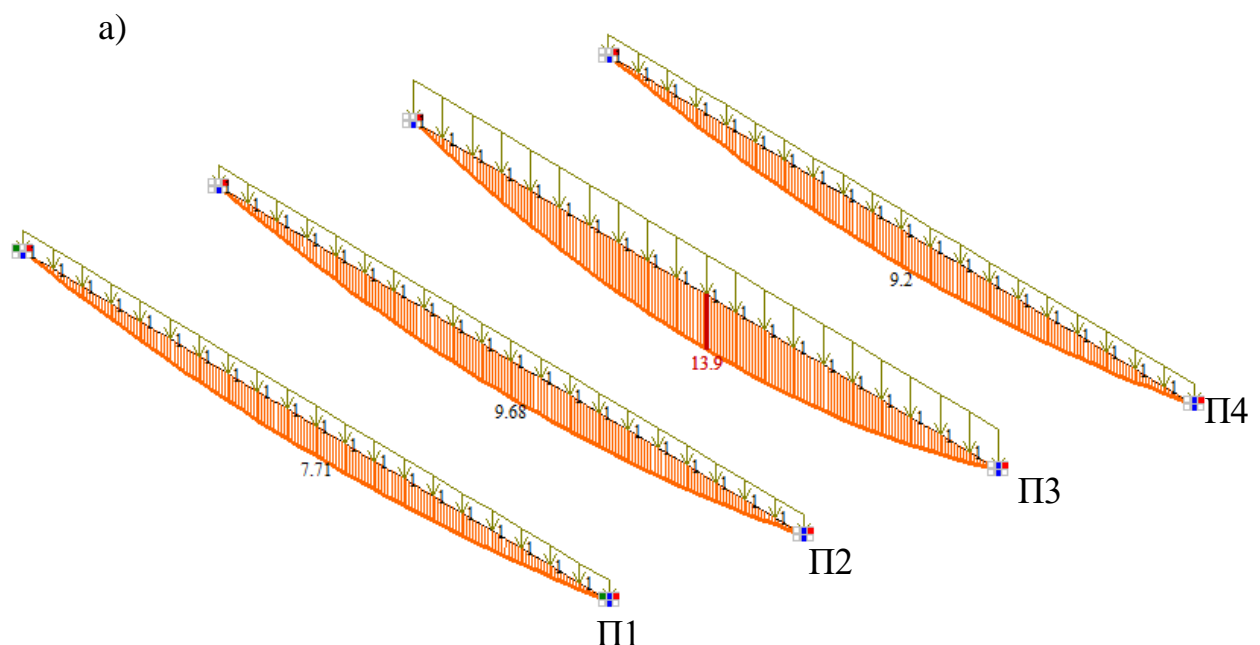
## РОЗДІЛ.5 РЕЗУЛЬТАТИ ВИКОНАННЯ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

### 5.1 Статичний розрахунок кінцевоелементної схеми в пружній постановці (Крок 1)

Цей розрахунок дозволяє оцінити максимальні моменти вигину  $M_{max}$  в стержнях 1-го типу кінцевоелементної схеми та порівняти ці величини зусиль із моментом тріщиноутворення  $M_{crc}$ .

Для стержньових кінцевих елементів 1-го типу прийнято пружні жорсткості (див. таблицю 4.2 ).

На рис.5.1 наведено епюри внутрішніх зусиль в плитах при розрахунку системи з пружними жорсткостями.



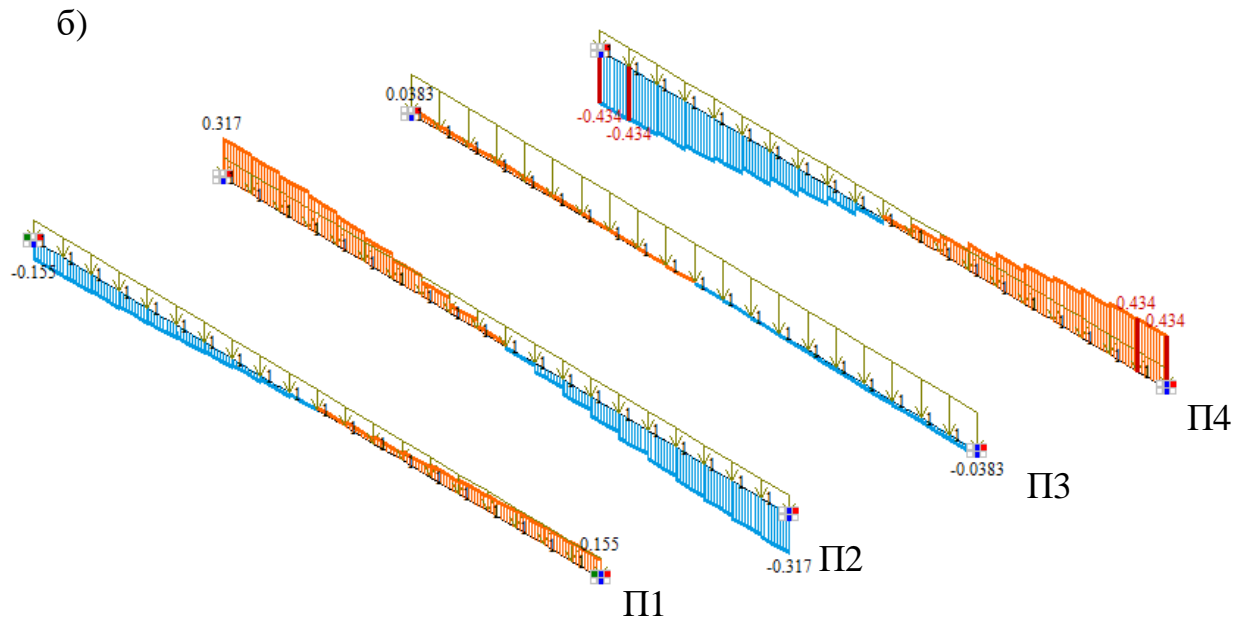


Рис. 5.1 Епюри моментів вигину  $M_y$  ( $M_{y,max}=13,9$  тм) - а; епюри моментів кручення  $M_{xy}$  ( $M_{xy,max}=0,43$  тм)-б (при пружному розрахунку)

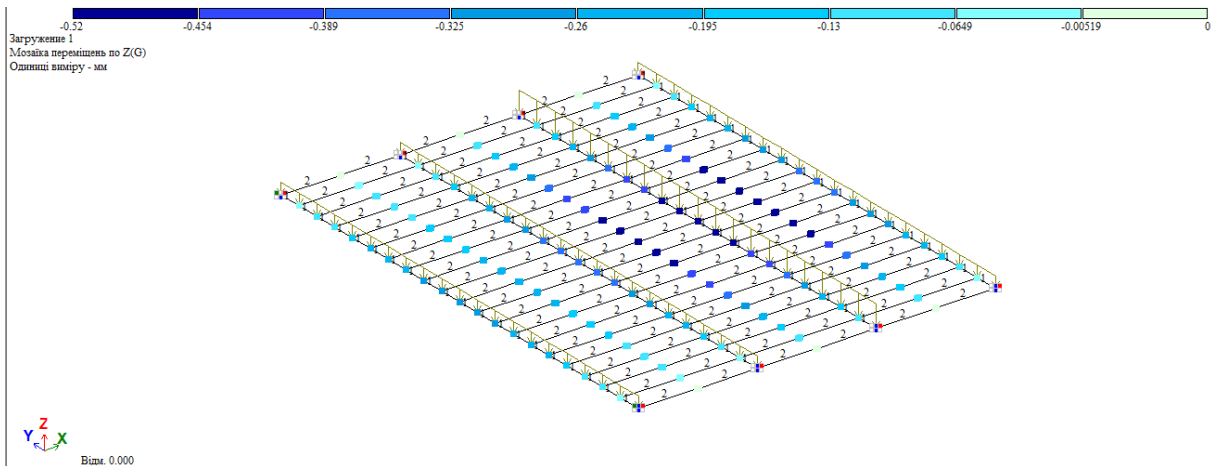


Рис. 5.2 Деформована схема та мозаїка переміщень вузлів по осі Z ( $Z_{max}=0,52$  мм)

## 5.2 Визначення моменту тріщиноутворення $M_{cr}$ (Крок 2)

За [13] для бетону класу С20/25 характеристичний опір бетону на розтяг становить  $f_{ctk,0,05} = 1,5$  МПа =  $0,15 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2}$ .

Визначимо величину моменту вигину, який викликає утворення тріщин:

$$M_{crc} = f_{ctk} \cdot W_{pl} \quad (5.1)$$

де  $W_{pl}$  – моменту опору перетину стержня при роботі елемента в пластичній стадії деформування:

$$W_{pl} = W_{upr} \cdot 1,5 \quad (5.2)$$

Момент опору перерізу  $W_{upr}$  при роботі в пружній стадії для стержня коробчатого перерізу:  $W_{pl} = 75652,5 \text{ см}^3$  приймаємо за табл.5.1

Обчислимо величину моменту утворення тріщин  $M_{crc}$  для стержнів 1-го типу кінцевоелементної схеми:

$$M_{crc} = f_{ctk} \cdot W_{pl} = 0,15 \cdot 75652,5 \text{ см}^3 = 11347,88 \text{ кН} \cdot \text{см} = 113,48 \text{ кН} \cdot \text{м} = 11,3 \text{ тм}$$

Таким чином при аналізі епюри моментів  $M_{y,upr}$  (рис. 5.3) можна виділити ділянки плит, в перерізах яких максимальний момент вигину від зовнішнього навантаження  $M_{y,max}$  буде перевищувати  $M_{crc}$ .

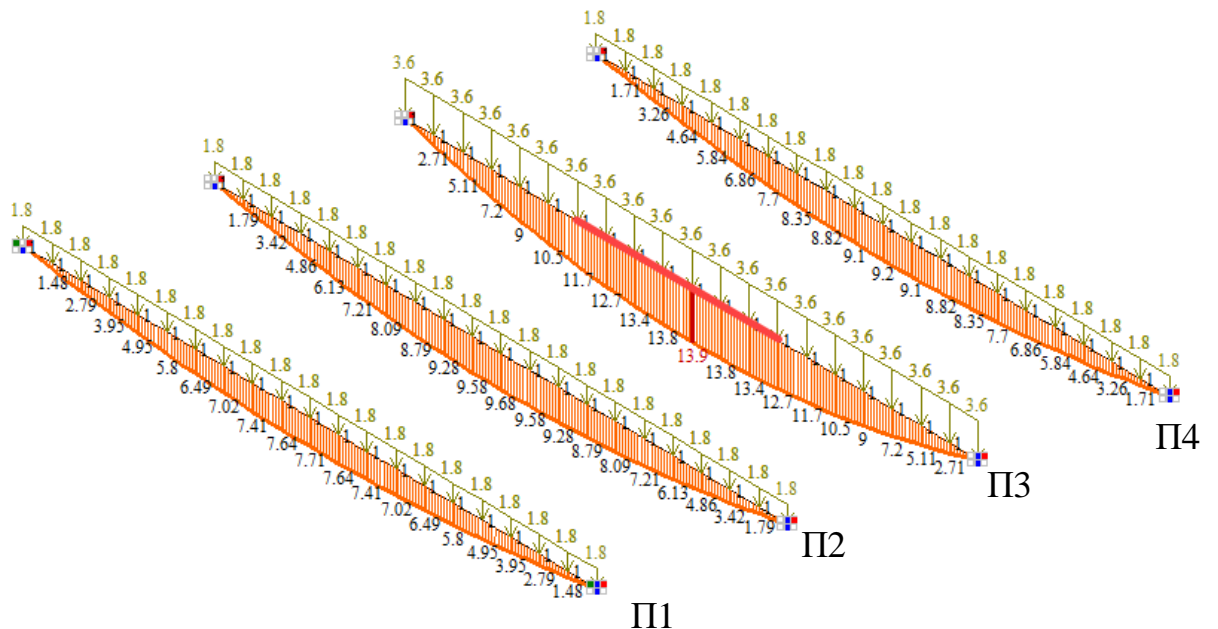


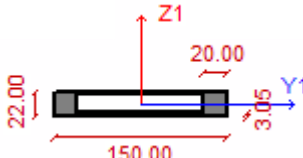
Рис.5.3 Ділянка на стержнях де  $M_{y,max} \geq M_{crc}$  та виникають нормальні від вигину тріщини (інвертовано червоним)

На рис. 5.3 показано відрізки плит, які інвертовані червоним кольором. На цих ділянках моменти вигину від зовнішнього навантаження є більшими, аніж ніж момент тріщиноутворення.

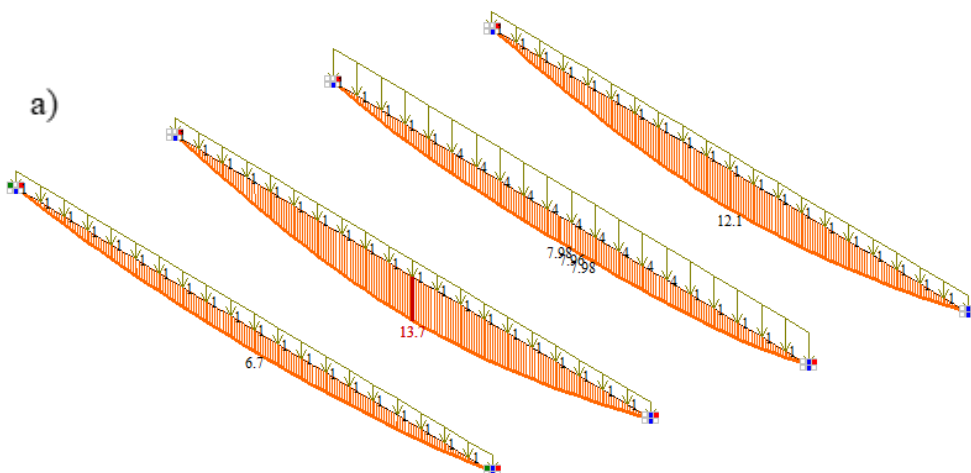
### 5.3 Пониження EJ в 4 рази та GJ в 4 разів на ділянках, де утворюються тріщин – ітерація № 1

На ділянках стержня, де  $M_{max} \geq M_{pl}$  утворюються тріщини (рис. 5.3). На цих ділянках понижуємо жорсткість на вигин EJ в 4 рази та жорсткість на кручення GJ<sub>k</sub> зменшуємо в 4 рази теж (див. таблицю 5.1)

Таблиця 5.1 Жорсткості на вигин та кручення для елемента 1-го типу числового експерименту (  $EI_y/4$  ,  $GI_k/4$  ) при ітерації №1.

№ з/п	Назва параметру	Позначення	Значення величини	Одиниця виміру
				
1	Згинальна жорсткість щодо осі Y	$EI_y$	25930,25	$T \cdot M^2$
2	Жорсткість на крутіння	$GI_k$	808	$T \cdot M^2$

На рис. 5.4 наведено епюри моментів вигину та моментів кручення після врахування виникнення нормальних тріщин на певних ділянках плит (стержнів 1-го типу кінцевоелементної схеми).



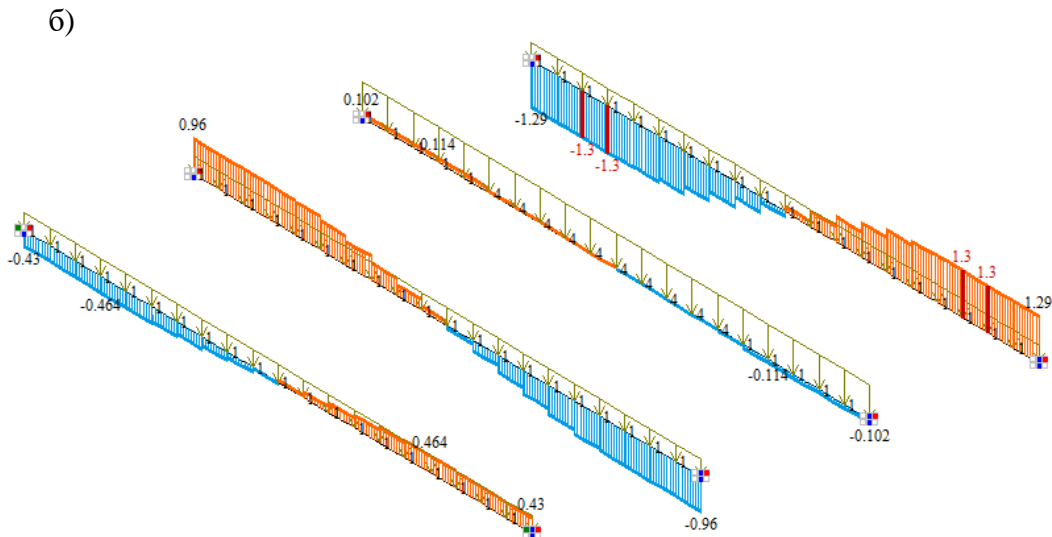


Рис. 5.4 Епюри моментів вигину  $M_y$  - а; епюри моментів кручення  $M_{xy}$  -б  
при  $EI_y = EI_{y, \text{упр}}/4$  ,  $GI_k = GI_{k, \text{упр}}/4$  (ітерація №1)

На рис.5.5 наведено мозаїку переміщень вздовж осі Z вузлів системи.

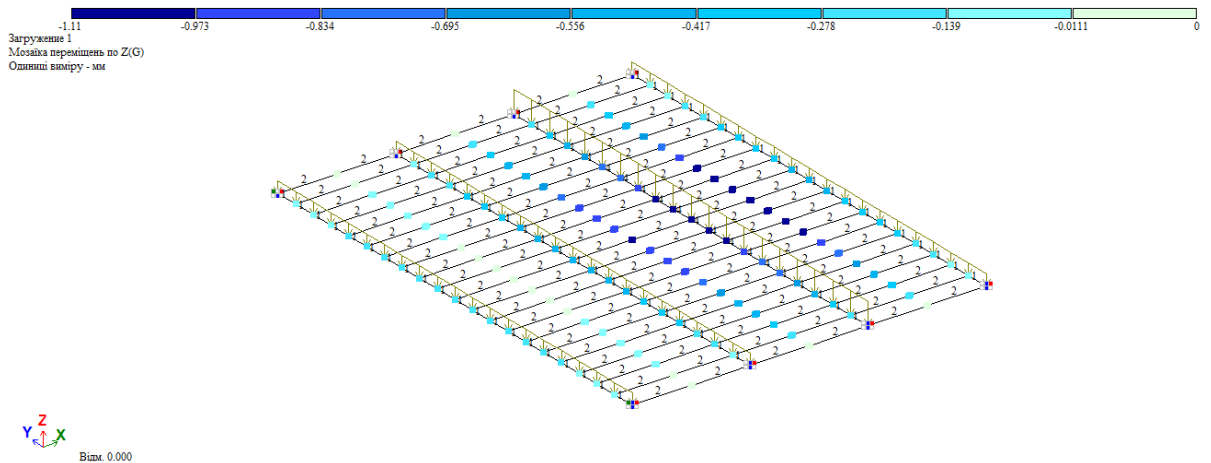


Рис. 5.5 Деформована схема та мозаїка переміщень вузлів по осі Z ( $Z_{\text{max}} = 1,11$  мм) при  $EJ_y = EJ_{y, \text{упр}}/4$  ,  $GJ_k = GJ_{k, \text{упр}}/4$  (ітерація №1)

#### 5.4 Пониження EJ в 4 рази та GJ в 4 разів на ділянках, де утворюються тріщин – ітерація № 2

На ділянках стержня, де  $M_{\text{max}} \geq M_{\text{рл}}$  утворюються тріщини (рис. 5.3). На цих ділянках понижуємо жорсткість на вигин EJ в 4 рази та жорсткість на кручення  $GJ_k$  зменшуємо в 4 рази теж (див. таблицю 5.5).

На рис. 5.6 наведено ділянки на стержнях 1-го типу, де виникають максимальні крутні моменти після першого ітераційного статичного розрахунку системи із пониженими в 4 рази в наслідок тріщиноутворення жорсткостями на вигин та кручення.

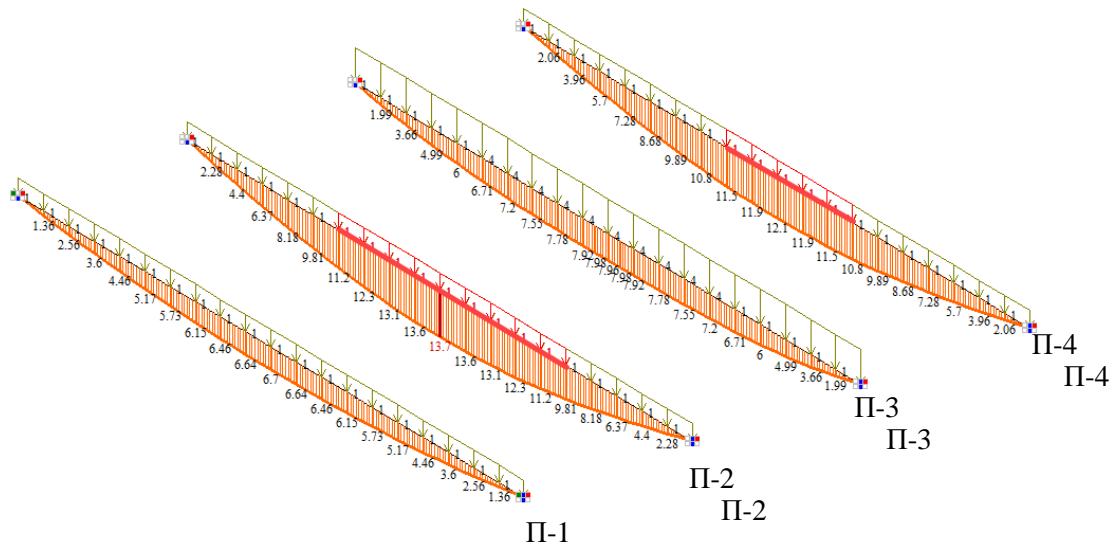
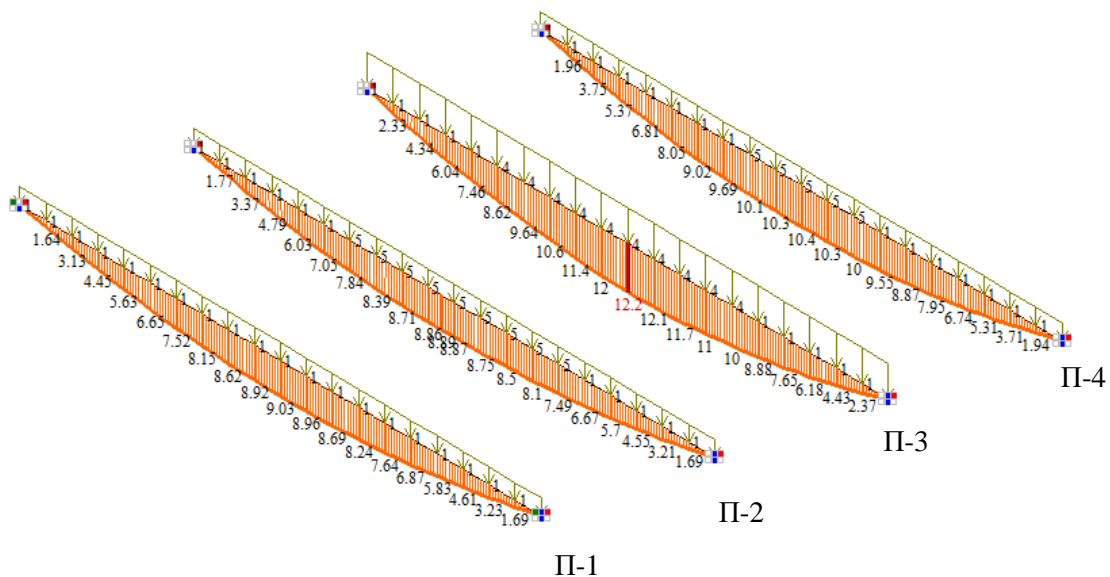


Рис. 5.6 Ділянка на стержнях де  $M_{y,max} \geq M_{crs}$  та виникають нормальні від вигину тріщини (інвертовано червоним) після 1-го ітераційного розрахунку

На цих відрізках стержня, де  $M_{y,max} \geq M_{crs}$  (див. рис. 5.6) знову понижуюємо жорсткості при крученні  $GJ_k$  та вигині  $EJ$  в 4 рази.

Виконуємо 2-й ітераційний статичний розрахунок. Результати розрахунку за 2-ю ітерацією наведено на рис. 5.7 та 5.8.



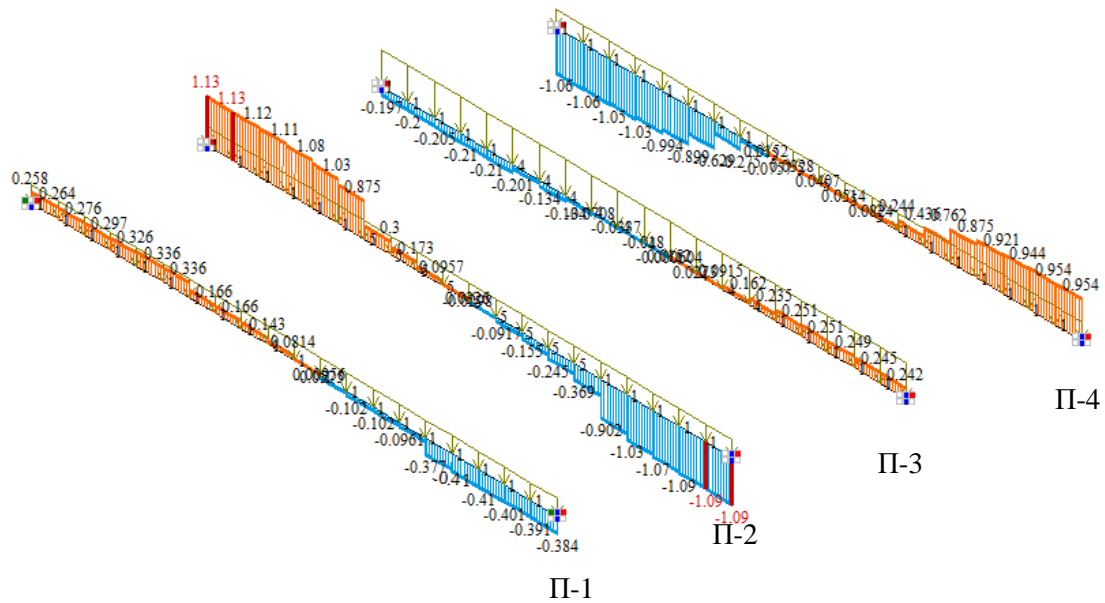


Рис. 5.7 Епюри моментів вигину  $M_y$  - а; епюри моментів кручення  $M_{xy}$  - б при  $EI_y = EI_{y, \text{упр}}/4$ ,  $GI_k = GI_{k, \text{упр}}/4$  після **2-го ітераційного розрахунку**

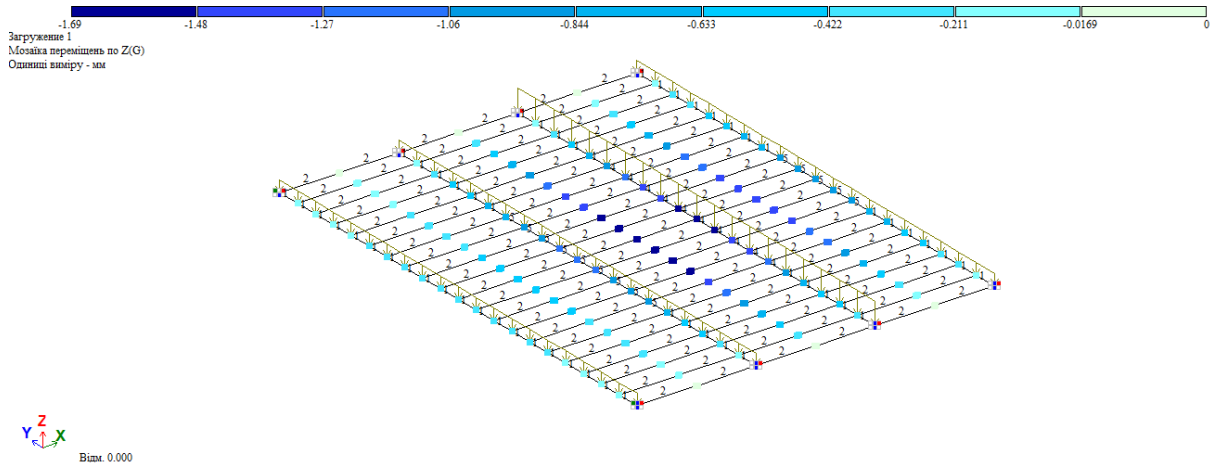


Рис. 5.8 Деформована схема та мозаїка переміщень вузлів по осі Z ( $Z_{\text{max}} = 1,69$  мм) при  $EI_y = EI_{y, \text{упр}}/4$ ,  $GI_k = GI_{k, \text{упр}}/4$  після **2-го ітераційного розрахунку**

На рис. 5.9 наведено ділянки, де виникають тріщини після двох ітераційних розрахунків.

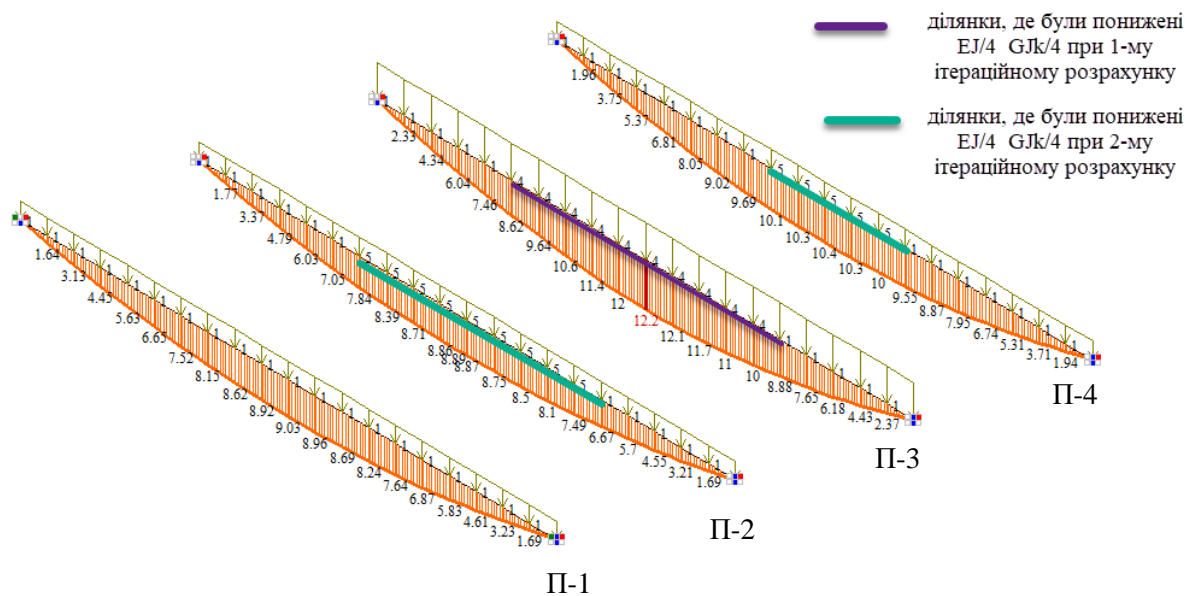


Рис.5.9 Ділянки на кінцевих елементах 1-го типу, де виникають тріщини після двох ітераційних розрахунків

Як видно із рис. 5.9 на стержні П-3 після 2-го ітераційного розрахунку  $M_{\max}=12,2$  т·м, що перевищує  $M_{\text{кр}}=11,3$  т·м. На цій ділянці при 1-му ітераційному розрахунку вже були понижені жорсткості. На всіх інших стержнях схеми (рис.5.9) максимальні моменти вигину не перевищують значення моменту тріщиноутворення. Таким чином, можемо зробити висновок, що ітераційні розрахунки можуть бути завершеними.

## 6. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

### 6.1 Напружений стан

На рис. 6.1 наведено епюри моментів вигину в стержнях 1-го типу жорсткості кінцевоелементної схеми при пружному статичному розрахунку (без врахування тріщиноутворення) та із врахуванням виникнення тріщин (рис.5.1, а та рис. 5.4, а)

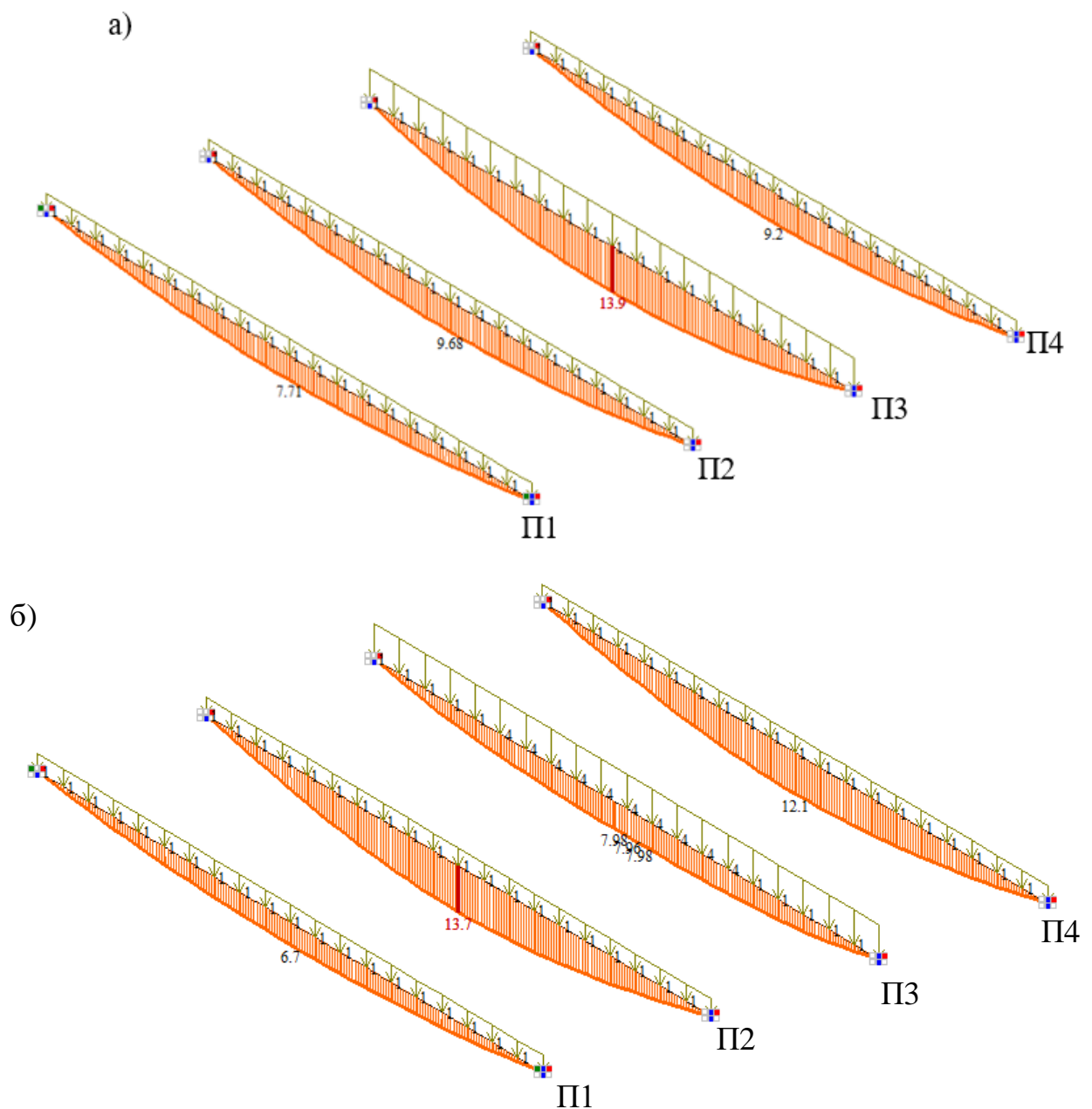


Рис. 6.1 Епюри моментів вигину в КЕ першого типу при пружному розрахунку (а) та після розрахунку (1-ша ітерація) з урахуванням нормальних тріщин (б).

Так, на епюри моментів вигину  $M_y$  (рис. 5.4,а) можна побачити, що навантаження сприйняли плити, сусідні з тією, де виникли нормальні від вигину тріщини (П-3) й переріз став ослабленим. Такий перерозподіл зусиль виникає внаслідок того, що в ячeyці перекриття збірні плит працюють сумісно оскільки вони з'єднані між собою по довгим сторонам

швами замонолічення та точково з'єднані між собою шляхом зварювання закладних деталей.

В наслідок тріщиноутворення жорсткість при вигині перерізу елемента П-3 зменшується й відбувається перерозподіл зусиль (зокрема моментів вигину  $M_y$ ) між сусідніми плитами П-2 та П-4. В елементі (плиті П-3) в порівнянні з «пружним» розрахунком  $M_y$  зменшився з 13,9 тм до 7,98 тм, тобто на 72,2%. В сусідніх елементах, навпаки, величини моменту вигину зросли – на 41,5% в елементі П-2 та на 31,5% в елементі П-4.

На рис. 6.2 наведено подальший перерозподіл моментів вигину в елементах при врахуванні тріщиноутворення в інших елементах в результаті перерозподілу зусиль після 2-го ітераційного розрахунку.

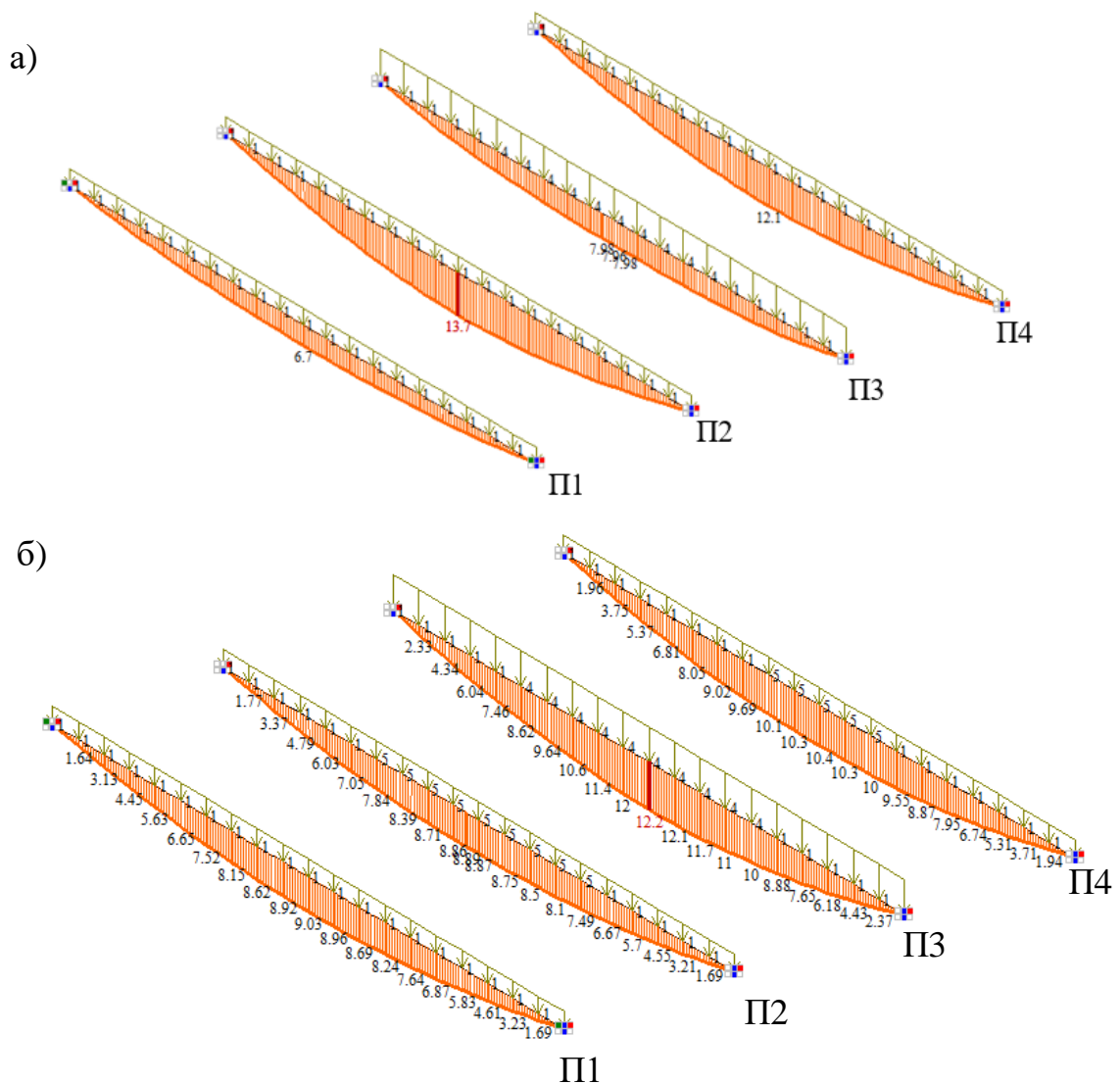


Рис. 6.2 Епюри моментів вигину в КЕ першого типу після 1-го ітераційного розрахунку (а) та після 2-го ітераційного розрахунку розрахунку (б)

Так, після зменшення жорсткостей на ділянках стержнів П-2 та П-4 (рис.5.6) внаслідок тріщиноутворення відбувся перерозподіл моментів вигину  $M_y$ . В стержні П-3 моменти згину збільшилися на 52,9% в порівнянні з 1-м ітераційним розрахунком, а в стержнях П-2 та П-4 навпаки зменшилися.

Максимальні моменти вигину після статичних розрахунків наведено в таблиці 6.1.

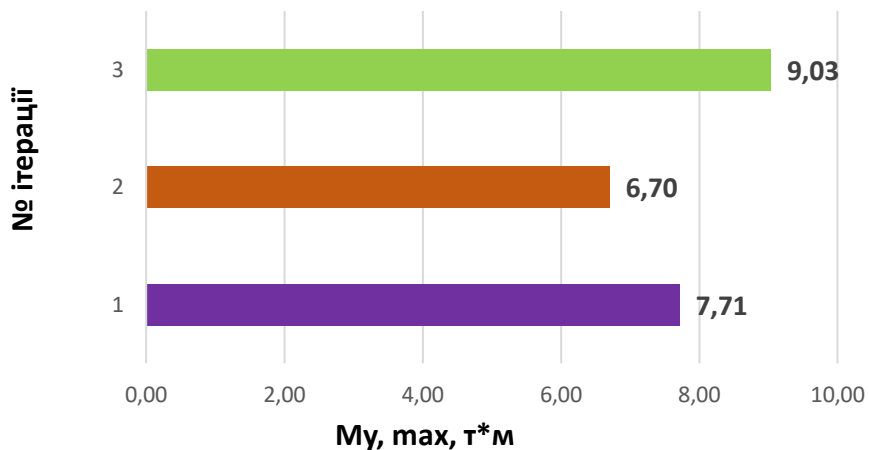
Таблиця 6.1 Максимальні моменти вигину  $M_{y, \max}$  після ітераційних розрахунків

Номер стержня	$M_{y, \max}$ [тМ]			
	Розрахунок при $M_{y, \text{упр}}$	Ітерація 1	Ітерація 2	$\frac{M_{y, \text{упр}}}{M_{y, 2}} \cdot 100\%$ , %
П-1	7,71	6,70	9,03	17,12
П-2	9,68	13,75	8,87	9,13
П-3	13,91	7,96	12,21	13,92
П-4	9,20	12,09	10,39	12,93

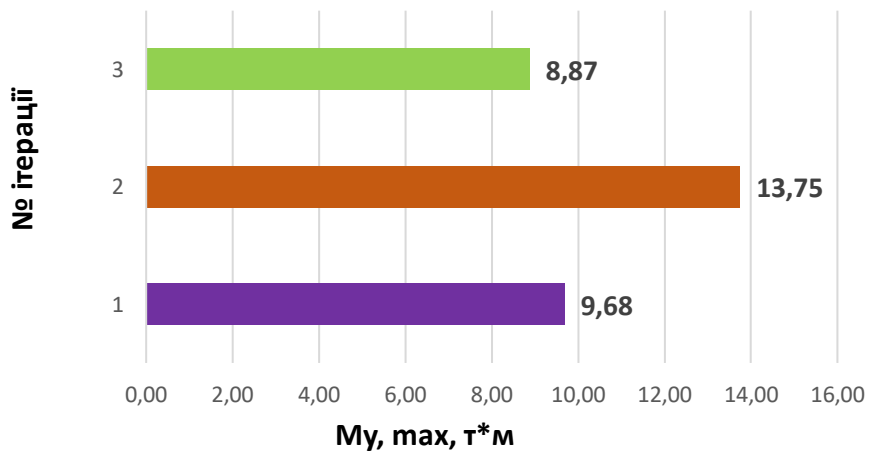
Загалом, можна констатувати, що після 2-го останнього ітераційного розрахунку в порівнянні з «пружним» розрахунком відбувся суттєвий перерозподіл моментів вигину завдяки тріщиноутворенню: так, в плиті П-1 величина моменту вигину збільшилася на 17,12%, в плиті П-2 величина моменту зменшилася на 9,13%, в плиті П-3 момент зменшився на 13,92%, а в плиті П-4 величина моменту вигину зменшлася на 12,93%.

На рис. 6.3 наведено максимальні моменти вигину  $M_{y, \max}$  в стержнях 1-го типу кінцевоелементної схеми при статичних розрахунках системи.

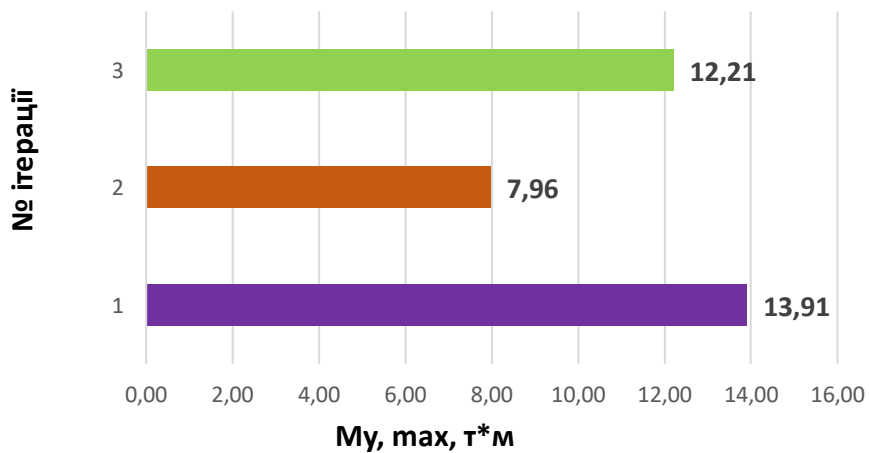
### Моменти вигину $M_{\max}$ в плиті П-1



### Моменти вигину $M_{\max}$ в плиті П-2



### Моменти вигину $M_{\max}$ в плиті П-3



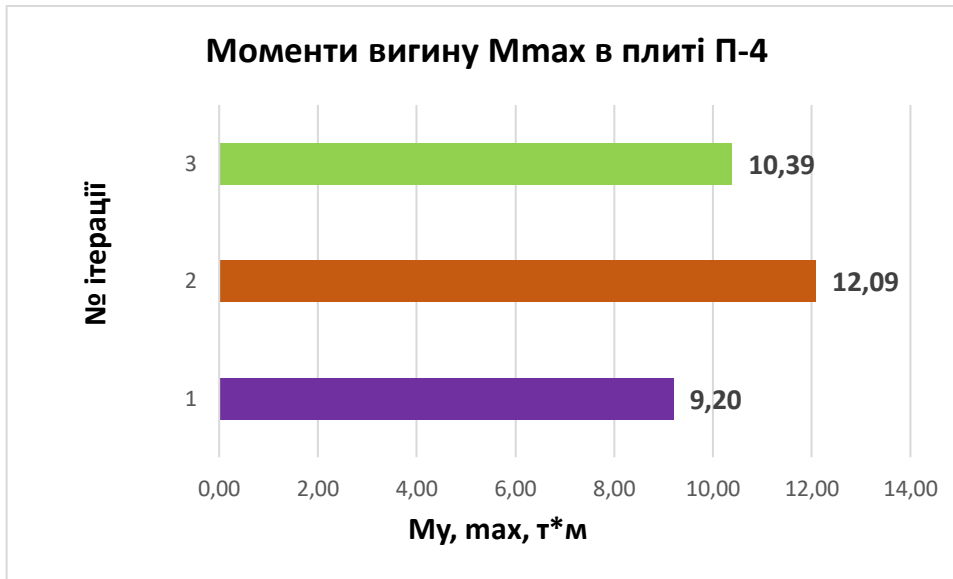
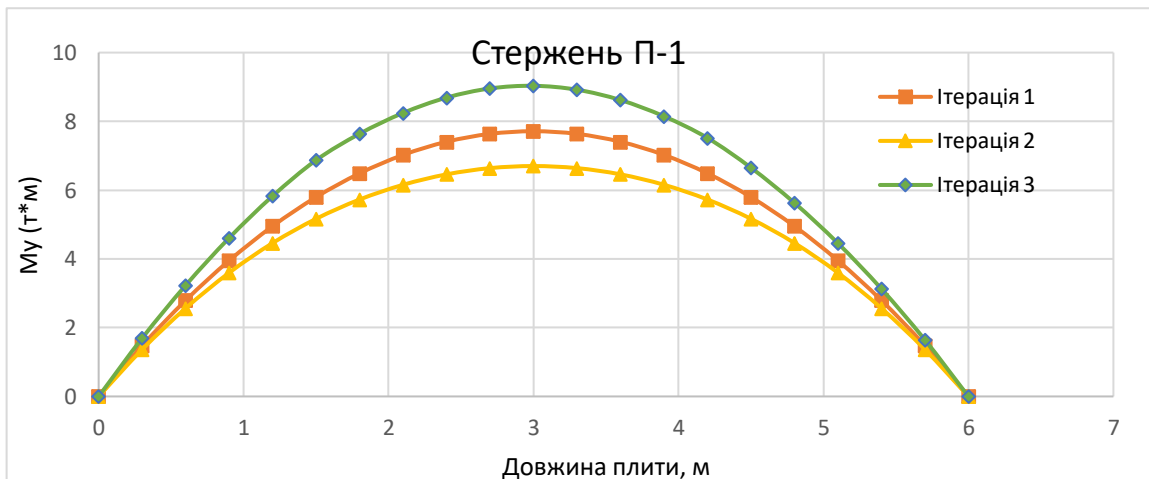


Рис. 6.3 Максимальні моменти вигину  $M_y$  в стержнях 1-го типу кінцевоелементної схеми при статичних розрахунках системи: в стержні П-1 (а); в стержні П-2 (б); в стержні П-3 (в); в стержні П-4 (г)

На рис. 6.4 наведено епюри моментів вигину для різних стержнів 1-го типу кінцевоелементної схеми.



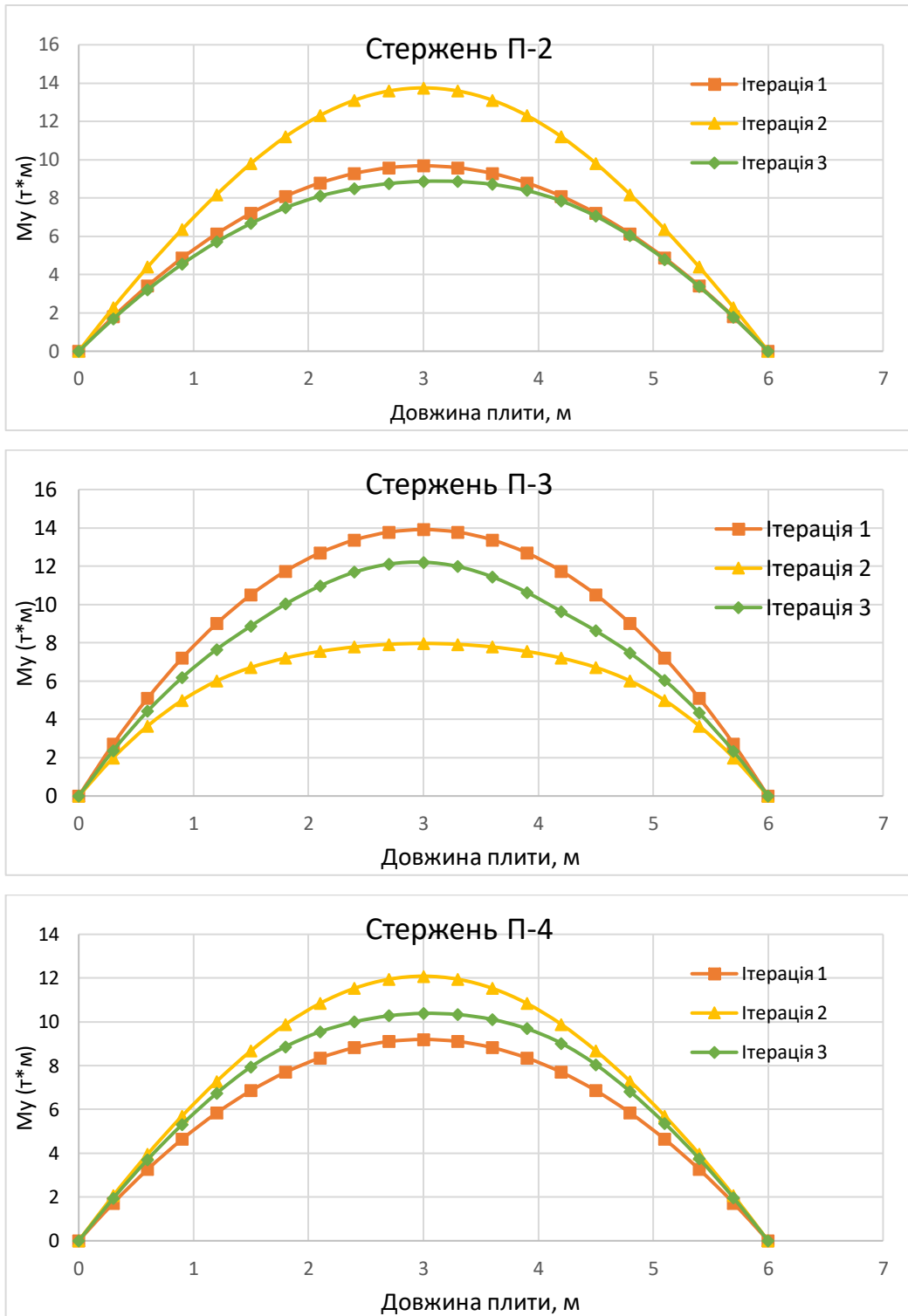


Рис. 6.4. Епюри моментів вигину для різних стержнів 1-го типу кінцевоелементної схеми

На рис. 6.5 наведено епюри моментів кручення в стержнях 1-го типу жорсткості кінцевоелементної схеми при пружному статичному розрахунку (без врахування тріщиноутворення) та із врахуванням виникнення тріщин (рис.5.1, б та рис. 5.4, б).

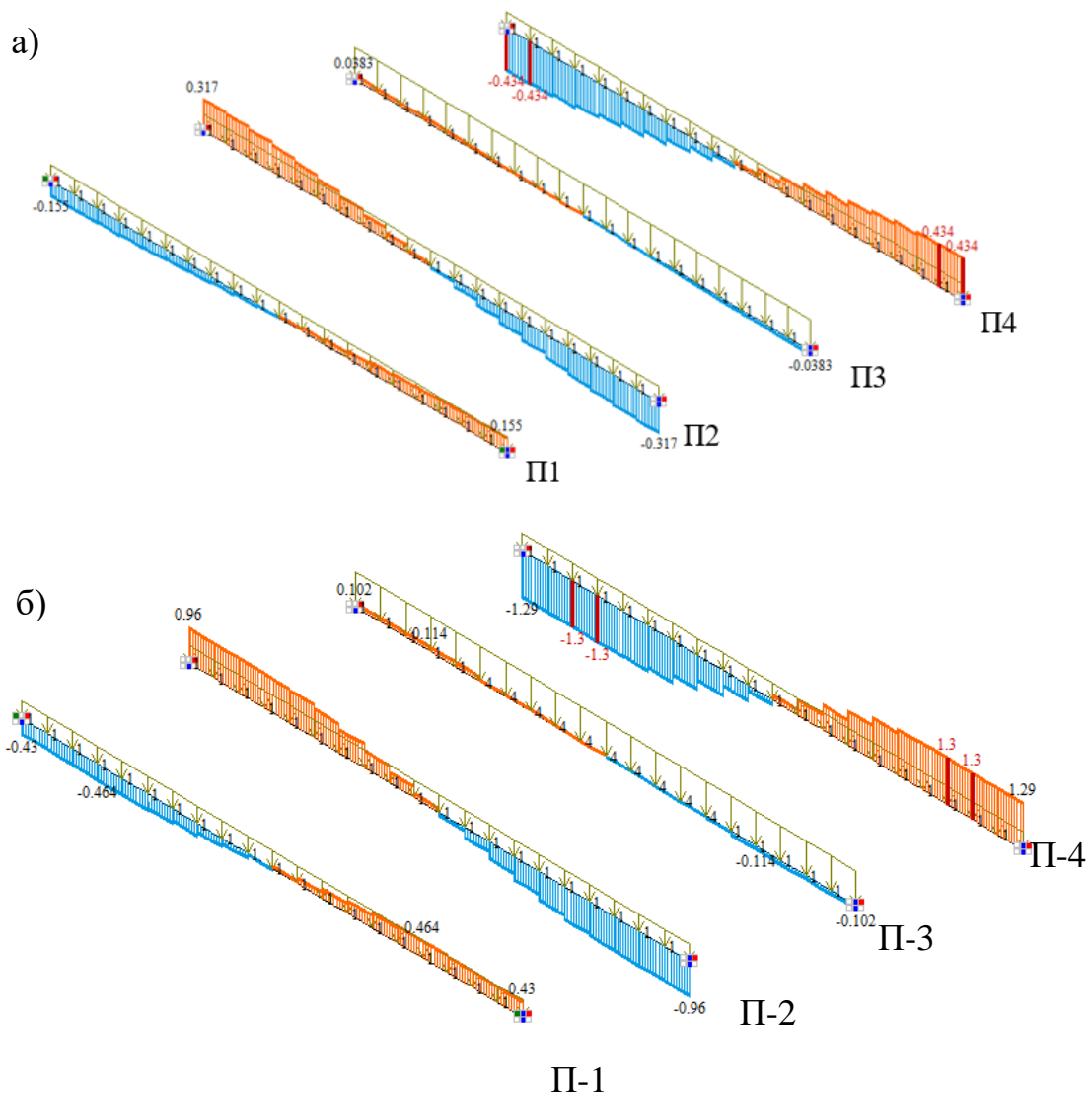


Рис. 6.5 Епюри моментів кручення  $M_k$  в кінцевих елементах першого типу при пружному розрахунку (а) та після розрахунку (1-ша ітерація) з урахуванням нормальних тріщин (б)

З епюр на рис. 6.5,а видно, що в плити П-3, що мала максимальне завантаження погонним завантаженням моменти кручення майже відсутні, а моменти вигину досягали максимальних значень (рис. ). В плитах П-2 та П-4, що сусідні з максимально завантаженим елементом виникали найбільші моменти кручення, що цілком відповідає картині розподілу крутних моментів при локальному завантаженні елементів в плитно-балочній системі.

Після статичного розрахунку з урахуванням тріщин (1-ша ітерація) можна відмітити, що в П-3 момент кручення збільшився від нульового значення до 0,114 т·м (рис.6.5,б). Збільшилися моменти кручення в сусідніх з плитою П-3 плитах – П-2 та П-4. Так в плиті (стержні) П-2 моменти кручення збільшилися на 202,8% ( з 0,317 т·м до 0,96 т·м). В плиті П-4 крутні моменти збільшилися на 199,5%. В плиті П-1 крутні моменти теж збільшилися на 177,4 %.

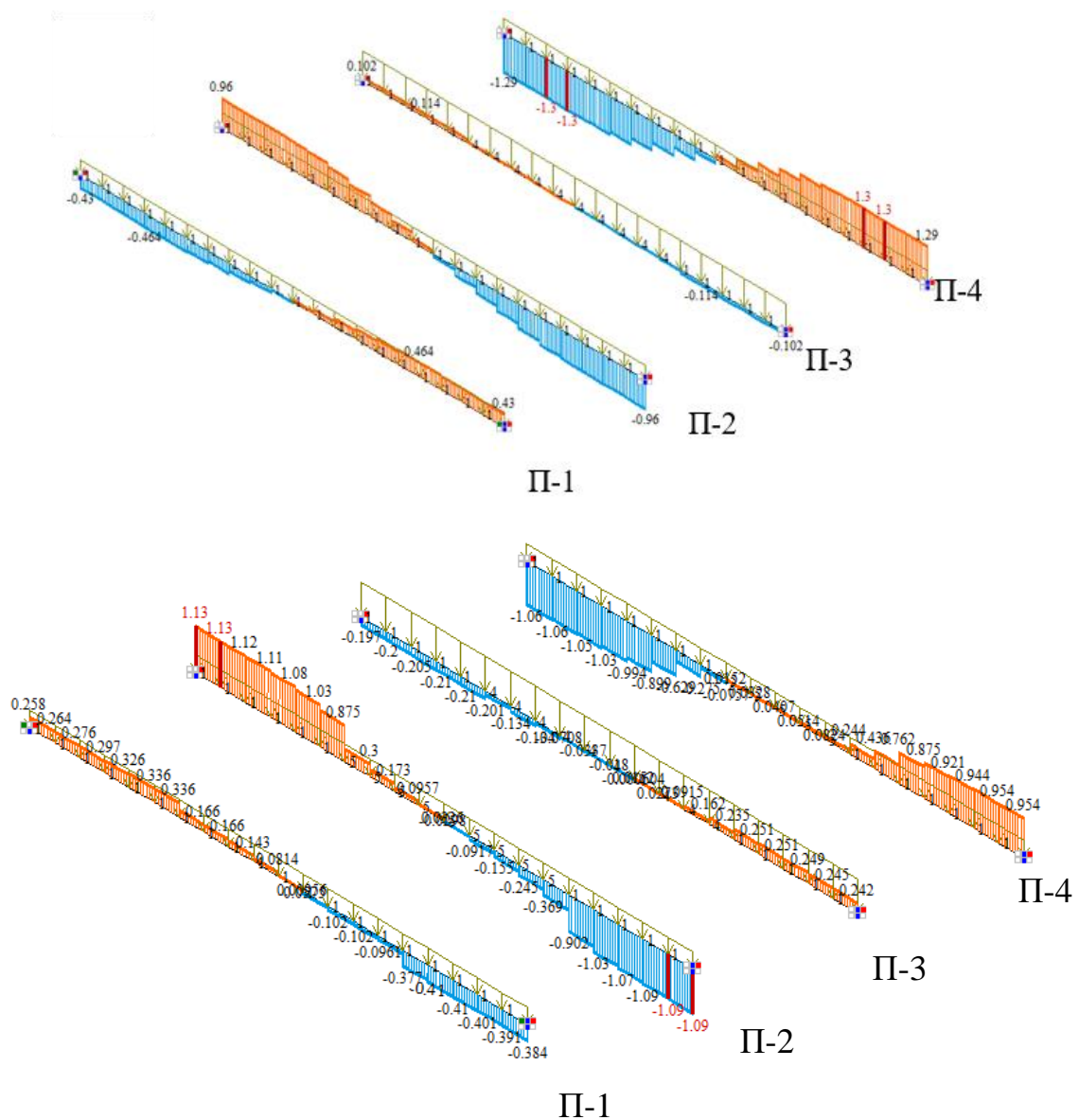


Рис. 6.6 Епюри моментів кручення  $M_k$  в КЕ першого типу після 1-го ітераційного розрахунку (а) та після 2-го ітераційного розрахунку розрахунку (б)

Порівняння результатів після 1-го ітераційного розрахунку та 2-го ітераційного розрахунку показало:

-1-й ітераційний розрахунок показав, що в середині прольотів плит П-2 та П-4 виникають нормальні тріщини. Після другого ітераційного розрахунку стало очевидним, що на ділянках, де ці тріщини виникли, моменти кручення зменшилися до мінімуму й збільшилися в зонах цих плит (П-2 та П-4), де тріщини відсутні;

- в елементі П-2 після 2-го ітераційного статичного розрахунку максимальні крутні моменти збільшилися в приопірних зонах плит з 0,96 т·м до 1,13 т·м, тобто на 17,7%;

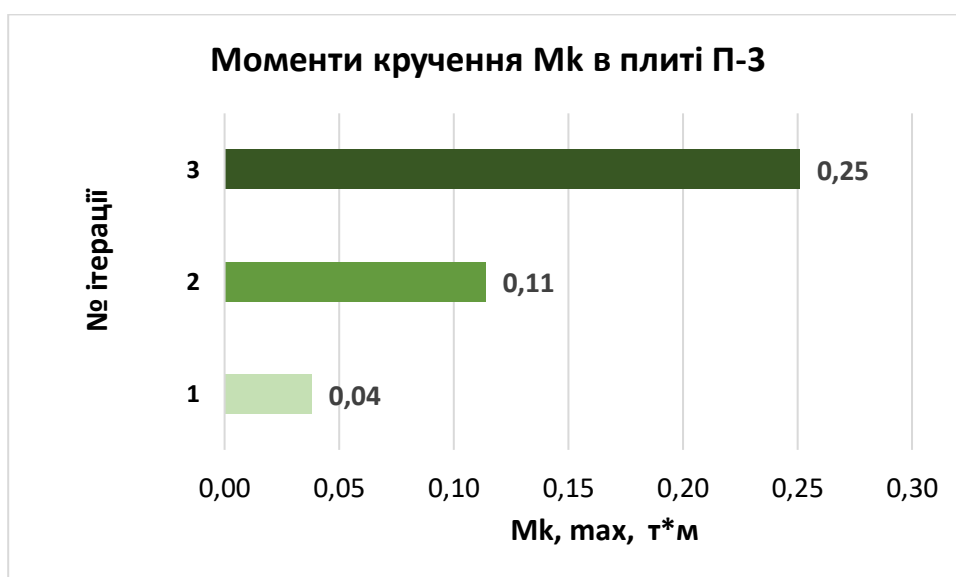
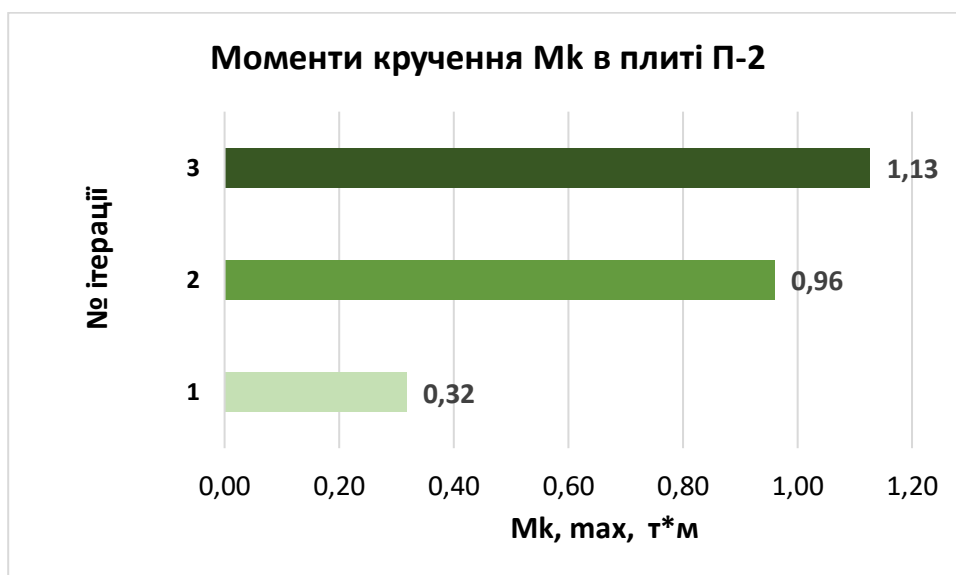
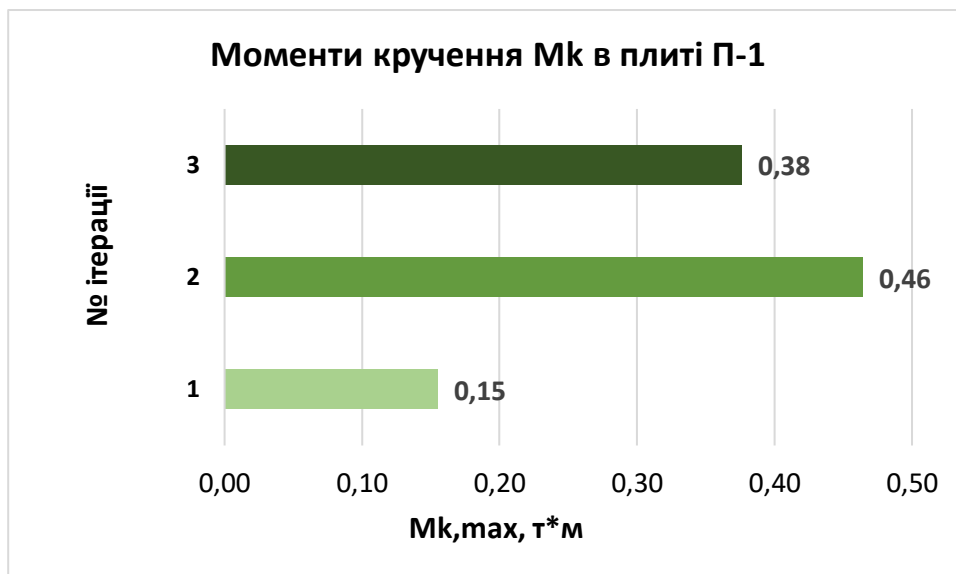
- в елементі П-4 після 2-го ітераційного статичного розрахунку максимальні крутні моменти зменшилися в приопірних зонах плит з 1,29 т·м до 0,95 т·м, тобто на 35,8%.

Максимальні моменти кручення після статичних розрахунків наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 Максимальні моменти кручення  $M_k$  після ітераційних розрахунків

Номер стержня	$M_k$ [т·м]			
	Розрахунок при $M_{k, \text{упр}}$	Ітерація 1	Ітерація 2	$\frac{M_{k, \text{упр}}}{M_{k, 2}} \cdot 100\%$ , %
П-1	0,15	0,46	0,38	145,28
П-2	0,32	0,96	1,13	255,50
П-3	0,04	0,11	0,25	556,03
П-4	0,43	1,30	1,06	145,02

На рис. 6.7 наведено максимальні моменти кручення  $M_{k, \text{max}}$  в стержнях 1-го типу кінцевоелементної схеми при статичних розрахунках системи.



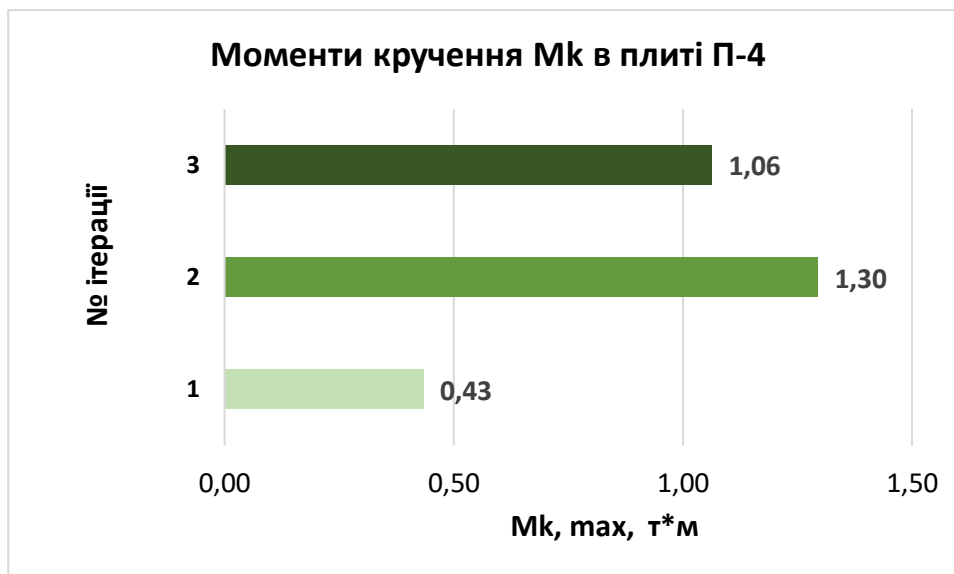
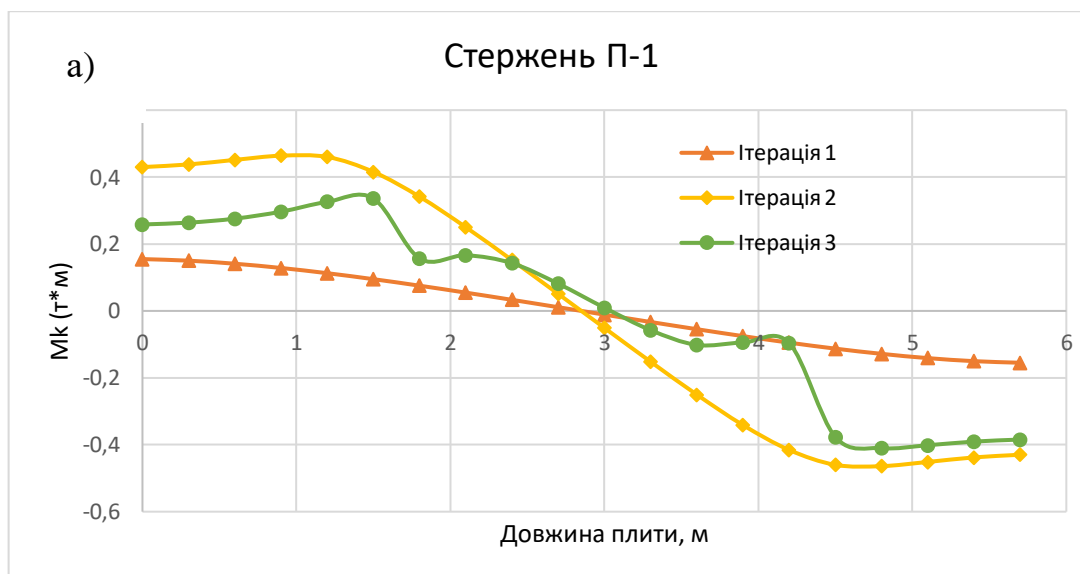
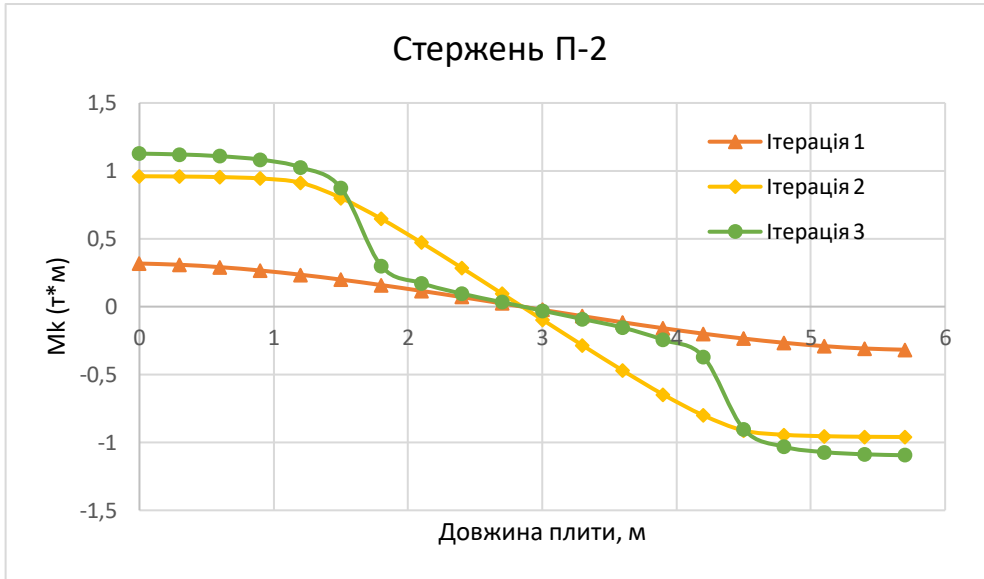


Рис. 6.7 Максимальні моменти кручення  $M_k$  в стержнях 1-го типу кінцевоелементної схеми при статичних розрахунках системи: в стержні П-1 (а); в стержні П-2 (б); в стержні П-3 (в); в стержні П-4 (г)

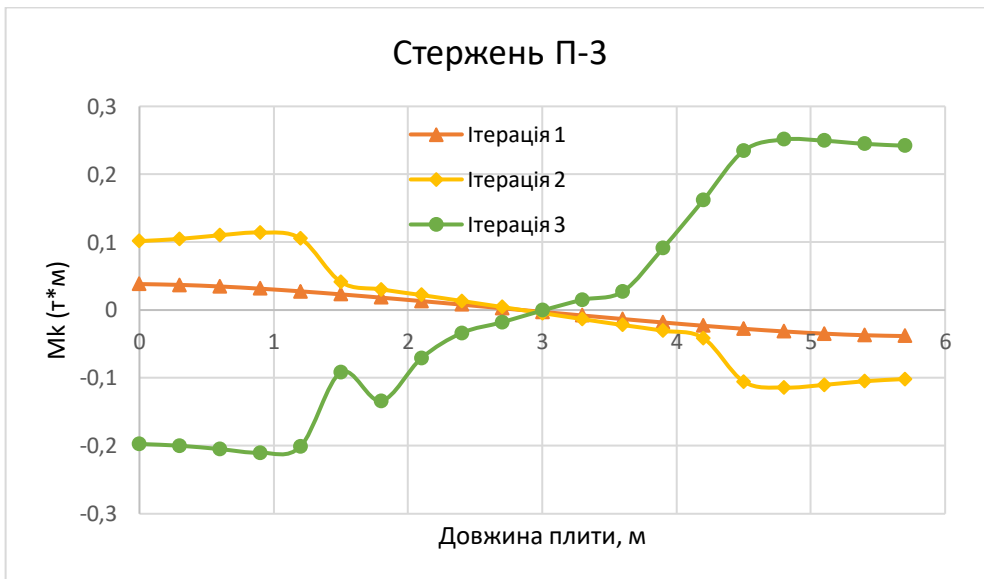
На рис. 6.8 наведено епюри моментів кручення для різних стержнів 1-го типу кінцевоелементної схеми.



б)



В)



Г)

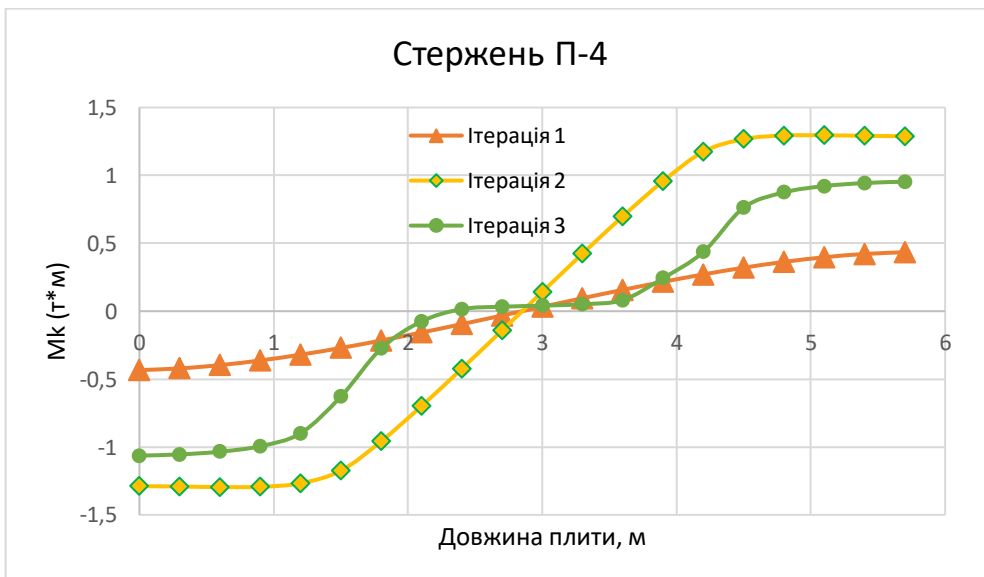


Рис. 6.8. Епюри моментів кручення  $M_k$  для різних стержнів 1-го типу кінцевоелементної схеми

## 6.2 Деформований стан

На рис. 6.9 наведено деформовану схему ячейки з порожнистих плит.

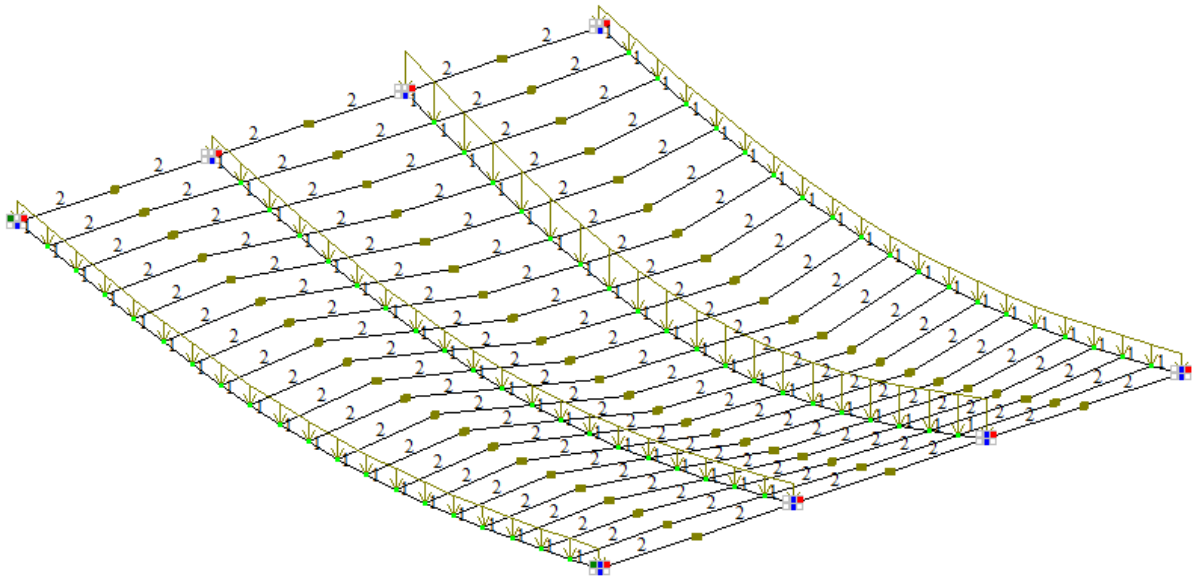


Рис.6.9 Загальний вигляд деформованої схеми після пружного розрахунку

В таблиці 6.3 наведено переміщення вузлів в прольоті плитної системи.

Таблиця 6.3 Переміщення вузлів  $f_z$  вузлів кінцевоелементної схеми

№ вузла	Пружний розрахунок	Ітерація №1	Ітерація №2	Різниця, %
<b>1</b>	-0,08	-0,16	-0,20	150
<b>2</b>	-0,16	-0,31	-0,39	144
<b>3</b>	-0,24	-0,46	-0,58	142
<b>4</b>	-0,31	-0,61	-0,76	145
<b>5</b>	-0,37	-0,75	-0,93	151
<b>6</b>	-0,42	-0,88	-1,07	155
<b>7</b>	-0,46	-0,98	-1,18	156,5
<b>8</b>	-0,49	-1,05	-1,28	161
<b>9</b>	-0,51	-1,10	-1,34	163
<b>10</b>	<b>-0,52</b>	<b>-1,11</b>	<b>-1,36</b>	<b>161.5</b>

<b>11</b>	-0,51	-1,10	-1,34	162.7
<b>12</b>	-0,49	-1,05	-1,28	161.2
<b>13</b>	-0,46	-0,98	-1,20	160.8
<b>14</b>	-0,42	-0,88	-1,09	159.5
<b>15</b>	-0,37	-0,75	-0,94	154.05
<b>16</b>	-0,31	-0,61	-0,77	148.4
<b>17</b>	-0,24	-0,46	-0,58	141.7
<b>18</b>	-0,16	-0,31	-0,39	143.75
<b>19</b>	-0,08	-0,16	-0,20	150

Із таблиці 6.3 видно, що з поетапним пониженням жорсткостей на вигин та на кручення, з ослабленням перерізів плит по їх довжині жорсткість системи загалом зменшується, а прогини після кожного ітераційного розрахунку збільшуються.

Так, порівнюючи результати після пружного розрахунку та результати після 1-го ітераційного статичного розрахунку можна констатувати, що прогини системи зросли з 0,52 мм до 1,11 мм, тобто збільшилися на 113,4%.

Порівнюючи результати статичного розрахунку після 1-ї ітерації та після 2-ї ітерації слід відзначити, що прогини системи збільшилися на 22,5%.

На рис.6.10 наведено максимальні переміщення вузлів системи вздовж осі Z в прольоті плитної ячейки.

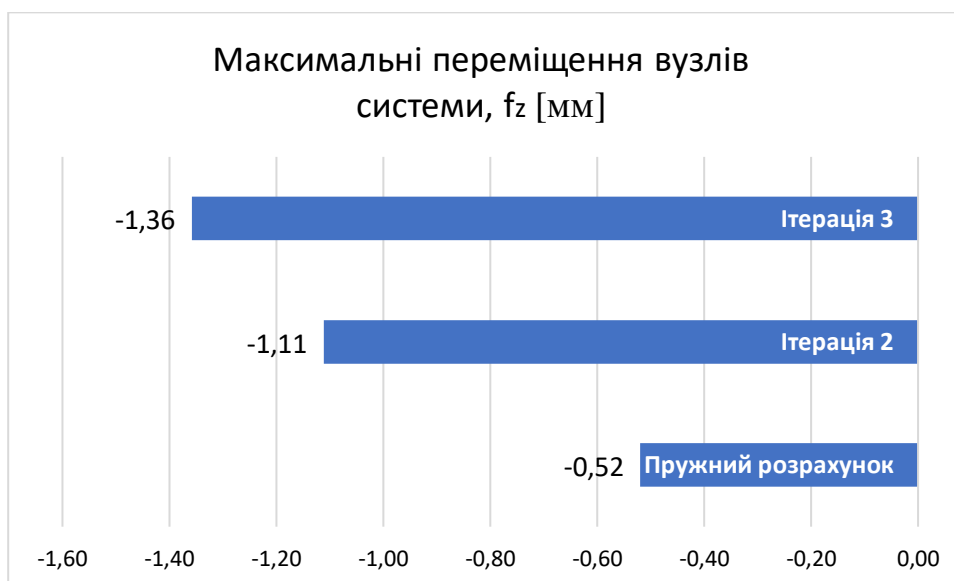


Рис.6.10 Максимальні переміщення вузлів системи вздовж осі Z в прольоті плитної ячейки

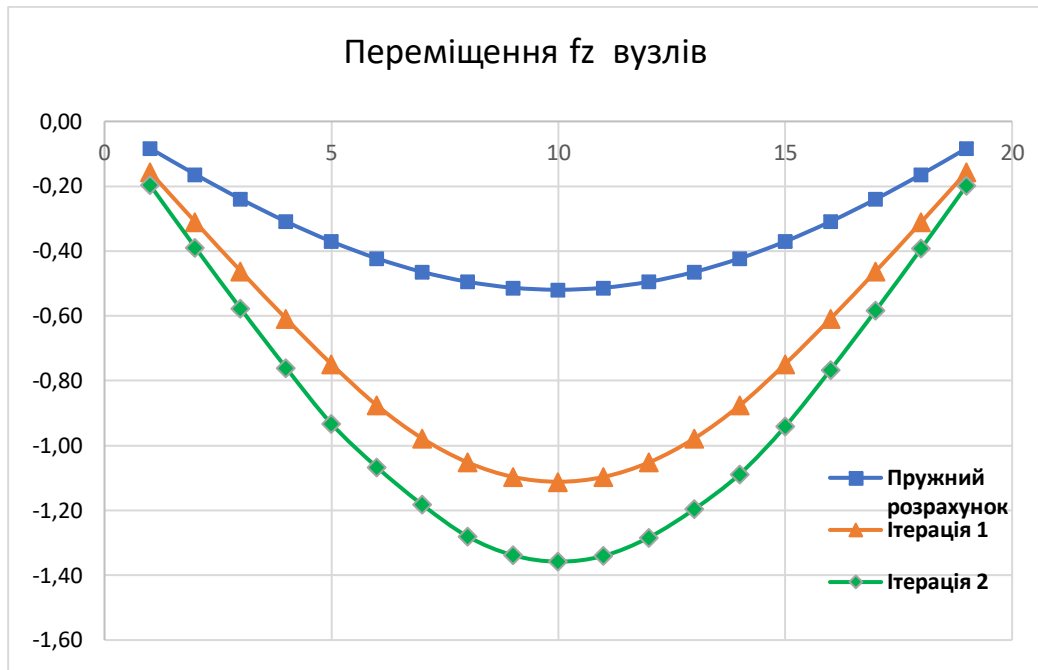


Рис.6.11 Графіки прогинів (переміщення вузлів KE схеми по вертикалі)

## РОЗДІЛ 7

### ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як **висновки** можна сформулювати наступне:

1. Прийнята аналітична скінченоелементна модель ячейки з багатопорожнистих плит у вигляді перехресної стержньової системи забезпечує спільну роботу плит в ячейці.
2. Стержньова скінченоелементна схема якомога точно сприяє виконанню поставлених задач та меті дослідження
3. При виникненні тріщин відбувається перерозподіл внутрішніх зусиль в стержнях скінченоелементної моделі.
4. Ітераційні розрахунки, що враховують поетапне виникнення нормальних від вигину тріщин внаслідок перерозподілу моментів вигину в просторовій статично невизначуваній системі, якою є ячейка з багатопорожнистих плит, дозволяють оцінити реальний

напружений стан в її елементах. Деформації в наслідок розрахунків з урахуванням тріщиноутворення є більш точними й відповідають реальній картині деформацій будівельної системи.

5. Крутні моменти збільшуються ТІЛЬКИ в елементах, які не тріснули, а в інших у рази зменшується.

### **Розвиток та перспективи подальших досліджень**

1. Стержні, якими апроксимована плитна ячейка слід більш густо розбити на стержньові скінчені елементи.
2. Застосовуючи існуючі методики визначення жорсткості при крученні [19, 22-26] слід більш точно визначити значення жорсткості при крученні для залізобетонного елемента з нормальними тріщинами на конкретних ділянках стержньового елемента враховуючи висоту нормальної тріщини, конфігурацію та розміри поперечного перерізу стержня.
3. Величини жорсткості на вигин на ділянках, де утворюються нормальні від вигину тріщини слід обчислити та прийняти за відомою нормативною методикою.
4. Стержньові елементів 2-го типу (22 x 30 см) слід теж розбити на більш короткі скінчені елементи й визначити ділянки, на яких утворюються чи не утворюються тріщини. До алгоритму ітераційних розрахунків включити окрім стержнів 1-го типу також і стержні 2-го типу.
5. Така деталізація ітераційних статичних розрахунків з урахуванням тріщиноутворення надасть ще більш точну картину розподілу внутрішніх зусиль (моментів вигину та моментів кручення) для конкретної скінченоелементної схеми.