

УДК 624.012.45

Т.Н. Азізов, д.т.н.; Н.Р. Вільданова,  
ОДАБА, Одеса**ТЕОРЕТИЧНЕ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ  
ДОСЛІДЖЕННЯ ДІАГРАМИ ЗСУВУ БЕТОНУ**

## АНОТАЦІЯ

Аналіз порівняння залежності  $\tau$ – $\gamma$ , вперше отриманої для низхідної гілки у ході експериментальних досліджень при чистому крученні елемента кільцевого перерізу, з теоретичною діаграмою зсуву бетону, свідчить як про якість і точність теоретичної методики, так і про надійність розробленої установки, чистоту експерименту і достовірність отриманих даних.

Ключові слова: крутильна жорсткість, деформації пластичності, діаграма зсуву бетону, низхідна гілка діаграми зсуву, чисте кручення.

**1. ВСТУП**

Актуальність роботи зумовлена практичним інтересом, який викликає сьогодні дослідження НДС ЗБЕ за дії кручення, оскільки елементи конструкцій змушені опиратися не лише стиску-розтягу, але і крученню (наприклад, при будь-якому несиметричному завантаженні елементів просторових конструкцій прольотних будов мостів, перекресно-ребристих систем тощо), внаслідок чого робота ЗБЕ зазнає значного впливу від зміни крутильної жорсткості. І якщо деформації пластичності, а відтак і діаграма стиску-розтягу інтенсивно досліджуються сучасними науковцями, то залежність деформацій зсуву від дотичних напружень, що розвиваються у перерізах елементів від дії зовнішнього крутильного моменту, залишається недослідженою. Автор [1] зі своїми учнями розробив методику розрахунку залізобетонних елементів різних перерізів з тріщинами при впливі згину і кручення, але безпосередній вплив зміни модуля зсуву бетону з урахуванням деформацій пластичності на крутильну жорсткість конструкцій до даного моменту не досліджено.

Окрім того, теоретичні вишукування з дослідження залежності  $\tau$ – $\gamma$  за чистого кручення експериментально ще не були підтверджені. У даній роботі оприлюднюються результати експерименту, в якому були отримані параметричні точки повної діаграми зсуву бетону; експерименталь-

но отримана залежність порівнюється з розрахованою теоретично. Проведені експериментальні дослідження є дуже важливим кроком на шляху дослідження модуля зсуву на різних етапах навантаження конструкції і впровадження результатів у практику.

**2. ВИКЛАД ОСНОВНИХ МАТЕРІАЛІВ  
ДОСЛІДЖЕННЯ**

Вирішення задачі дослідження діаграми зсуву бетону у теорії запропоновано О.Ф.Яременком [3] і базуються на теорії деформацій пружнопластичності, за якою інтенсивність напружень пов'язана з інтенсивністю деформацій однією і тією ж залежністю для всіх видів напружених станів. За теоретичною методикою дотичні напруження  $\tau$  пов'язані з кутовими деформаціями  $\gamma$  залежністю

$$\tau_c = G_c \gamma_c = \frac{E_c^0 \vartheta_c}{2(1 + \mu_c)} \gamma_c, \quad (1)$$

де  $\tau_c$  – дотичні напруження, що розвиваються під впливом навантаження крутильним моментом;  $\gamma_c$  – кутові деформації;  $G_c$  – модуль пружності бетону другого роду;  $E_c^0$  – початковий модуль пружності бетону;  $\vartheta_c$  – коефіцієнт зміни січного модуля пружності при зсуві, визначається за [3];  $\mu_c$  – коефіцієнт Пуассона для бетону.

При дослідженні залежності кутових деформацій від внутрішніх дотичних напружень можна проаналізувати діаграму зсуву бетону одного класу при різних значеннях модуля деформацій. Наприклад, на рис.1 наведено розрахунок залежності кутів повороту від дотичних напружень для важкого і дрібнозернистого бетону класу В20 за СНиП, або С16/20 за ДБН (модуль пружності дрібнозернистого бетону на 20% нижчий за модуль пружності важкого бетону).

Граничне дотичне напруження прийнято рівним міцності бетону при зсуві:

$$\bar{\tau}_c = f_{c,sh} = 0.7 \sqrt{f_{ck} f_{ctk}}. \quad (2)$$

Модуль деформацій бетону  $E_c^0$  для важкого бетону складає 2700 кН/см<sup>2</sup>, для дрібнозернистого – 2200 кН/см<sup>2</sup>, відтак графіки наочно показують, що чим вище модуль деформації, тим менше деформується матеріал внаслідок розвитку внутрішніх напружень.

**Експериментальних досліджень** залежності деформацій бетону від напружень до цього часу проведено не було, тому результати вирішення цієї

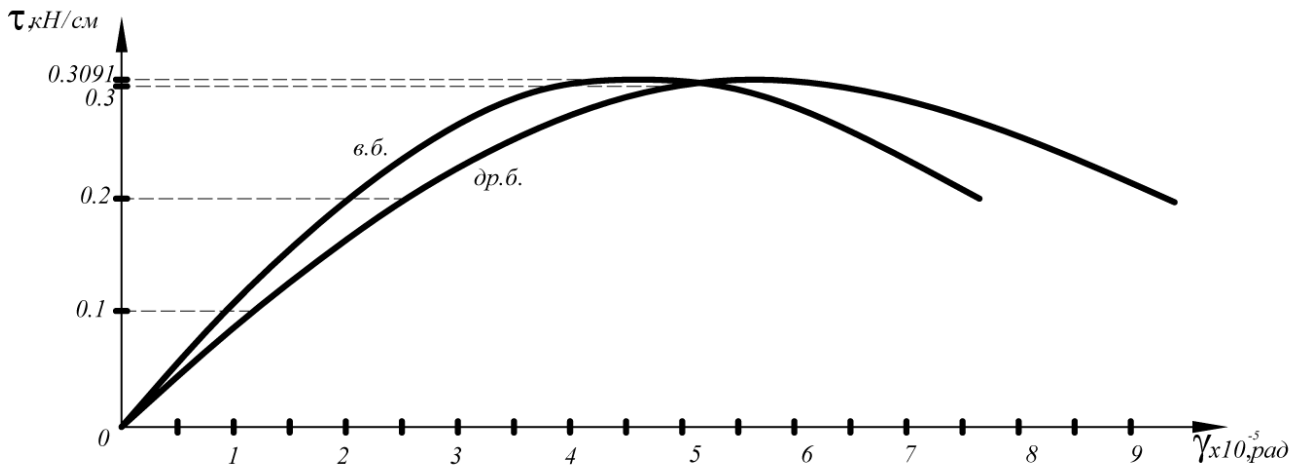


Рис.1. Теоретична діаграма зсуву важкого і дрібнозернистого бетонів В20

задачі є актуальними і цінними. Сутність процедури отримання повної діаграми зсуву і стиску бетону єдина. Складність полягає в експериментальному визначенні параметричних точок низхідної гілки діаграми після проходження пікової точки напружень через необхідність використання спеціального обладнання внаслідок раптового руйнування зразка і неможливості дослідження низхідної гілки (для проведення випробувань необхідні додаткові пристрої). Якщо форму кривої на висхідній гілці діаграми нескладно отримати завдяки стандартним випробуванням, то після досягнення бетоном границі короточасної міцності необхідне використання спеціального обладнання через раптове руйнування зразка і неможливість визначення низхідної гілки. Причина у тому, що традиційні преси при випробуваннях за умови рівномірного прирощення навантаження при досягненні пікової точки діаграми деформування, що відповідає границі короточасної міцності, накопичують значну потенційну енергію деформації, яка миттєво реалізується в енергію удару. Тому для зменшення взаємодії "випробувальна машина — дослідний зразок" використовують, наприклад, сталеві циліндри і колони, що навантажуються паралельно зі зразками, і які після досягнення границі короточасної міцності сприймають на себе ударне навантаження.

Авторами [2] була розроблена значно простіша і більш раціональна методика отримання параметричних точок бетону при крученні. Суть її полягає у використанні траверси, що сприймає навантаження, для контрольованої передачі зусиль на бетонний зразок. На рис.2 наведена схема, за якою

було сконструйовано установку для отримання повної діаграми бетону за чистого кручення.

Переваги даного способу отримання параметричних точок діаграми зсуву бетону забезпечені завдяки сумісній деформації зразка з траверсою від самого початку завантаження до його повного руйнування і відсутності необхідності втручання у процес випробування, що дозволяє отримати чіткі значення точок діаграм  $M_{t-\varphi}$  і, відповідно,  $\tau-\gamma$ , уникаючи похибок системи "експериментатор — дослідний зразок". Також слід зазначити, що конструювати установку можна з використанням двох пе-

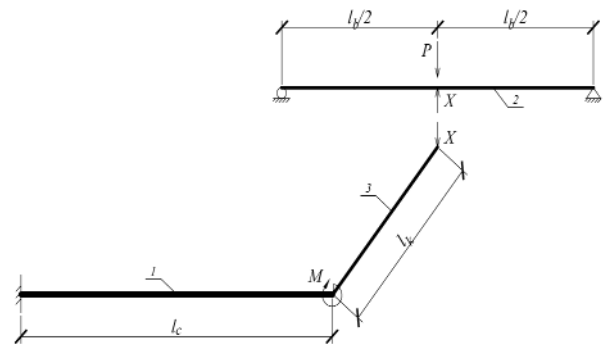


Рис. 2. Схема зусиль у статично невизначеній системі "траверса-зразок, який випробовується на кручення": 1 — бетонний зразок (циліндр-вісімка); 2 — траверса, за допомогою якої контролюється зусилля на циліндр; 3 — важіль для створення необхідного крутильного моменту на "вісімку";  $P$  — сила, прикладена до траверси;  $X$  — сила, що передається на бетонний циліндр через важіль 3;  $M$  — крутильний момент, який сприймає досліджуваний зразок.

рехресних траверс з металу, пластика тощо, задля зручності і забезпечення підбору характеристик її елементів за будь-яких співвідношень їх деформативності і міцності.

Для порівняння теоретичних досліджень з експериментом за вищезазначеною методикою була розрахована залежність кута зсуву від дотичних напружень. Основні фізико-механічні характеристики бетону за результатами експерименту  $f_{ck}=15.3236\text{МПа}$ ,  $f_{ctk}=1.3328\text{МПа}$ ,  $E_{ck}=2275.961\text{МПа}$  відповідають класу бетону С16/20, що за ДБН  $f_{ck}=15\text{МПа}$ ,  $f_{ctk}=1.3\text{МПа}$ , а модуль пружності  $E_{ck}=2200\text{МПа}$  – прийнято за детальними рекомендаціями СНиП внаслідок великої вибірки для дрібнозернистого бетону (оскільки досліджувані зразки були виготовлені з бетону без додавання крупного заповнювача).

Отримані результати можна звести у графіки  $M_{t-\varphi}$  і  $\tau-\gamma$ . Досліджуємо діаграму  $\tau-\gamma$ , оскільки вона характеризує не лише стан поточних міцнісно-деформативних характеристик бетону і геометрії зразка, а має фундаментальний характер і є істотно важливою при визначенні і дослідженні НДС бетонних конструкцій. На рис. 3 порівнюється залежність  $\tau-\gamma$ , розрахована теоретично з використанням нормативних фізико-механічних характеристик, з отриманою у ході зазначеного експерименту, і середні значення експериментально отриманих параметричних точок.

Аналіз діаграми дозволяє зробити висновок про те, що дотичні напруження на низхідній гілці

зменшуються на 9%, кут зсуву збільшується на 26% порівняно з максимальною точкою на діаграмі. Це свідчить про те, що використовувати теоретичні дані [3] слід доволі обережно, оскільки низхідна гілка діаграми зсуву достатньо коротка, і слід значно обмежувати довжину низхідної гілки діаграми. Швидше за все, це є наслідком того, що ми маємо справу з розтягом (за головними площадками), подібно тому, як повна діаграма стиску (розтягу) бетону також має достатньо довгу низхідну частину у стиснутій зоні, і коротку – в розтягнутій.

Ступінь відповідності, отриманий числовою інтерполяцією для значень дотичних напружень  $\tau$  кривих, побудованих за теоретичними і експериментальними даними, дозволяє визначити **кореляційне відношення  $\eta$** . Величина кореляційного відношення  $\eta = 0,984$  свідчить про високий ступінь імовірності наближення значення  $\gamma$ , апроксимованого за експериментальними даними, і теоретичного значення, визначеного за методикою [3], а також про достатній ступінь точності як розробленої теоретичної методики розрахунку повної діаграми зсуву бетону, так і дієвість експериментальної установки, запропонованої авторами даної статті.

### ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Безпосередній вплив зміни модуля зсуву бетону з урахуванням деформацій пластичності на крутильну жорсткість конструкцій зсуву на різних

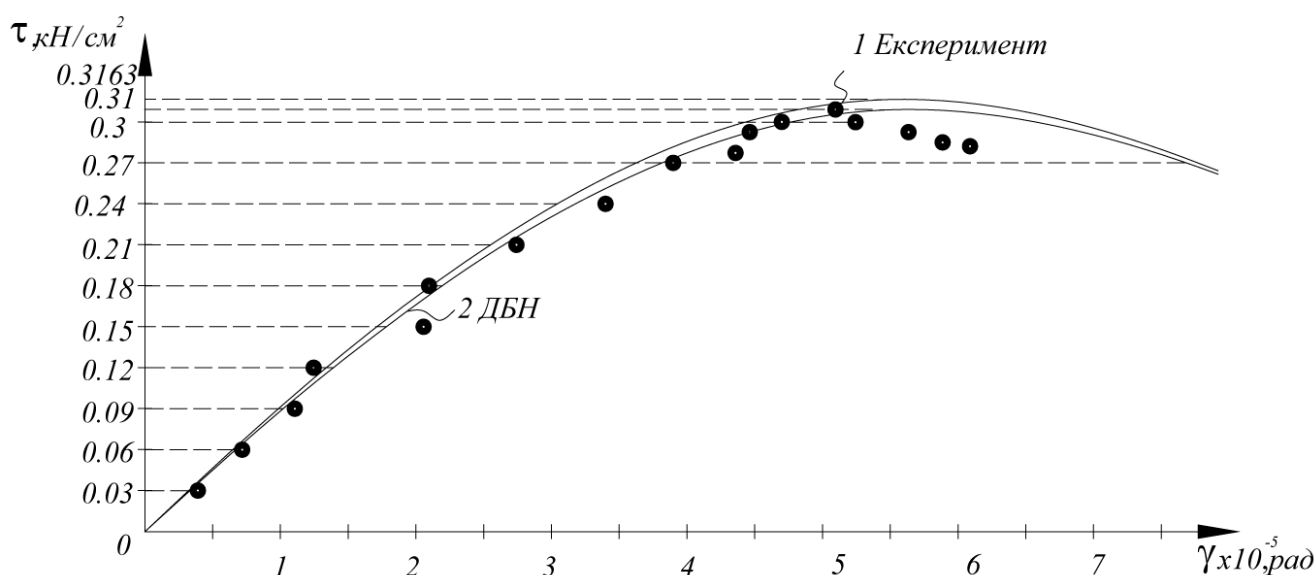


Рис. 3. Порівняння теоретичної діаграми кручення бетону з експериментальною

етапах її роботи має місце, проте не враховується сучасними розрахунковими методиками і програмними комплексами, чим і обґрунтовується важливість проведених досліджень.

2. Запропонований спосіб експериментального отримання діаграми зсуву бетону відрізняється надійністю визначення параметричних точок діаграми, відсутністю необхідності конструювання складних установок і ризику впливу суб'єктивного фактора експериментатора.

3. В результаті експериментального дослідження бетонних стрижнів кільцевого перерізу за отриманими в лабораторних умовах параметричними точками побудовано діаграму зсуву бетону.

4. Ступінь відповідності нелінійного зв'язку експериментальної діаграми з теоретично встановленою залежністю визначається кореляційним відношенням. Встановлений кореляційний зв'язок свідчить як про чистоту і коректність експерименту, так і про достовірність і обґрунтовану методику теоретичної діаграми.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Азизов Т.Н. *Теория пространственной работы перекрытий*. — Киев: Науковий світ, 2001. - 276 с.
2. Азизов Т.Н., Вильданова Н.Р. *Экспериментальное определение нелинейной диаграммы сдвига бетона // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. Вип. 46 — Одеса: ОДАБА, 2012. — С.*
3. Яременко О.Ф. *Несуча здатність та деформативність залізобетонних стержневих елементів*

*в складному напруженому стані / О.Ф.Яременко, Ю.О. Школа. — Одеса: ОДАБА, 2010. — 136с.*

#### АННОТАЦІЯ

Анализ сравнения зависимости  $\tau$ – $\gamma$ , впервые полученной для нисходящей ветви в ходе экспериментальных исследований при чистом кручении элемента кольцевого сечения, с теоретической диаграммой сдвига бетона, свидетельствует как о качестве и точности теоретической методики, так и о надежности разработанной установки, чистоте эксперимента и достоверности полученных данных.

Ключевые слова: крутильная жесткость, деформации пластичности, диаграмма сдвига бетона, нисходящая ветвь диаграммы сдвига, чистое кручение.

#### ANNOTATION

The descending branch of the shearing stress-strain diagram  $\tau$ – $\gamma$  has been obtained for the concrete in pure torsion under laboratory conditions first. Analysis of its comparison with the theoretical one testifies both to quality and exactness of the theoretical methodology and reliability of the worked out setting, experiment's cleanness and authenticity of the obtained data.

Keywords: torsional rigidity, plasticity deformations, the chart of shift of the concrete, a descending branch of the chart of shift, pure torsion.