

Відгук

**офіційного опонента на дисертаційну роботу
Орлової Ольги Михайлівни
«Жорсткість залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними
тріщинами при крученні»,
представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди**

Актуальність теми дисертації.

Більшість будівельних систем є складними статично невизначуваними конструкціями, що працюють просторово. Перерозподіл зусиль між елементами таких конструкцій залежить від співвідношення їх жорсткостей на різні види силових впливів. Як нелінійні властивості конструкційних матеріалів, так і жорсткості елементів при згині, нині досліджені досить широко.

Більшість горизонтально розташованих несучих елементів різних типів залізобетонних перекриттів працюють на вигин. Таким чином, як правило, такі елементи характеризуються наявністю нормальних від вигину тріщин. Але, водночас, просторова робота будівельних конструктивних систем обумовлює для більшості елементів таких систем, перевування їх під час експлуатації в складному напружено-деформованому стані. Це означає, зокрема, для горизонтальних несучих елементів, наявність в них різного виду тріщин – похилих від дії поперечної сили, нормальних – від дії моменту вигину, просторових спіралеподібних – від кручення. Одночасно в елементах можуть виникати деформації як вигину, так і кручення, що обумовлює виникнення різних типів тріщин.

Нелінійні властивості залізобетону та жорсткості при згині елементів з нормальними тріщинами нині вивчені достатньо широко й робота під навантаженням таких елементів висвітлена в роботах багатьох авторів.

Разом з тим, змінам характеристик жорсткості при крученні залізобетонних елементів систем перекриттів в наслідок тріщиноутворення присвячене невелике коло досліджень.

В будівельних нормах України та багатьох країн світу практично відсутні методи визначення жорсткості та деформативності залізобетонних елементів з тріщинами.

Більшість методик розрахунку переміщень при крученні, що існують, припускають наявність в елементів просторових (спіральних) тріщин від кручення. При локальних завантаженнях перекриття, при несиметричному в плані перекритті, при наявності отворів в плитах, в крайніх елементах ячейки перекриття поряд із моментами вигину виникають значні крутні моменти. Отже, на значну кількість елементів, що мають лише нормальні від вигину тріщини, діють значні крутні моменти. Тому врахування жорсткості таких елементів на кручення – є задачею важливою, й, на сьогоднішній час, відносно мало дослідженою.

В останнє десятиліття саме дослідженю зміни жорсткісних та міцнісних показників елементів з нормальними тріщинами присвячено велику кількість досліджень під керівництвом доктора технічних наук Т.Н. Азізова. В рамках наукової школи Т.Н. Азізова виконувалися теоретичні та експериментальні дослідження зміни цих характеристик для елементів прямокутного, таврового, коробчастого та порожнистого трикутного поперечного перерізів з нормальними тріщинами.

Значна кількість залізобетонних елементів, що працюють на вигин та на вигин з крученням мають двотавровий переріз. Здобувачем проаналізовано роботи багатьох авторів та встановлено, що питання розрахунку міцності та жорсткості залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами не досліджено. Тому, зважаючи на вищевикладене, тема дисертаційної здобувача є надзвичайно актуальну й слугуватиме вагомим вкладом в розвинення наукової школи доктора технічних наук Т.Н. Азірова.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертації та отримані результати досліджень відповідають актуальному напрямку науково-технічної політики України відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 23.05.2011 № 457 «Про затвердження Порядку застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу».

Метою роботи є розроблення методики розрахунку жорсткості та несучої здатності при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами.

Мета досліджень обумовила розв'язання таких задач:

1. Проведення теоретичних досліджень із застосуванням методів будівельної механіки, програмних комплексів, що реалізують метод кінцевих елементів (МКЕ). На основі цих досліджень розробити числово-аналітичну та інженерну методики визначення взаємного зсуву берегів нормальної тріщини в елементах двотаврового перерізу.

2. Проведення експериментальних досліджень деформативності та міцності зразків залізобетонних двотаврових балок зі штучно створеними нормальними тріщинами при дії на них крутних моментів.

3. Розробка методики визначення нагельних сил в арматурі, що враховує наявність складових нагельних сил за напрямком двох координатних осей, близьке розташування арматури до грані елемента, а також наявність декількох стрижнів поздовжньої арматури. При цьому передбачається скорегувати формули, в яких використані одиничні сили при визначенні переміщень поздовжньої арматури.

4. Розробити комп’ютерні програми для автоматизованого визначення переміщень в тріщині та жорсткості при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами.

5. З метою оцінки достовірності отриманих даних, порівняти дані, отримані за розробленою методикою з даними, отриманими експериментальним шляхом.

Задачі, сформульовані вище, відповідають подальшому змісту дисертаційної роботи.

Об’єктом дослідження визначено роботу при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами.

Напружено-деформований стан, деформативність і несуча здатність при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами є предметом дослідження.

Як методи дослідження застосовано:

- методи будівельної механіки (при розробленні числовово-аналітичної методики визначення переміщень берегів нормальної тріщини та визначення нагельних сил в поздовжній арматурі);
- програмні комплекси Matcad, Pascal та Excel з використанням Visual Basic для аналізу напруженено-деформованого стану та міцності розглянутих елементів за розробленими методиками;
- експериментальні дослідження на зразках двотаврових залізобетонних балок з нормальними тріщинами.

Практичне значення одержаних результатів роботи, що виносяться на захист, полягає в наступному:

- розроблено та впроваджено методики розрахунку міцності та деформативності, які дозволяють визначити напруженено-деформований стан та несучу здатність при проектуванні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами. Встановлено, що наявність поздовжньої арматури (її кількість та її розташування в поперечному перерізі) впливає на напруженено-деформований стан елементів.
- експериментальними дослідженнями підтверджено факт впливу жорсткості верхньої полиці, діаметру та кількості поздовжньої арматури, на загальну жорсткість при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами. Це дозволяє більш точно та надійно проектувати залізобетонні елементи систем перекриттів, зокрема мостових споруд.

Теоретичні та експериментальні результати, що отримані, розвивають методи розрахунку залізобетонних конструкцій, забезпечують розв'язання актуальних прикладних задач та обумовлюють ефективні та надійні конструкторські рішення залізобетонних балок та ригелів двотаврового перерізу.

За допомогою запропонованої інженерної методики є можливою оцінка фактичного напруженено-деформованого стану, міцності та деформативності конструктивних елементів, що експлуатуються тривалий час і потребують обстеження та підсилення. Методику можливо застосувати та до елементів, що проектуються на стадії нового будівництва.

Основна цінність та наукова новизна роботи, що виносяться здобувачем на захист, полягає в наступному:

- вперше експериментальним способом для залізобетонних елементів двотаврового перерізу зі штучним нормальними тріщинами отримано залежності «крутний момент – кут закручування»;
- розвинуто числовово-аналітичну методику визначення переміщень берегів нормальніх тріщин шляхом розділення на два стрижні, де врахована форма поперечного перерізу та моменти у стінці двотавру;
- удосконалено методику визначення жорсткості та міцності при крученні залізобетонних елементів з нормальними тріщинами, що відрізняються від методики, яка існує, врахуванням двох складових нагельних сил, кількості поздовжньої арматури та її розташування в поперечному перерізі;
- удосконалено методику визначення жорсткості та міцності при крученні залізобетонних елементів з нормальними тріщинами, що відрізняється від тієї, яка вже існує, врахуванням форми поперечного перерізу елемента;
- на відміну даних, що існують, дані, які отримані в результаті експерименту, показують, що поздовжня арматура впливає на жорсткість та міцність при крученні

залізобетонних елементів двотаврового перерізу за присутності в них нормальних тріщин та досить велику частку зовнішнього крутного моменту сприймають нагельні сили в поздовжній арматурі.

Особистий внесок здобувача. До основних наукових досліджень та результатів, що отримані автором самостійно, належить аналіз досліджень та публікацій за означену тематикою. Здобувачем було сплановано, проведено та проаналізовано експериментальні дослідження роботи залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами під дією кручення. Зазначено, що всі основні наукові положення, результати, висновки, рекомендації отримані здобувачем самостійно. Список наукових публікацій відображає, що деякі окремі положення досліджень виконано у співавторстві. Достовірність даних, що отримані за запропонованою методикою визначення несучої здатності та деформативності при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами, підтверджується задовільним збігом з результатами фізичного експерименту на моделях-балках. Так, похибка між значеннями експериментальних крутних моментів та моментів, отриманих за інженерною методикою становить від 1,7% до 13,5%.

Впровадження результатів роботи.

Результати роботи використані державним підприємством «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» (ДП НДІБК) при розробці змін до національних будівельних норм України ДБН В.2.6-98: «Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення» та ДСТУ Б В.2.6-156:2010 «Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону» в частині вимог до розрахунку конструкцій будинків і споруд з урахуванням використання в монолітному будівництві перекриттів ефективних вставок.

Результати роботи також використані науково-виробничим підприємством «Будівельна наука» Академії будівництва України при технічному обстеженні в місті Суми будівлі головного корпусу виробництва двоокису титану ОЦДТ ПАТ «Суміхімпром».

Викладення результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях. За темою дисертації опубліковано 12 наукових праць, з них 7 у фахових виданнях, рекомендованих Міністерством освіти та науки України, 2 статті у виданнях, що індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus. Крім того, 2 наукові праці опубліковані у закордонних виданнях та 1 стаття – в інших виданнях України. Всі опубліковані матеріали відповідають вимогам ВАК України. В авторефераті дисертації на 22 сторінках викладено основні результати теоретичних та експериментальних досліджень.

Апробація результатів наукових досліджень.

Основні положення та результати дисертаційної роботи оприлюднено в доповідях на конференціях:

- міжнародній науково-технічній конференції «Науково-технічні проблеми сучасного залізобетону» м. Полтава, 2017 р.;
- International Scientific Practical Conference «Technology and progress», May 30, 2017, Philadelphia, USA (заочно);
- на XIV міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми», м. Київ-Вінниця, 15–17 травня 2018 р. ;

- на XIII міжнародній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація», м. Полтава, 24-25 жовтня 2018 р.;
- на дев'ятій міжнародній конференції «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди», м. Рівне, 16–19 жовтня 2018 р.;
- на VI Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» 20–24 травня 2019 р., м. Одеса;
- на IV міжнародній науково-практичній інтернет-конференції молодих учених та студентів «Інновації у будівництві», м. Луцьк, 14 травня 2019 р.;
- на VIII міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд на залізничному транспорті», м. Харків, 20–22 листопада 2019 р.;
- на наукових конференціях Уманського державного педагогічного університету 2016–2019 рр.

Обсяг та структура дисертації. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 281 найменування на 32 сторінках та трьох додатків на 12 сторінках. Робота викладена на 188 сторінках, що включають 145 сторінок основного тексту, в тому числі 77 рисунків, 8 таблиць.

Оцінка змісту дисертації.

Вступна частина містить обґрунтування актуальності обраної теми. У вступі також окреслено зв'язок роботи з науковими планами, програмами та темами; сформульовано мету роботи та завдання, які обумовлює мета дослідження; означено об'єкт та предмет дослідження, методи дослідження. Розділ описує наукову новизну та практичне значення одержаних результатів. В розділі вказано, що є особистим внеском здобувача при виконанні дисертаційної роботи. Оглядова частина містить відомості щодо апробації результатів дисертації, кількості публікацій за темою роботи, обсягу та структури роботи.

Перший розділ.

Розділ присвячено експериментальним та теоретичним дослідженням залізобетонних елементів при крученні. Встановлено, що дослідженню жорсткості при крученні присвячена досить обмежена кількість робіт. Це обумовлено, насамперед, складним об'ємним напруженим станом, що виникає від деформації кручення. Дослідження кручення, що існують, як правило, вивчають **міцність** елементів з тріщинами. При розгляді питань жорсткості при крученні залізобетонних елементів з тріщинами в літературі припускають наявність просторових спіральних тріщин. Багатьма експериментальними дослідженнями встановлено, що на великому проміжку навантаження елементи працюють практично лінійно. Нелінійні деформації проявляються на етапах навантаження, що передують руйнуванню зразка. Отже, правомірним є використання розрахунків деформативності в лінійній постановці.

Питання саме жорсткості при крученні залізобетонного елемента з нормальними тріщинами досліджується лише в роботах Т.Н. Азізова та його учнів. Актуальними питаннями, що потребують уточнень в рамках наукової школи Т.Н. Азізова є:

- при визначенні нагельних сил в поздовжній арматурі слід враховувати дві складові, а не одну;
- слід враховувати наявність декількох поздовжніх стрижнів в перерізі;

- слід перевірити правомірність використання одиничних сил при визначенні переміщень в тріщині, які необхідні для визначення нагельних сил;
- слід враховувати вплив близького розташування поздовжньої арматури до грані елемента, тому що залежність переміщень анкера, які використовують в розрахунках, припускає закладення анкера в масиві.

Проаналізувавши розвиток методик досліджень Т.Н. Азірова, автор сформулювала завдання цього дослідження, які наведено вище.

Другий розділ.

В розділі запропоновано скупність методів визначення жорсткості залізобетонного елемента з нормальними тріщинами з урахуванням нелінійних властивостей бетону.

Нормальні тріщини впливають на крутильну жорсткість і міцність залізобетонних елементів. У нормах проектування всіх країн відсутня методика розрахунку міцності й жорсткості стрижневих залізобетонних елементів з нормальними тріщинами при крученні.

На основі методу лінійних кінцевих елементів, основні положення якого розроблені Т.Н. Азізовим, запропоновано **аналітичний спосіб визначення переміщення в нормальній тріщині**. Для оцінки достовірності аналітичної методики з використанням об'ємних кінцевих елементів було створено в програмному комплексі, що реалізує метод кінцевих елементів, моделі-балки двотаврового перерізу з тріщинами та виконано їх числовий розрахунок. Результати переміщень, отримані за аналітичною методикою φ , та дані, отримані в результаті числового експерименту φ_{ir} , показали майже повний збіг, що впевнено підтверджує достовірність аналітичної методики визначення переміщення в нормальній тріщині, що запропонована.

Запропоновано **метод апроксимації елемента двотаврового перерізу перехресно стрижневою системою**. Суцільний блок двотаврового поперечного перерізу замінюється на систему поздовжніх і поперечних (вертикальних і горизонтальних) стрижнів. Серед переваг методу, що запропоновано, можна виділити наступне:

1. При завданні в програмному комплексі «Ліра» об'ємної кінцевоелементної моделі окремого стрижня та його розрахунку при різних розмірах поперечного перерізу стрижня-паралепіпеда та різних варіантах прикладення сил по довжині паралелепіпеда отримуємо функційну залежність від трьох змінних величин – розмірів a та c поперечного перерізу стрижня та відстані від торця паралелепіпеда до точки прикладання сили по осі y . Отримавши один раз дані числових розрахунків за такою функцією, є можливим визначати переміщення при крученні будь-якого елементу.

2. Запропонований метод стрижневої апроксимації дозволяє розраховувати стрижні будь-якого поперечного перерізу.

3. З використанням методу легко вирішується завдання розрахунку елемента не тільки на кручення, а й на вигин з крученням.

4. Методика розрахунку дозволяє враховувати нелінійні властивості матеріалу шляхом використання будь-яких залежностей за діаграмами деформування матеріалів, оскільки при нелінійному розрахунку в кожному поздовжньому або поперечному стрижні окремо можна змінювати його параметри жорсткості будь-якими відомими методами розрахунку залізобетонних стрижневих елементів.

5. Методика дозволяє розраховувати на кручення елементи, до торця яких прикладено крутні моменти, розподілені яким завгодно чином, в тому числі при дії моменту на частини перетину, що практично не є можливим при використанні

класичних методів теорії пружності, в яких передбачається, що дотичні напруження рівномірно розподілені по торцевому перетину.

6. Методику розрахунку досить просто уточнити шляхом врахування моментів щодо координатних осей. При цьому в кожному перетині слід враховувати шість складових зусиль (сили вздовж осей тривимірної системи координат та моменти щодо цих осей).

При крученні елемента з нормальними тріщинами опір крутному моменту чинить поздовжня арматура й частина бетонного перерізу без тріщин. Для визначення жорсткості при крученні елемента з нормальнюю тріщиною основним і найскладнішим завданням є визначення взаємного переміщення берегів нормальної тріщини з умовно розсіченою арматурою. Після визначення взаємного зсуву берегів тріщини не складно обчислити крутильну жорсткість елемента з нормальними тріщинами, а також міцність елемента з нормальними тріщинами при крученні.

В розділі наведена **методика визначення взаємного переміщення берегів нормальнюї тріщини апроксимаційним методом** для елементів двотаврового перерізу. Методика реалізована в пакеті прикладних програм для числового аналізу Matlab та відрізняється своєю простотою та є достатньо точною для практичних розрахунків. Застосування методики дозволяє розраховувати крутильну жорсткість елементів двотаврового перерізу без використання складних програмних комплексів. Показано, що використання запропонованої методики дозволяє уникнути громіздкого та працемісткого використання об'ємних кінцевих елементів.

Порівняння переміщень, отриманих в результаті апроксимації в середовищі Matlab, з переміщеннями, отриманими безпосередньо з розрахунків за програмою Lira з використанням об'ємних кінцевих елементів, показало збіг величин з достатньо високою точністю (похибка становить від 1,14% до 11,55%). Це підтверджує правильність прийнятого підходу до вирішення завдання.

Аналогічний підхід можна застосувати для стрижневого елемента не лише двотаврового, але й для будь-якого іншого перерізу.

Слід відзначити, що створення бібліотеки апроксимаційних функцій дозволить істотно спростити вирішення багатьох завдань визначення характеристик жорсткості параметрів залізобетонних елементів з тріщинами, які можуть увійти окремим блоком до програмних комплексів, що існують. База апроксимаційних даних, отриманих за апроксимаційним функціями, також дозволяє врахувати нелінійні властивості бетону.

Показано, що перевагою запропонованих методик є їх відносна простота, а недоліком – наближеність,

Як резюме, слід зазначити, що в розділі запропоновано апарат визначення жорсткості залізобетонного елемента з нормальними тріщинами з урахуванням нелінійних властивостей бетону. Впровадивши цей апарат як один блок розрахунку в програмні комплекси, згадані вище, ми можемо розраховувати складні багаторазово статично невизначувані системи (перекриття, мости, каркаси будівель і т. п.) з урахуванням впливу жорсткості на перерозподіл зусиль між окремими елементами системи.

В роботі також представлено інженерний спосіб визначення переміщень у тріщині при крученні. З огляду на прийняте припущення про лінійну зміну висоти перерізу за наявності в елементі нормальних тріщини різної висоти, двотаврову балку представлена в вигляді елемента з висотою, що змінюється ступенево.

Для перевірки достовірності та точності цього способу було проведено порівняння переміщень, визначених за розробленою методикою, й за програмою «Ліра» із застосуванням об'ємних кінцевих елементів. Встановлено, що якщо прийняти кут нахилу зміни висоти перетину від нормальнюї тріщини рівним 45° , то результати

задовільно збігаються (середнє значення похибки – 6,9%), Це вказує на достатню точність інженерного методу визначення переміщень в тріщині.

Третій розділ.

Розділ присвячено експериментальним дослідженням жорсткості та міцності залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами.

Описано методику випробувань, експериментальні зразки, установку для експерименту й прилади для визначення величин, що вимірюються. Були виготовлені експериментальні зразки-балки двотаврового перерізу – дев'ять зі штучними нормальними тріщинами та три зразки – без таких тріщин. Штучні нормальні тріщини були створені за допомогою пластиинок з оргскла, які влаштовували в місці розташування тріщини при укладанні бетону в опалубку. Такі тріщини поділяли зразки по довжині на окремі блоки, пов'язані між собою частиною бетону без тріщин і поздовжньою арматурою. Довжина блоків становила 300 мм. Нижня полка двотаврових балок була армована двома арматурними стрижнями. В розділах 2 та 4 роботи було встановлено, що для двотаврових елементів з малою товщиною стінки висота тріщини не відіграє істотної ролі, тому була прийнята однакова висота нормальної тріщини, яка дорівнювала половині висоти перерізу елемента.

Ширина нижньої полиці для всіх зразків була однаковою й становила 85 мм; її товщина – 45 мм. Товщина ребра також не варіювалася й дорівнювала 30 мм. Варіювалася ширина b_f і товщина h_f верхньої полиці, а також діаметр поздовжньої арматури. Верхня полиця не була армована сіткою для виключення впливу арматури з метою більш точного визначення її міцності.

Конструкція експериментальної установки дозволила змоделювати чисте кручення (без стиснення) зразка. Пристосуваннями для вимірювання взаємного зміщення блоків, відокремлених штучними нормальними тріщинами, слугували дві рамки із сталевої смуги, що прикріплювалися до поверхні зразка притискними болтами, і забезпечували незмінність розташування індикаторів щодо зразка в процесі вимірювання деформацій. У приварених до центру рамок стерженьках-утримувачах з круглої сталі Ø12 мм встановлювалися з обох боків зразка індикатори годинникового типу (ціна поділки 0,01 мм) та затискалися болтами. Через горизонтальні отвори в стерженьках-утримувачах, приварених по центру рамок, пропускалися прутки з круглої сталі Ø8 мм і затискалися болтами. До кінця прутків горизонтально приварювалися тонкі сталеві пластиинки, на які вільно спиралися ніжки індикаторів. З одного боку зразка опорна рамка була жорстко приварена до випробувального стенда, а з іншого – шарнірно обперта на випробувальний стенд. До шарнірно обпертої рамки приварювався важіль, до якого кріпився піддон для завантаження його штучними вантажами.

Методика проведення експерименту для всіх зразків полягала в наступному:

- в опорні торцеві рамки експериментальної установки вкладали зразок з встановленими на нього двома рамками зі смугової сталі, що фіксувалися притискними болтами. Між рамками витримували відстань в 300 мм (база вимірювань), що дорівнювало довжині блоку між тріщинами. Вимірювали відстань від ніжок індикаторів I-1 та I-2 до стінки двотаврового зразка;

- зразки завантажували поетапно укладанням до піддона металевих штучних вантажів, які мали приблизно однакову вагу. Попередньо всі штучні вантажі були зважені та замарковані. Час витримки експериментального зразка під навантаженням становив 10 хвилин. Ступеневе навантаження зразка виконувалося аж до руйнування зразка.

Для визначення кубикової міцності та модуля деформації бетону за методикою відповідних ДСТУ було виготовлено стандартні зразки-призми та зразки-кубики. Модуль деформації бетону склав 25000 МПа. Міцність бетону на розтяг приймалася з таблиці 3.1 ДБН В.2.6-98: 2009 шляхом інтерполяції між реальним визначенням модулем деформації та найближчими значеннями модулів деформацій (менший та більший), взятих з цієї таблиці для сусідніх класів бетону. Таким чином, міцність бетону на розтяг склала $f_{ctk}=2,7$ МПа. Зважаючи на те, що крутильна жорсткість зразків двотаврового перерізу залежить, в основному, від нагельної складової зусиль в поздовжній арматурі, її міцність не перевірялася. Арматура для армування зразків була прийнята класу А500С.

За результатами випробувань балок-зразків встановлено, що:

- діаграма "крутний момент – кут закручування" залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами до високих рівнів навантаження має лінійний характер. Пластичні деформації мають місце на останніх етапах завантаження, перед руйнуванням;
- основним типом руйнування є руйнування верхньої полиці двотаврового елементу з розвитком просторової тріщини крученні.
- армування експериментальних балок з нормальними тріщинами тільки поздовжньою арматурою суттєво впливає на їх жорсткість.
- на міцність при крученні поздовжня арматура елементів з нормальними тріщинами впливає не так суттєво, як на жорсткість.
- досить велику частину зовнішнього крутного моменту сприймають нагельні сили в поздовжній арматурі. Різницю між зовнішнім крутним моментом і моментом нагельних сил в арматурі сприймає верхня полка двотаврового елементу.
- збільшення діаметра поздовжньої арматури призводить до зменшення деформації та, відповідно, збільшення жорсткості балок при крученні.

Четвертий розділ.

Розділ присвячено дослідженню питань жорсткості та міцності залізобетонних двотаврових елементів з нормальними тріщинами при крученні.

При крученні елемента з нормальними тріщинами опір крутному моменту чинить поздовжня арматура й частина бетонного перерізу без тріщин. Для визначення міцності та жорсткості при крученні елемента з нормальнюю тріщиною слід спочатку розсісти поздовжню арматуру в перерізі з тріщиною, а потім визначити взаємний зсув берегів тріщини. Після визначення взаємного зсуву берегів тріщини слід визначити складові Q_x та Q_z нагельної сили в поздовжній арматурі за допомогою системи двох квадратних рівнянь. Знаючи величину нагельної сили, слід визначити крутильну жорсткість елемента з нормальними тріщинами, а також міцність елемента з нормальними тріщинами при крученні.

Наведена в роботі **методика визначення нагельних сил в поздовжній арматурі, жорсткості й міцності при крученні залізобетонних елементів з нормальними тріщинами** дозволяє більш точно проектувати залізобетонні конструкції, в елементах яких з'являються нормальні тріщини та які сприймають не лише згинальні, а й крутні моменти.

Розроблено **інженерну методику визначення крутильної жорсткості залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами**. Запропоновано застосувати еквівалентну крутильну та згинальну жорсткість, які визначаються з умови рівності максимального кута повороту й максимального прогину (в середині прольоту) елемента з реальним розподілом жорсткостей куту

повороту й прогину в тому ж перерізі елемента з умовно постійною еквівалентною жорсткістю.

Розроблено методику розрахунку міцності при крученні елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами. Визначено дві умови міцності при крученні. Показано, що умовою міцності елемента з нормальними тріщинами приймається найменше значення з двох умов міцності, відповідних схем його руйнування.

Дослідження показують, що міцність залізобетонних елементів при крученні залежить від наявності поздовжньої арматури в разі наявності нормальніх тріщин. Такий факт спростовує загально відому думку про те, що поздовжня арматура не впливає на міцність при крученні. Наведені факти, на погляд автора, повинні бути враховані при проведенні практичних розрахунків несучих систем залізобетонних будівель і споруд.

Порівняння теоретичних значень кутів закручування з експериментальними показало їх задовільний збіг, що дає можливість використання розробленої методики до практики проектування.

Зауваження за дисертацією.

Ознайомлення з основними розділами дисертаційної роботи дозволило сформулювати наступні загальні зауваження та побажання:

1. Тема дисертаційної роботи сформульована як «Жорсткість залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами при крученні», а предметом дослідження зазначено «напружене-деформований стан, деформативність і несучу здатність при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами». Можливо, було би доречним, узагальнити назву дисертаційної роботи, таким чином, щоб вона відображала в роботі не лише питання жорсткості, але й питання міцності, які також досліджено в роботі.
2. В пункті 3.2 зазначено, що «Згідно з [42] була визначена кубова міцність бетону, з якого формувалися зразки. Всього було виготовлено шість контрольних кубів з розмірами граней 100x100x100 мм. Склад бетону підбирався за методикою [28] таким чином, щоб його клас відповідав класу С 16/20» В пункті 3.2 далі не наведено результати фактичної міцності стандартних кубиків, тож не зрозуміло, чи міцність кубиків, а значить і міцність зразків-балок, відповідає очікуваній кубиковій міцності $f_{cube} = 20$ МПа для важкого бетону, який було використано для виготовлення балок-зразків. В додатках бажано було б навести журнал випробувань зразків-кубиків для встановлення фактичної кубикової міцності бетону.
3. В пункті 3.2 наведено характеристики експериментальних зразків – кубова міцність бетону та модуль деформації бетону. Описана методика визначення модуля деформації бетону. В розділі «додатки» бажано було б навести журнал випробування зразків-призм при визначенні призмової міцності бетону та модуля деформації бетону.
4. В п. 3.3 наведено експериментальні графіки «крутний момент-кут закручування» (рис. 3.7–3.15). Для кожної марки балки таку залежність показано на окремому графіку. Можливо, для більш наочного відстеження зміни кута закручування від діаметра поздовжньої арматури при постійних розмірах верхньої полиці, потрібно було б навести ці залежності на одному графіку. Наприклад криві на рис.3.7–3.9 можна показати на одному графіку й тоді більш наглядним був би вплив різного діаметру поздовжньої арматури ($d_s=8,10,12$ мм) при незмінних розмірах полиць b_f та h_f на залежність «крутний момент-кут закручування».

5. Бажано було б в додатках також навести вихідні експериментальні дані – журнали записів відліків за приладами (індикаторами годинникового типу) при випробуванні експериментальних балок з нормальними тріщинами при крученні.

Зауваження та побажання не знижують наукового значення одержаних у дисертаційній роботі результатів експериментальних та теоретичних досліджень роботи при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами.

Висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційна робота Орлової Ольги Михайлівни за темою «Жорсткість залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами при крученні» є завершеною науковою працею. Тема роботи, що виконана на високому науковому рівні, є актуальну. В процесі роботи автором отримано нові науково значущі та науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що вирішують актуальну задачу розрахунку деформативності та міцності стрижневих елементів двотаврового поперечного перерізу з нормальними тріщинами.

Запропоновано методику визначення взаємного зміщення берегів нормальної тріщини для елементів двотаврового перерізу, яка характеризується своєю простотою й достатньо точною для практичних розрахунків, що дозволяє розраховувати крутильну жорсткість елементів двотаврового перерізу без використання складних програмних комплексів. Розроблено методику розрахунку міцності при крученні елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами. Встановлено дві умови міцності при крученні. Показано, що умовою міцності елемента з нормальними тріщинами приймається найменше значення з двох умов міцності, відповідних схем його руйнування.

Розроблено методику визначення нагельної сили в поздовжній арматурі при крученні елемента з нормальнюю тріщиною.

В роботі експериментальним шляхом встановлено, що міцність залізобетонних елементів при крученні також залежить і від наявності поздовжньої арматури, що спростовує сталу думку про те, що саме поздовжня арматура ніяк не впливає на міцність перерізу при крученні. На погляд автора, наведені факти повинні бути враховані при проведенні практичних розрахунків несучих систем залізобетонних будівель і споруд.

Всі аналітичні методики, що розроблено, – визначення взаємного зміщення берегів тріщини, визначення нагельних сил, інженерний спосіб визначення переміщень у тріщині з арматурою, визначення жорсткості та міцності поперечного перерізу для швидкого практичного розрахунку втілено також і в форматі комп’ютерних програм, розроблених на мові Visual Basic. Застосування цих програм дозволяє визначати необхідні параметри напружено-деформованого стану елементу без застосування складних моделей, що передбачають використання об’ємних кінцевих елементів та складних програмних комплексів.

Було порівняно теоретичні значення кутів закручування та несучої здатності двотаврових перерізів, отриманих за розробленими методиками, з експериментальними даними. Порівняння показало їх задовільний збіг, що дає можливість використання розроблених методик та розроблених програм у практиці проектування.

Результати роботи є науково значущими, містять наукову новизну та практичну цінність, що підтверджено довідками про впровадження результатів при внесенні змін до державних стандартів, що розроблені Державним підприємством «Державний

науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» та використані при технічному обстеженні об'єкта Науково-виробничим підприємством «Будівельна наука» Академії будівництва України.

Дисертація оформлена на достатньому рівні, а результати, що в ній наведено, розкривають мету та завдання дослідження. Автореферат оформлено згідно з вимогами ДАК МОН України, відображає зміст роботи та свідчить про вагому професійну підготовку здобувача. Зауваження, відзначені при розгляді змісту основних розділів, ніяким чином не знижують позитивну оцінку дисертаційної роботи загалом та їх слід розглядати як побажання для подальших досліджень.

Враховуючи повноту викладеного матеріалу, наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів, вважаю, що робота повністю відповідає вимогам ДАК МОН України до кандидатських дисертацій, а її автор, Орлова Ольга Михайлівна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди.

Офіційний опонент:
доцент кафедри будівельних
конструкцій Сумського національного
аграрного університету,
кандидат технічних наук

Н.М. Срібняк

Підпис офіційного опонента
к.т.н. Срібняк Н.М. засвідчує:

Вчений секретар Вченої ради СНАУ,
д.е.н., професор



М.О. Лишенко

«11» березня 2021 р.