

**УДК 624.012**

## **МОДЕЛЮВАННЯ АРМОЦЕМЕНТНОЇ ОБОЛОНКИ**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АРМОЦЕМЕНТНОЙ ОБОЛОЧКИ**

## **MODELING OF FERROCEMENT SHELL**

**Ужегов С.О.,** (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)

**Ужегов С.О.,** (Луцкий национальный технический университет, г. Луцк)

**Uzhegov S.O., postgraduate** (Lutsk National Technical University, Lutsk)

**У статті викладено моделювання армоцементного покриття у формі гіперболічного параболоїда, прямокутного в плані, для проведення експериментального дослідження.**

**В статье рассмотрено моделирование армоцементного покрытия в форме гиперболического параболоида, прямоугольного в плане, для проведения экспериментального исследования.**

**In this article was described modeling of the ferrocement hyperbolic parabolic-shaped coating, rectangular in plan, for the experimental research.**

### **Ключові слова:**

Армоцемент, оболонка, гіпар, розрахунок, модель, експеримент.

Армоцемент, оболочка, гипар, расчет, модель, эксперимент.

Ferrocement, thin shell, hyperbolic paraboloid, calculation, modeling, experiment.

Армоцементні конструкції застосовують там, де актуальне зниження власної ваги, зменшення розкриття тріщин, забезпечення водонепроникності. Особливістю їх є дисперсне армування, тонкостінність, зменшення захисного шару бетону. Вони характеризуються сітковим армуванням тонкими тканими, плетеними або зварними сітками, а досить часто і комбінованим армуванням сітками разом зі стержневою або дротовою арматурою.

Започаткував армоцементні конструкції італійський інженер-архітектор П'єр Луїджі Нерві (1891-1979). У Римі за його проектом було збудовано павільйон італійської культури для виставки 1942 року – круглий зал діаметром 252 м з перекриттям на одній центральній опорі. Пізніше Нерві запроектував склепінчасте покриття з хвилястих армоцементних плит ще більшого прольоту – 300 м, а в 1944 році запатентував цю конструкцію.

У 1948 році Нерві розпочав проектування й будівництво виставкових павільйонів Палацу виставки у Туріні, де в якості покриття використані збірні армоцементні елементи. В 1949 році Нерві побудував плавальний басейн Морської академії в Лівorno, склепінчасте покриття якого утворене збірними армоцементними хвилястими елементами. За його проектом збудовано Олімпійський стадіон на чотири тисячі глядачів у Римі (1957-59) зі збірним купольним покриттям діаметром 60 м, автовокзал на двісті машин ім. Джорджа Вашингтона у Нью-Йорку (1961-62), Собор Діви Марії в Сан-Франциско (1970) та інші об'єкти.

Подальші експериментальні дослідження та проектні розробки підтверджують, що армоцементні конструкції раціонально використовувати для покриттів будівель різноманітного призначення, довільної форми в плані з малими та великими прольотами і навіть при сейсмічних навантаженнях. Одним з найоптимальніших варіантів поверхонь з армоцементу є оболонка у формі гіперболічного параболоїда. Це дає можливість перекривати значні прольоти будівель і споруд – до 70 м і більше, а покриття влаштовувати з однієї пелюстки або компонувати їх спряженням з декількох пелюсток у різноманітних поєднаннях. Конструктивні рішення таких покриттів повинні забезпечувати несучу здатність, стійкість та геометричну незмінність споруди за будь-яких умов, навіть при ймовірних локальних пошкодженнях, попереджати лавиноподібний обвал системи внаслідок можливого руйнування другорядних елементів конструкції, вузлів, деталей, в'язей. Стійкість будівлі щодо лавиноподібного обвалу забезпечують застосуванням відповідних конструктивних заходів та матеріалів, які можуть сприяти розвитку в конструктивних елементах та їх з'єднаннях пластичних деформацій.

Гіперболічний параболоїд (гіпар) характеризується лінійністю форми – його поверхня створена системою прямих ліній (рис. 1), а саме, переносом прямої (твірної) по перехресних прямих (направляючих). Це суттєво спрощує виготовлення опалубки, армування та оздоблення поверхні, виготовлення елементів покриття у вигляді збірних плит. При переміщенні твірна залишається паралельною до однієї з вертикальних координатних площин. Направляючими можуть бути прямі, які проходять через дві довільні протилежні сторони плану. Початкове положення твірної може співпадати з однією з двох інших сторін. Якщо поверхню гіперболічного параболоїда умовно перетнути вертикальними площинами, не паралельними до координатних, то в перерізі отримаємо параболи: одні – з випуклістю доверху, інші – з випуклістю вниз.

Рівняння поверхні довільного гіперболічного параболоїда описується формулою:

$$z = f_1 \left( \frac{x}{a} \right)^2 - f_2 \left( \frac{y}{b} \right)^2. \quad (1)$$

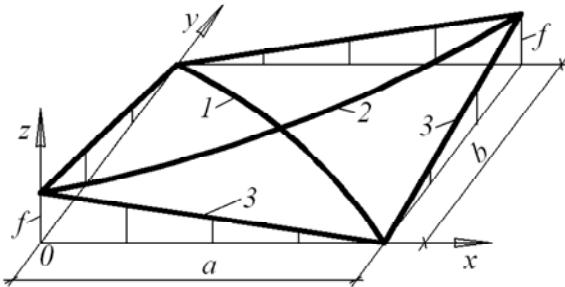


Рис. 1. Поверхня гіперболічного параболоїда: 1 – головний напрямок додатної кривини; 2 – головний напрямок від’ємної кривини; 3 - твірні

Для однопелюсткового гіпера рівняння серединної поверхні запишеться:  

$$z = C_0xy + C_1x + C_2y + C_3. \quad (2)$$

Для часткового випадку, зображеного на рис. 1 однопелюсткового гіпера, значення констант  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  і  $C_3$  можна визначити за відомими аплікатами чотирьох кутів оболонки:

- 1) при  $x = 0; y = 0; z = f$  умова (2) запишеться так:  
 $f = C_0 \times 0 \times 0 + C_1 \times 0 + C_2 \times 0 + C_3$ , звідки  $C_3 = f$ ;
- 2) при  $x = a; y = 0; z = 0$  і вже відомому  $C_3 = f$  умова (2) запишеться:  
 $0 = C_0 \times a \times 0 + C_1 \times a + C_2 \times 0 + f$ , звідки  $C_1 = -f/a$ ;
- 3) при  $x = 0; y = b; z = 0$  і вже відомому  $C_3 = f$  умова (2) запишеться:  
 $0 = C_0 \times 0 \times b + C_1 \times 0 + C_2 \times b + f$ , звідки  $C_2 = -f/b$ ;
- 4) при  $x = a; y = b; z = f$  і вже відомих  $C_1 = -f/a$ ;  $C_2 = -f/b$  та  $C_3 = f$  умова (2) запишеться так:

$$f = C_0 \times a \times b + (-f/a) \times a + (-f/b) \times b + f,$$

звідки  $C_0 = 2f/ab$ .

Тепер можна записати рівняння (2) з визначеними константами:

$$z = \frac{2f}{ab} xy - \frac{f}{a} x - \frac{f}{b} y + f$$

або 
$$z = f \left( \frac{2xy}{ab} - \frac{x}{a} - \frac{y}{b} + 1 \right). \quad (3)$$

Наведена конструкція гіперболічного параболоїда є розпірною. Розпір доцільно сприймати стягелем, встановленим у двох протилежних нижніх вузлах. Жорсткий стягель дасть змогу закріпити ці точки від горизонтальних переміщень.

Несучу здатність гіпера визначають за умов дії рівномірно розподіленого навантаження за теорією граничної рівноваги.

Проведені чисельні дослідження показали, що покриття у вигляді гіпарів мають достатню жорсткість та стійкість, а конструкції у вигляді спряжених систем надають будівлям відмінну архітектурну виразність – різними сполученнями оболонок можна створювати різноманітні форми покриттів будівель з довільною сіткою колон.

Для виготовлення армоцементних конструкцій застосовують конструкційний дрібнозернистий бетон груп А та Б, класу не нижче С16/20, середньою густину не нижче 2200 кг/м<sup>3</sup>, крупність зерен до 5 мм за ГОСТ 25192-82. Армують конструкції сталевими дротяними плетеними (ГОСТ 2715-80), зварними (ТУ 14-4-713-76) або тканими (ГОСТ 3826-82) сітками. Ткани сітки дорожчі від зварних, мають нестабільні механічні властивості (коєфіцієнт нерівномірності роботи тканих сіток коливається в межах 0,85 – 0,90), характеризуються спрямленням дроту у розтягнутих ділянках конструкції, внаслідок чого там швидше з'являються тріщини, тому частіше перевагу надають саме зварним сіткам, котрі деформуються разом з бетоном. Зварювання дротин у вузлах перетину збільшує жорсткість сітки, збільшує сили зчеплення сіток з бетоном, їх анкерування. Зварні сітки більш технологічні, їх простіше фіксувати у перерізі конструкції, легше забезпечити товщину захисного шару, легше розрізати – дротики при цьому не розсипаються, як у випадку тканих сіток. Тріщиностійкість перерізів армоцементних конструкцій, армованих зварними сітками, значно вища. Для виготовлення таких сіток використовують дріт діаметром 0,7...1,0 мм з кроком 8...10 мм, застосування сіток з меншими чарунками утруднює вкладання бетонної суміші. Нормативний опір дроту тканих і зварних сіток становить  $f_{m,ser} = 245$  МПа, що дорівнює найменшому значенню умовної межі текучості, яке відповідає залишковому відносному видовженняю 0,2 % і рівне 0,8 тимчасового опору розриву дроту сітки. Розрахунковий опір сіток для граничних станів першої та другої груп визначають з урахуванням коефіцієнта 1,1. Модуль пружності сіток становить  $E_m = 150000$  МПа. Характеристикою сітчастого армування є коефіцієнт  $\mu_m$  або  $\hat{\mu}_m$ , що визначається як відношення площи поперечного перерізу сітки на одиницю довжини в розтягнутій  $A_m$  і стиснутій зонах  $A'_m$  до товщини елемента  $t$  на певній ділянці перерізу.

Сили зчеплення в армоцементі зростають майже пропорційно до товщини перерізу і до кількості сіток у перерізі, зі зменшенням номера сітки сили зчеплення теж зростають. Зі збільшенням водоцементного відношення зчеплення зменшується, у верхніх шарах перерізу це зниження проявляється інтенсивніше.

Дисперсне армування знижує деформації усадки дрібнозернистого бетону на 15...20%, зі збільшенням коефіцієнта сітчастого армування усадка зменшується. Для армоцементу характерна пропорційна залежність між напруженнями і деформаціями повзучості. Дисперсне армування знижує деформації повзучості дрібнозернистого бетону в середньому на 30...50%.

Армоцемент часто застосовують у конструкціях, які працюють під впливом динамічних, циклічних або сейсмічних навантажень. Місцеве руйнування залежить від сили удару і товщини елемента і відбувається внаслідок того, що на межі контуру удару виникає чистий зсув, а напруження перевищують міцність бетону на розтяг. Дисперсне армування сприяє підвищенню ударної міцності. Зі зменшенням часу дії навантаження міцність дрібнозернистого бетону зростає, бо при динамічних впливах пластичні деформації в бетоні розвиваються повільніше, ніж при його статичному навантаженні. Межа витривалості армоцементу вища від межі витривалості залізобетону внаслідок кращого зчленення при дисперсному армуванні.

Анкерування арматури у бетоні забезпечує спільну їх роботу протягом усього терміну експлуатації конструкції. Для армоцементних елементів враховуючи їх малу товщину та особливість армування, питання анкерування арматури має важливе значення.

Дисперсне армування тонкими дротяними сітками з часто розташованими (через 6...12,5 мм) поперечними дротинками забезпечує анкерування поздовжніх дротинок сітки. В тканих сітках згини у місцях перетину поздовжніх та поперечних дротинок є своєрідними анкерами. Для зварних сіток такими анкерами є зварні з'єднання поздовжніх та поперечних дротинок. Встановлено, що зі зменшенням діаметра дроту та зі збільшенням кількості дротинок сили зчленення арматури з бетоном зростають, а її анкерування покращується.

При застосуванні сіток у кількості 400 – 500 кг на 1 м<sup>3</sup> бетону зростає поверхня зчленення арматури з бетоном, тому бетон рівномірніше включається в роботу, що сприяє зниженню концентрації напружень, більш рівномірному розподілу внутрішніх зусиль, і як наслідок, розтягуваність армоцементу у понад 5 разів перевищує розтягуваність залізобетону. Таке армування підвищує тріщинностійкість, водонепроникність, стійкість до дії місцевих і динамічних навантажень.

Дисперсне армування з  $\mu_m \leq 0,02$  не впливає суттєво на міцність армоцементу на стиск, а залежить, в основному, від класу бетону. Зі зменшенням коефіцієнта сітчастого армування стискувальні деформації зростають. Модуль пружності армоцементу зростає зі збільшенням коефіцієнта  $\mu_m$ . У зв'язку зі значною гнучкістю сіток міцніні і деформівні характеристики арматури при стиску армоцементних елементів повністю не використовуються. У межах оптимальних значень коефіцієнта сітчастого армування ( $\mu_m \leq 0,04$ ) відносні деформації армоцементу залежать від сітчастого армування і деформативності бетону, зумовленої його міцністю та віком.

Границя розтягуваність дрібнозернистого бетону армоцементних конструкцій становить  $(10\dots15) \times 10^{-5}$ . До утворення тріщин модуль пружності на розтяг приблизно такий же як і на стиск, після утворення тріщин він різко знижується. Дисперсне армування в кількості до 2% позитивно впливає на роботу армоцементу на розтяг, проте збільшення

кількості сітчастого армування в розтягнутих елементах ефекту не дає – доцільніше виконати розтягнуті конструкції попередньо напруженими.

Зусилля у статично невизначених армоцементних конструкціях від зовнішніх навантажень і впливів при розрахунку за граничними станами першої та другої груп визначають з урахуванням непружніх деформацій бетону й арматури, наявності тріщин, з урахуванням деформованого стану елементів.

Статичний розрахунок армоцементних оболонок виконують як тонкостінних просторових конструкцій. Прогини оболонок покриттів мають бути в дозволених межах – до 1/400 прольоту, а для великоформатних конструкцій (понад 60 м) – до 1/500 прольоту.

Граничні зусилля у нормальніх перерізах елемента визначають з урахуванням таких передумов: опір бетону розтягу приймають рівним нулю; опір бетону стиску рівний  $f_{cd}$  і рівномірно розподілений по стиснутої зоні бетону; напруження в арматурі стиснутої зони бетону постійні і не більші за  $f_{mc}$ ; розтягуючі напруження в арматурі постійні по висоті розтягнутої зони перерізу і не більші за  $f_m$ ,  $f_{yd}$ .

У проведенню дослідження виконано розрахунок поверхні у формі гіперболічного параболоїда, прямокутного у плані, зі сторонами:  $a = 3500$  мм,  $b = 2250$  мм. Стріла підйому  $f_1 = f_2 = 500$  мм, що є в рекомендованих межах – від 1/10 до 1/5 прольоту. Найбільший кут нахиlu до горизонту дотичної до поверхні монолітної оболонки для можливості бетонування на односторонній опалубці становить  $12^\circ$ , що не перевищує рекомендований кут  $35^\circ$ . Товщина оболонки  $t = 30$  мм. По контуру оболонки передбачено бортові елементи у вигляді ферм з металевих кутиків. Матеріал конструкції оболонки – армоцемент з використанням бетону класу С16/20 з розрахунковим опором бетону на стиск  $f_{cd} = 11,5$  МПа. Для армування застосовано зварні сітки №12,5 за ТУ 14-4-713-76, номінальний діаметр дроту сітки 0,5мм, номінальний розмір сторін чарунок 12,5 мм, коефіцієнт сітчастого армування  $A_m$  при одному шарі сітки на 1 мм товщини перерізу елемента становить 0,0014, розрахунковий опір зварних сіток  $f_m = 245$  МПа.

Коефіцієнт  $\mu'_m = \frac{A'_m}{t} = \frac{0,0014}{3} = 0,00047$  , тоді міцність армоцементу при стиску становитиме:

$$f_{c1} = f_{cd} + f_m \times \mu'_m = 11,5 + 245 \times 0,00047 = 11,6143 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт  $\mu_m = \frac{A_m}{t} = \frac{0,0014}{3} = 0,00047$  , а міцність армоцементу при розтягу становитиме:

$$f_{cm} = f_m \times \mu_m = 245 \times 0,00047 = 0,1143 \text{ МПа.}$$

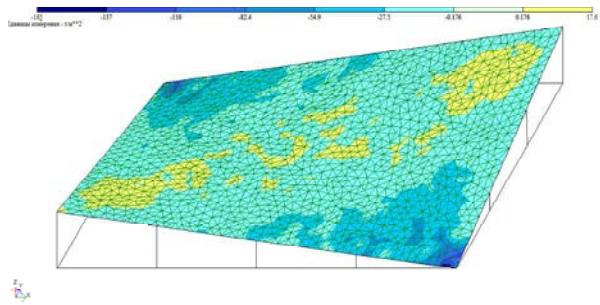


Рис. 2. Ізополя напружень по Nx

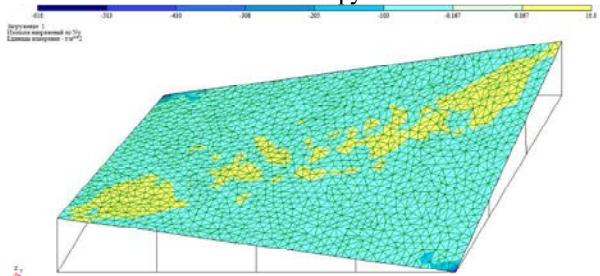


Рис. 3. Ізополя напружень по Ny

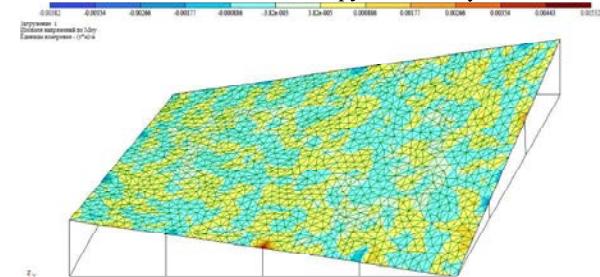


Рис. 4. Ізополя напружень по Mxy

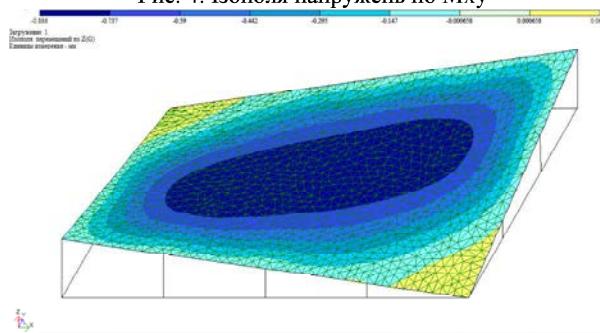


Рис. 5. Ізополя переміщень по Z

Окрім основних розрахунків оболонки за граничними станами, особливий інтерес може викликати виконання розрахунків на найімовірніші варіанти позаграницьких впливів. Насамперед, виходячи з розрахунку й аналізу його результатів, виявляють елементи, вузли, в'язі, які більшою мірою впливають на існування як таке цілої конструктивної системи. Раптове послідовне виключення з роботи цих елементів та в'язей дозволить розрахунковим шляхом виявити резерви міцності конструкції. Це дасть змогу передбачити конструктивні заходи з оптимізації окремих елементів конструкції з метою недопущення лавиноподібного руйнування. Особливої уваги надають можливому імпульсному впливу і, як результат, миттєвому виключенню з роботи окремого елемента, вузла, зв'язку, що призведе до появи граничних і позаграницьких станів у інших елементах конструктивної системи. Усі розрахунки виконують з урахуванням фізичної, геометричної і конструктивної нелінійності. Оцінка надійності армоцементної конструкції покриття може бути виконана на основі повного дослідження його напружене-деформованого стану (НДС) за врахування геометричних параметрів. Після дослідження НДС можна удосконалити методику розрахунку конструкцій і подати пропозиції з технології їх виготовлення.

В подальшому експериментально буде досліджено НДС армоцементного покриття та порівняно отримані дані із розрахунковими. Будуть досліджуватися процеси виникнення і росту тріщин у тонкостінній конструкції за дії експлуатаційних навантажень. Натурні випробування оболонки остаточно будуть тривати до руйнування, що дозволить отримати схеми злому і форми руйнування. Експериментальне дослідження напружене-деформованого стану армоцементної оболонки покриття дозволить використати експериментально обґрунтовані розрахункові формули для перевірки усіх можливих граничних станів.

Для армоцементної оболонки важливим є ріст деформацій конструкції у часі, зумовлений повзучістю і можливістю поступового виключення з роботи бетону розтягнутої зони. Критичні навантаження тонкостінної оболонки при довготривалій дії виявляються, як правило, значно нижчими, ніж за умови дії короткотривалих випробувань. На основі детального аналізу отриманих розрахункових результатів та їх зіставлення з експериментальними даними буде проведено статистичний аналіз та узагальнено методику розрахунку тонкостінних конструкцій з армоцементу на випадок повторних навантажень.

1. Пасічник Р. В. Скінченнорізницева методика розрахунку стійкості оболонок з від'ємною Гауссовою кривиною: дис.. канд. тех. наук / Р.В. Пасічник — Луцьк, 2010. — 191с.
2. Рассказов А. О. Расчет оболочек типа гиперболических параболоидов / А.О. Рассказов. — Киев: Изд. Киевского Госуниверситета., 1972. — 175с.
3. Самольянов И. И. Прочность, устойчивость и колебания гиперболического параболоида / И.И. Самольянов. — Луцк: Луцкий индустріальний інститут. 1993. — 316 с.
4. Черных К. Ф. Линейная теория оболочек / К.Ф. Черных. — Л.: Изд. Ленинград.ун-та, 1965, ч.2. — 395 с.