

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО КОНТЕЙНЕРА ПРИ ШТАБЕЛЮВАННІ ДЛЯ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Попов В.О., Байда Д.М.

Вінницький національний технічний університет
Вінниця, Україна

АНОТАЦІЯ: У статті розроблено ефективний метод моделювання напружено деформованого стану залізобетонного контейнера під дією статичних навантажень, що виникають при штабелюванні; засобами “Lira 9.0” розроблені кінцево елементні моделі, що відповідають конструкції контейнера у межах поля допусків; запропоновані рекомендації щодо удосконалення конструкції.

АННОТАЦИЯ: В статье разработан эффективный метод моделирования напряженно-деформированного состояния железобетонного контейнера под действием статических нагрузок, возникающих при штабелировании; средствами “Lira 9.0” разработаны конечно-элементные модели, отвечающие конструкции контейнера в границах поля допусков, предложены рекомендации по усовершенствованию конструкции.

ABSTRACT: In this article had been developed effective method of modeling the tensely-strained condition of reinforced concretes container under the dead load of stack; had been done three super-elements models which are adequate the construction of container within the ambit of tolerances by Lira 9.0; had been offered recommendations to improve the construction of container.

ВСТУП. АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Відомо, що на даний момент в найбільш розвинутих країнах усього світу постає проблема утилізації відходів ядерної енергетики і, відповідно, збільшується попит на якісне, надійне упаковочне обладнання. Особливо гостро це відчувається в Україні після катастрофи на Чорнобильській АЕС. Даними питаннями займаються такі відомі науковці як В.В. Сакало, В.І. Гавриленко, Є.М. Бабич, В.Р. Сердюк. Одним із типів упаковки для перевезення брукхту, що забруднений радіонуклідами, є залізобетонні контейнери. Їх прийнято моделювати та розраховувати згідно [1, 2].

Останні дослідження, присвячені даній проблематиці, належать відомим вченим В.А. Огороднікову, та А.М. Бамбурі. Однак у працях цих вчених моделювання конструкції контейнера під дією навантажень, що виникають при штабелюванні, розглянуто оглядово; моделі для аналізу напружено-деформованого стану, не враховують поля допусків, з якими можуть бути виконані їх елементи, що, як буде показано нижче, суттєво

звужує межі їх використання. Крім цього, розроблені на даний момент конструкції захисних контейнерів, армовані не достатньо раціонально, виходячи з критерію витрат арматурної сталі. Це обумовлює актуальність та доцільність досліджень, присвячених раціоналізації конструкції контейнерів та розвитку методів моделювання їх роботи під дією розрахункових навантажень.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На основі розрахунків напружено-деформованого стану методами математичного та кінцево-елементного моделювання конструкції контейнера оцінити його міцність, та відповідність його конструкції вимогам [8, п.п. 1.3.2.4,1)] та [2 с.10, п.п. 4.3.4.2,1)]. Для виконання даної мети необхідно розв'язати комплекс наступних задач: розробити ефективний метод розрахунку; виконати збір навантажень на контейнер, розробити їх спрощену модель, побудувати кінцево-елементну модель засобами "Lira 9.0"; визначити оціночні значення внутрішніх зусиль та напружень у елементах контейнера від прикладених навантажень; виконати перевірку небезпечних перерізів по першій групі граничних станів; виконати аналіз отриманих результатів, представити рекомендації.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Опис напружено-деформованого стану конструкції контейнера в загальному вигляді є неможливим і потребує прийняття низки припущень. Наступні припущення є достатньо загальними для загальної теорії опору матеріалів та будівельної механіки: метал, з якого виготовлені елементи конструкцій, є неперервним, однорідним та лінійно пружним; бетон є лінійно деформівним тілом у межах стиску та не чинить опору навантаженням розтягу; опора під контейнером, є абсолютно жорсткою, плоскою поверхнею [3 – 7]. .

Вихідними даними для виконання поставлених задач є [8]. Контейнер має форму полого паралелепіпеда з габаритними розмірами 2400x1650x1620 мм, спряження стінок мають фаски ~150 мм, що захищені стійками з порожнистого тригранника. Кришка замонічена у корпус, при цьому забезпечується жорстке з'єднання її із стінками (рис.1).

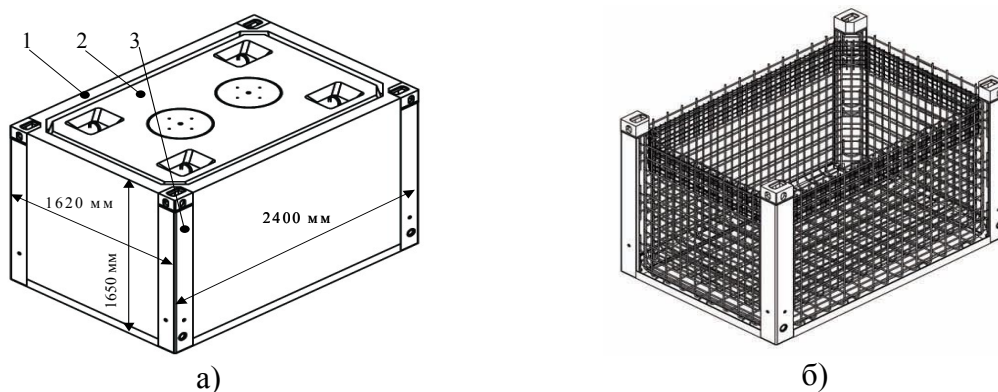


Рис. 1. Контейнер: а – загальний вид, де 1 – контейнер, 2 – кришка, 3 – стійки; б – армування корпуса

Маса контейнера, що заповнений корисним навантаженням згідно [8] $m = 1,350 \cdot 10^4$ кг. Корисне навантаження являє собою затверділу штукатурну суміш, в яку замоноличені ємності з таблетованим радіоактивним матеріалом. Стінки і дно мають чотирирядне основне армування, а в верхньому перерізі - шестирядне (рис. 1,б). Згідно [8] зовнішній об'ємний коробчатий каркас виконано з арматури Ø10 мм кроком 150 мм; середній каркас виконано з арматури Ø5 мм кроком 50 мм; внутрішній об'ємний коробчатий каркас виконано з арматури Ø8 мм кроком 150 мм (рис. 1,б). Бетон для елементів контейнера має клас міцності на стиск В30 (табл. 1).

Таблиця 1

Основні характеристики бетону В30 дрібнозернистої групи згідно [6]

Матеріал	Найменування і величина нормативної характеристики (граничні стани першої групи)			
	Осьовий стиск $R_b, \text{МПа}$	Осьовий розтяг $R_{bt}, \text{МПа}$	Модуль пружності $E_b, \text{МПа}$	Коефіцієнт Пуассона μ
Бетон В30	17	1,2	23000	0,17

Згідно [1, 2] контейнер повинен витримувати статичне навантаження при штабелюванні, що перевищує масу бруто не менше, аніж у п'ять разів (рис. 2,а).

Для розрахунку конструкції контейнера застосований метод кінцевих елементів, а саме, для моделювання стінок, дна, кришки, стійок контейнера застосоване пластинчасте кінцево елементне моделювання, а тіло, що заповнює внутрішній об'єм, змодельоване спеціальним навантаженням.

Деякі наступні припущення прийняті з метою збільшення діючих навантажень, що надалі призведе до збільшення коефіцієнту запасу міцності конструкції: внутрішня місткість контейнера не надає йому додаткової міцності, однак забезпечує зв'язність роботи його основних елементів; стінка, дно і кришка контейнера змодельовані пластинчастими 3-х і 4-х вузловими кінцевими елементами (рис. 2,б,в); контейнер опирається на поверхню чотирма стійками та бічними накладками у випадку виготовлення конструкції не використовуючи поле допусків;

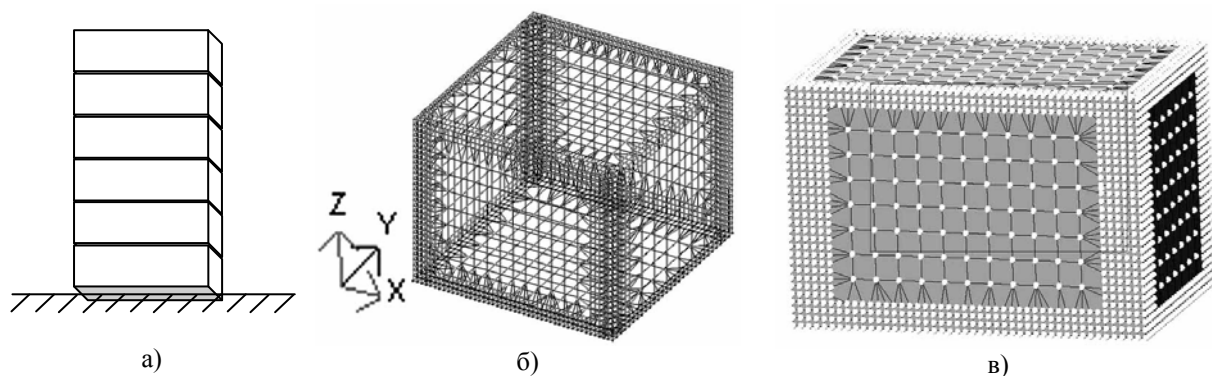


Рис. 2. Кінцево-елементна модель контейнера при варіанті розрахунку без використання поля допусків (проектне виконання всіх елементів): а – схема завантаження, б, в – розрахункова схема

Запропоновані моделі контейнера розроблені у фізично нелінійній постановці, з врахуванням особливостей поведінки залізобетону під дією комплексу навантажень.

На конструкції корпусу контейнера (що складається із дна та стінок) передбачено металеві виступи, що розташовані у кутах – стійки, які згори виконані врівень з корпусом та виступають над кришкою на величину $\Delta_{\sigma} = 5 \text{ мм}$, внизу виконані врівень з кутками корпусу, що розташовані по периметру та виступають над дном на величину $\Delta_{\mu} = 5 \text{ мм}$. Куттик має в нижній опорній частині ширину 125 мм (див. рис. 1,б). Деформації дна та кришки від власної ваги та ваги корисного навантаження (рис.4,а,б) не перевищують 0,04 мм.

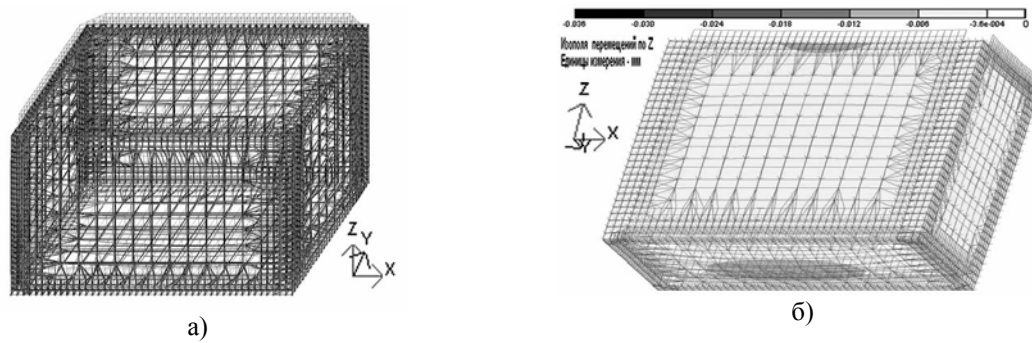


Рис. 4. Контейнер під дією власної ваги: а – характер деформацій, б – деформації по Oz

Таким чином при роботі контейнера у штабелі дно верхнього контейнера та кришка нижнього можуть дотикатись тільки у випадку їх виготовлення на верхній границі поля допусків.

Виходячи з попереднього, верхній контейнер в штабелі передає навантаження на нижній також через виступаючі кутики на верхній обріз стінок корпусу шириною 110 мм загальною площею $A_{cm} = 0,836 \text{ м}^2$. Тиск на верхній обріз становитиме:

$$p = 5 \cdot g \cdot m \cdot \gamma_f / A_{cm}. \quad (1)$$

Звідки $p = 5 \cdot 9,81 \cdot 1,35 \cdot 10^4 \cdot 1,1 / 0,836 = 0,872 \text{ (МПа)}$. Тиск врахуємо при режимі виготовлення елементів конструкції без використання поля допусків (без відхилень).

На рис. 5 показана опорна стійка контейнера у вигляді порожнистої тригранної призми з листа товщиною 6 мм. Стійки зв'язані з основним бетоном по гіпотенузі силами зчеплення та закладними елементами, що підвищує її місцеву стійкість. Матеріал всіх елементів стійки – Ст3 (ГОСТ 16523-89) з розрахунковим опором $R_y = 230 \text{ МПа}$. В найбільш невідгідному випадку при виконанні стійки на верхній межі допусків поверхня фітінгів виступає за межі корпусу на 1...2 мм, у то же час, нижня частина стійки також виступає за нижню поверхню дна Корпусу на 1...2 мм, при цьому на них передається все навантаження від штабеля. Загальний тиск на верхню площину одного фітінга площею $A_{\phi} = 0,0268 \text{ м}^2$:

$$p_{\sigma} = 5 \cdot g \cdot m \cdot \gamma_f / (4 \cdot A_{\phi}), \quad (2)$$

звідки $p_{\sigma} = 5 \cdot 9,81 \cdot 1,35 \cdot 10^4 \cdot 1,1 / (4 \cdot 0,0268) = 6,795 \text{ (МПа)}$.

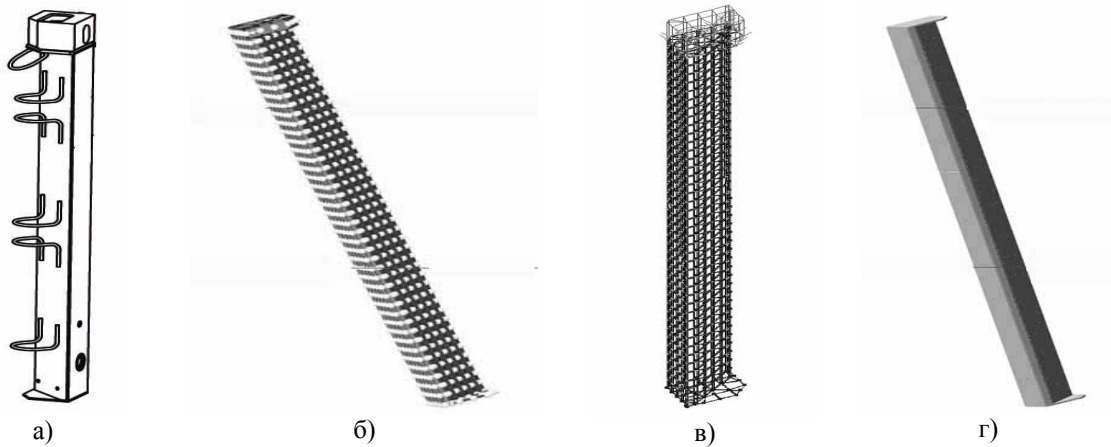


Рис. 5. Кутова стійка: а – загальний вид, б, в – кінцевоелементна модель, г – 3D-визуалізація моделі

Внутрішня стінка стійки площею $A_{стк} = 0,836 \text{ м}^2$ сприймає вертикальний тиск від власної ваги контейнера:

$$p_{бок} = g \cdot m \cdot \gamma_f / (4 \cdot A_{стк}). \quad (3)$$

Звідки $p_{бок} = 9,81 \cdot 1,35 \cdot 10^4 \cdot 1,1 / (4 \cdot 0,287) = 0,127 \text{ (МПа)}$. Дані тиски, що визначені за формулами (2) і (3), врахуємо при моделюванні стійки корпусу контейнера в режимі їх виготовлення на верхній границі поля допусків.

Режим виготовлення елементів без використання поля допусків

У цьому випадку навантаження від штабеля передається на верхній обріз корпусу. Вихідними даними для розрахунку є модель корпусу (див. рис. 2,б). Результати розрахунку зображено на рис.6. Еквівалентні напруження визначено за теорією міцності Мора, що непогано підтверджується для крихких матеріалів. Значення найбільших внутрішніх зусиль в характерних перерізах контейнера представлено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунку

Елемент конструкції	Максимальні значення			
	згинальних моментів		напружень від сил розтягу-стиску	
	$M_x, \text{кН}\cdot\text{м}$	$M_y, \text{кН}\cdot\text{м}$	$N_x, \text{МПа}$	$N_y, \text{МПа}$
Кришка	-2,0	-2,6	-1,5	-1,5
Стінка у кришки	+4,0	+4,0	-4,6	-5,6
Стінка	+2,7	+3,3	-4,6	-5,6
Стінка у дна	-1,3	-1,3	-4,6	-5,6
Дно	-2,0	-2,6	-1,5	-1,5

Стінки контейнера є стійками-стінками. Їх розрахунок слід вести, виходячи з параметрів N_x, N_y, T_{xy} . Аналізуючи ізополя, що зображені на рис. 6 робимо висновок, що міцність стінок забезпечена.

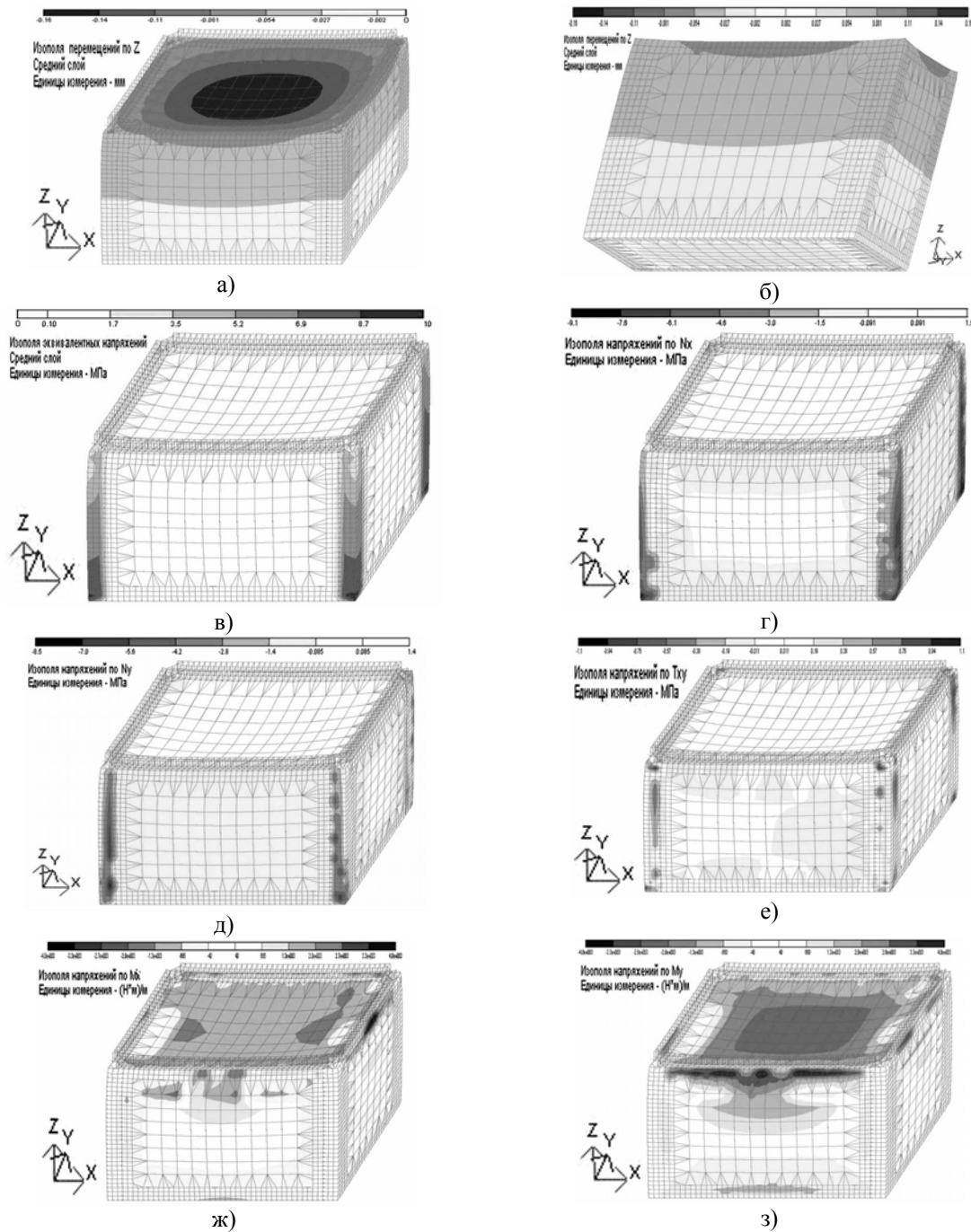


Рис. 6. Силові фактори, деформації і напруження у елементах контейнера (випадок виконання конструкції без використання поля допусків): деформації: а – по Oz (вид згори), б – по Oz (вид знизу); в – еквівалентні напруження, г – N_x , д – N_y , е – T_{xy} , ж – M_x , з – M_y

Перевірку армування дна і кришки виконаємо, виходячи з параметрів M_x , M_y , M_{xy} , Q_x , Q_y . У спрощеному варіанті в розрахунок враховуються в основному параметри M_x , M_y . Так як внутрішні зусилля викликають в елементах дна і кришки контейнера напруження розтягу та стиску, що не перевищують розрахункових міцність найбільш завантажених фрагментів дна і кришки, і, відповідно, їх конструкції забезпечується.

Таким чином, в режимі виготовлення елементів контейнера без використання поля допусків при заданому армуванні забезпечується міцність всіх основних елементів

– стійок, стінок, кришки та дна. Можливе виникнення неглибоких тріщин в зоні контакту тіла бетону та металевих стійок, що закриваються у момент зняття навантаження.

Режим виконання стійок на верхній межі поля допусків

В цьому випадку все навантаження від вищих контейнерів у штабелі передається виключно на стійки корпусу через поверхню фітингів. Результати розрахунку зображено на рис.7. Еквівалентні напруження визначені по Енергетичній теорії міцності.

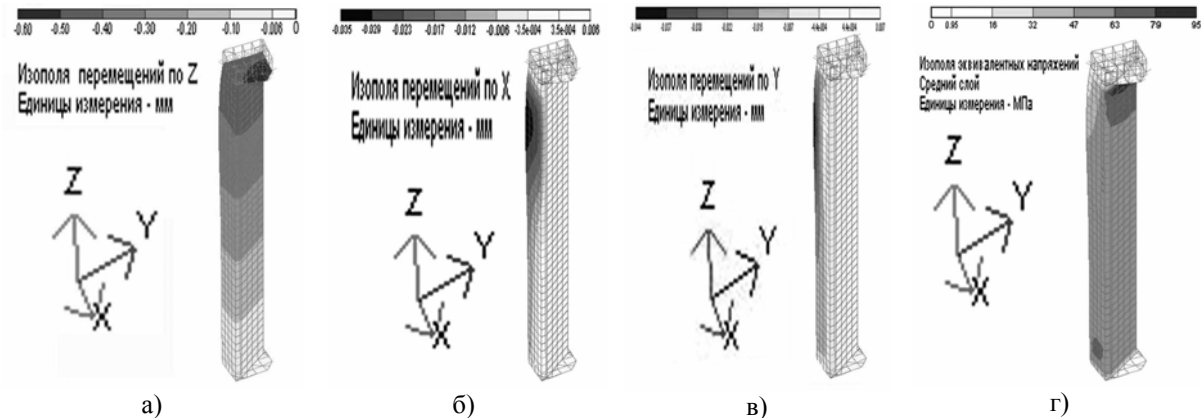


Рис. 7. Стійка контейнера під дією розрахункових навантажень: деформації: а – по Oz, б – по Oх, в – по Oу; г – ізополя еквівалентних напружень

Аналіз еквівалентних напружень, що виникають у стійці у випадку виконання її на верхньому допуску, показав, що максимальні напруження виникають на ділянці, що безпосередньо примикає до бетону відразу під фітингом та на стінках коло опорної п'яти (див. рис. 7,г). Абсолютне значення максимальних еквівалентних напружень $\sigma_{\text{екв}} \approx 90 \text{ МПа}$. Порівнюючи $\sigma_{\text{екв}}$ з розрахунковим $R_y = 230 \text{ МПа}$, враховуючі усі коефіцієнти запасу з [4, 7], робимо висновок, що несуча здатність стійок, навіть у випадку їх виступу за межі верхньої та нижньої межі контейнера на 1...2 мм забезпечується:

$$\sigma_{\text{екв}} \approx 90 \text{ МПа} < R_y \cdot \gamma_c / \gamma_m = 230 \cdot 0,9 / 1,1 = 188 \text{ МПа}.$$

Максимальний прогин верхівки стійки (низ фітинга) складає 0,6 мм. На цю величину виникає змінання поверхні бетону, що є допустимим для даних конструкцій згідно [8]. Таким чином, у випадку виготовлення стійок контейнера, використовуючи верхнє поле допусків (виступають за габарит корпусу контейнера на 1...2 мм), їх міцність здатність забезпечена.

Режим виконання кришки і дна на верхній межі поля допусків

Кришка, що виступає над поверхнею корпусу (рис. 8), сприймає тиск:

$$p = 5 \cdot g \cdot m \cdot \gamma_f / (a \cdot b), \quad (4)$$

$$\text{Звідки } p = 5 \cdot 9,81 \cdot 1,35 \cdot 10^4 \cdot 1,1 / (2,4 \cdot 1,62) = 0,188 \text{ (МПа)}.$$

У випадку виготовлення дна та кришки контейнера, використовуючи верхнє поле допусків (виступають за габарит корпусу контейнера на 1 мм) несуча здатність всіх елементів контейнера також забезпечена, так як еквівалентні напруження в кришці та дні корпусу при даному завантаженні системи не перевищують розрахункових опорів.

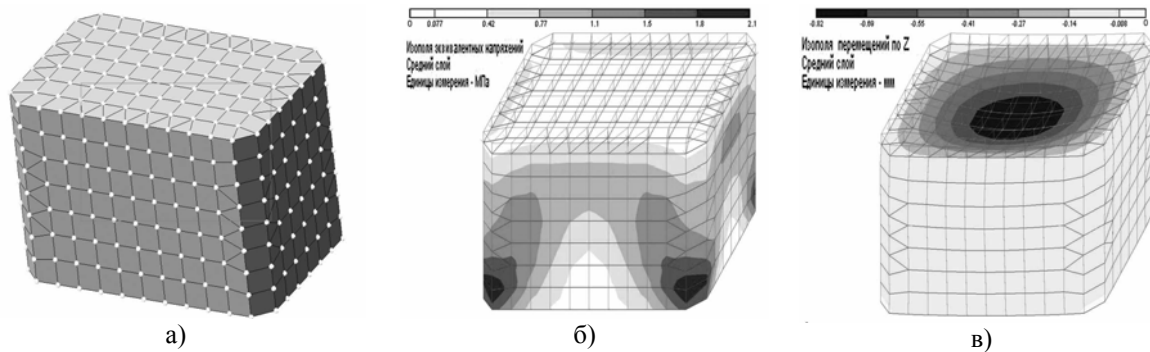


Рис. 8. Модель Контейнера при варіанті розрахунку з виступаючим дном та кришкою (виключені стійки): а – розрахункова схема, б – еквівалентні напруження; в – деформації по Oz

ВИСНОВКИ

Виходячи з результатів досліджень напружено-деформованого стану елементів контейнера під дією розрахункових статичних навантажень, що виникають при штабелюванні, можна зробити такі висновки:

1. Набув подальшого розвитку метод аналізу напружено-деформованого стану Контейнерів під дією розрахункових навантажень, розроблений у [1], більш повно висвітлено метод моделювання штабелюванні.

2. Розроблені нові кінцево-елементні моделі контейнера, що, на відміну від попередніх, враховують різні варіанти можливого виконання його елементів, використовуючи поле допусків.

3. Основні практичні рекомендації для раціоналізації конструкції контейнера: збільшити висоти зовнішнього та середнього каркасів таким чином, щоб вони перекривали зону стінки, що контактує із кришкою; на стійках у верхній зоні контакту з основним бетоном виконати додатковий хомут для зменшення еквівалентних напружень.

Таким чином міцність всіх елементів контейнера у всіх випадках конструктивного виконання, у випадку допрацювання конструкції згідно приведених рекомендацій, забезпечується. Армування контейнера при цьому є достатнім для забезпечення вимог [8, п.п. 1.3.2.4,1)] та [2 с.10, п.п. 4.3.4.2,1)].

ЛІТЕРАТУРА

1. Гольшев А.Б., Бачинский В.Я., Полищук В.П. и др. Проектирование бетонных и железобетонных конструкций. Справочное пособие. – Киев, «Будивельник», 1990. – 543 с..
2. ГОСТ 16327-88. Комплекты упаковочные для радиоактивных веществ. Общих технические условия. Введ. 01.07.1990. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 24 с.
3. Леванов Н.М., Суворкин Д.Г. Железобетонные конструкции. М.: «Высшая школа», 1965. – 872 с.
4. Металеві конструкції. Підручник. Частина 1 / В.Д. Свєрдлов, І.П. Середюк, В.Ф.Середюк, Л.О.Жарко. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2003. – 263с.
5. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. К., “Наукова думка”, 1975. – 705 с.
6. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. / Госстрой СССР. Взамен СНиП II-21-75 и СН 511-78. введ. 01.01.1986. Переиздание с изменениями на 1 января 1989 г. – М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1986. – 77 с.
7. СНиП 2.01.07-85*. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР. 1986. – 36 с. с приложениями.
8. ТУ У 13306137.007 – 2000. Контейнер транспортный защитный. Технические условия – Зарегистрировано 21.08.2000 в Держстандарт України; – 22 с.