

МІНІСТЕРСТВО РОЗВИТКУ ГРОМАД ТА ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
ДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

ОРЛОВА ОЛЬГА МИХАЙЛІВНА



УДК 624. 012

**ЖОРСТКІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДВОТАВРОВОГО ПЕРЕРІЗУ
З НОРМАЛЬНИМИ ТРІЩИНАМИ ПРИ КРУЧЕННІ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Уманському державному педагогічному університеті імені Павла Тичини Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:
Азізов Талят Нуредінович,

доктор технічних наук, професор

Завідувач кафедри техніко-технологічних дисциплін, охорони праці та безпеки життєдіяльності, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини, МОН України (м. Умань)

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Кочкар'юв Дмитро Вікторович,
професор кафедри міського будівництва та господарства, Національний університет водного господарства та природокористування, МОН України
(м. Рівне)

кандидат технічних наук, доцент
Срібняк Наталія Миколаївна,
доцент кафедри будівельних конструкцій, Сумський національний аграрний університет (м. Суми)

Захист відбудеться « 24 » березня 2021 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.833.01 при ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій» за адресою: 03037, м. Київ, вул. Преображенська, 5/2, ауд. 218.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного науково-дослідного інституту будівельних конструкцій за адресою: 03037, м. Київ, вул. Преображенська, 5/2

Автореферат розісланий « 20 » лютого 2021 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради

кандидат технічних наук, с.н.с.



Ю.С. Слюсаренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перерозподіл зусиль між окремими елементами складних статично невизначених систем залежить від співвідношення їх характеристик жорсткості. Згинальні жорсткості залізобетонних елементів з урахуванням утворення тріщин, нелінійних властивостей матеріалів вивчені досить широко. У той же час, питанням зміни крутильних жорсткостей залізобетонних елементів в результаті утворення тріщин приділено значно менше уваги. Як наслідок, в будівельних нормах України та багатьох країн світу практично відсутні методи визначення жорсткості та деформативності залізобетонних елементів з тріщинами. Існуючі методи розрахунку переміщень при крученні залізобетонних елементів припускають наявність в елементі просторових (спіральних) тріщин. Однак на великий клас залізобетонних елементів діють крутні моменти при наявності в перерізі тільки нормальних тріщин.

З давніх-давен вважалося, що поздовжня арматура не впливає на міцність залізобетонного елемента при крученні. Питанням розрахунку жорсткості та несучої здатності при крученні залізобетонних елементів з нормальними тріщинами присвячено обмежене число робіт. Це роботи під керівництвом Т.Н. Азізова, в яких розглядалися елементи прямокутного, коробчастого і порожнистого трикутного перерізу. Однак, великий клас залізобетонних елементів має поперечний переріз у вигляді двотавра, що накладає істотний відбиток на їх напружено-деформований стан при крученні. Питанням розрахунку міцності і жорсткості залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами не приділено уваги.

У зв'язку з вищесказаним розроблення методів визначення жорсткості та міцності при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами є актуальним завданням будівельної науки

Зв'язок роботи з науковими програмами.

Тема дисертації і отримані результати 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».

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

Для досягнення мети були проведені теоретичні дослідження із застосуванням методів будівельної механіки, програмних комплексів, що використовують метод скінчених елементів, а також був проведений експеримент на зразках залізобетонних двотаврових балок з штучними нормальними тріщинами.

Завдання дослідження.

1. Розробити чисельно-аналітичну і інженерну методику визначення взаємного зсуву берегів нормальної тріщини в елементах двотаврового перерізу.

2. Провести експериментальні дослідження деформативності та міцності залізобетонних елементів двотаврового перетину з нормальними тріщинами при дії на них крутних моментів.

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

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

5. Провести порівняння розробленої методики з експериментальними даними з метою перевірки її достовірності.

Об'єкт дослідження – робота при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами.

Предмет дослідження - напружено-деформований стан, деформативність і несуча здатність при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами.

Методи дослідження - методи будівельної механіки (при розробці чисельно-аналітичної методики визначення переміщень берегів нормальної тріщини та визначення нагельних сил в поздовжній арматурі); комп'ютерні програми Mathcad, Pascal і Excel з використанням Visual Basic для аналізу напружено-деформованого стану та міцності розглянутих елементів за розробленими методиками; експериментальні дослідження на зразках залізобетонних двотаврових балок з нормальними тріщинами.

Наукова новизна роботи:

- вперше експериментально отримані залежності «крутний момент - кут закручування» для залізобетонних елементів двотаврового перерізу з штучними нормальними тріщинами;

- дістала подальшого розвитку чисельно-аналітична методика визначення переміщень берегів нормальної тріщини шляхом поділення на два стрижні, де врахована форма поперечного перерізу та моменти у стінці двотавру;

- удосконалено методика визначення нагельних сил в поздовжній арматурі при крученні залізобетонного елемента з нормальними тріщинами, що відрізняється від існуючої врахуванням двох складових нагельних сил, кількості поздовжньої арматури та її розташування у поперечному перерізі;

- удосконалено методика визначення жорсткості та міцності при крученні залізобетонних елементів з нормальними тріщинами, що відрізняється врахуванням форми поперечного перерізу елемента;

- експериментальним шляхом отримані дані, які на відміну від існуючих показують, що поздовжня арматура впливає на жорсткість і міцність при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу при наявності нормальних тріщин, що достатньо велику частину зовнішнього крутного моменту сприймають нагельні сили в поздовжній арматурі.

Практичне значення отриманих результатів роботи:

- розроблені та впроваджені методики розрахунку міцності і деформативності, що дозволяють визначати напружено-деформований стан і несучу здатність при проектуванні залізобетонних елементів двотаврового перерізу за наявності в них нормальних тріщин, з урахуванням кількості поздовжньої арматури і її розташування в поперечному перерізі, що впливає на їх напружено-деформований стан;

- експериментально підтверджений факт впливу жорсткості верхньої полиці та діаметру і кількості поздовжньої арматури на загальну жорсткість при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами, що дозволяє більш точно і надійно проектувати залізобетонні елементи перекриттів, мостів та інших систем, що деформуються просторово.

Отримані теоретичні та експериментальні результати розвивають методи розрахунку залізобетонних конструкцій, забезпечують вирішення актуальних прикладних задач, а також економічні та надійні проектно-конструкторські рішення залізобетонних балок, ригелів двотаврового поперечного перерізу. При цьому можлива об'єктивна оцінка напружено-деформованого стану, міцності і деформативності конструктивних елементів, які проектуються на стадії нового будівництва, а також експлуатуються тривалий час і вимагають обстеження і підсилення.

Результати дисертації використані:

- державним підприємством «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»(ДП НДІБК) для використання 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, м. Київ.

- науково-виробничим підприємством «Будівельна наука» Академії будівництва України при технічному обстеженні будівлі головного корпусу виробництва двоокису титану ОЦДТ ПАТ «Сумхімпром», м. Суми.

Особистий внесок здобувача полягає у плануванні, проведенні та аналізі експериментальних досліджень роботи залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами при крученні. Всі основні наукові положення, результати, висновки, рекомендації отримані здобувачем самостійно. Окремі положення досліджень виконані у співавторстві, що відображено в списку наукових публікацій.

Достовірність даних, отриманих на основі запропонованої методики визначення несучої здатності і деформативності при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами, підтверджується задовільним збігом з результатами фізичного експерименту.

Апробація роботи.

Основні положення і результати дисертації доповідалися на наступних 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.

В повному обсязі результати роботи були представлені та обговорені на розширеному засіданні кафедри техніко-технологічних дисциплін, охорони праці та безпеки життєдіяльності Уманського державного педагогічного університету імені Павла Тичини (18.06.2020 р.); на розширеному засіданні відділу надійності будівельних конструкцій ДП НДІБК (27.06.2020 р).

6. Публікації. Основні положення дисертації і результати досліджень були опубліковані в 12 роботах, в тому числі 7 статей у збірниках, які є фаховими виданнями, 2 статті у виданні, що індексується базою Scopus, 2 статті в закордонних виданнях, 1 стаття у інших виданні України.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 281 найменувань. Дисертація викладена на 188 сторінках, які включають 145 сторінок основного тексту, в тому числі 77 малюнків, 8 таблиць; 31 сторінка списку використаних джерел із 281 найменувань, 12 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і задачі дослідження, наукова новизна та практична цінність дисертації, представлено її загальну характеристику.

У першому розділі наведено огляд літературних джерел, присвячений питанням методів розрахунку залізобетонних елементів при крученні. Придільено увагу розгляду існуючих нормативних та авторських методів розрахунку залізобетонних елементів з спіральними та нормальними тріщинами при крученні.

В ході літературного аналізу встановлено, що крутильна і згинальна жорсткості впливають на перерозподіл зусиль в складних системах, що деформуються просторово. Розрахунком перекриттів та інших статично невизначених систем з урахуванням просторової роботи, впливом різних характеристик жорсткості на перерозподіл зусиль в системах, що деформуються просторово, врахуванням нелінійних властивостей займались Азізов Т.Н., Айвазов Р.Л., Арзуманян К.М., Бабич Є.М., Бамбура А.М., Байков В.М., Барашиков А.Я., Бедов А.І., Бліхарський З.Я., Верещага О.І., Горнов В.Н., Додонов М.І., Карабанов Б.В., Кваша В.Г., Кочкар'єв Д.В., Крамарь В.Г., Краснощеков В.Л., Левін С.Е., Лантух-Лященко А.І., Немчинов Ю.І., Савченко О.С., Семко О.В., Семченков О.С., Трифонов І.А., Уліцький Б.Є. Шагін О.Л., Шмуклер В.С., Homberg H., Lubel L, Piere Lutrin та ін.

В роботах цих авторів та інших дослідженнях показано, що в елементах систем перекриттів, мостів виникають не лише згинальні, а й істотні крутні моменти. На просторову роботу перекриттів істотно впливає не лише жорсткість при згині, але й жорсткість при крученні їхніх елементів.

Роботі залізобетонних елементів при крученні присвячені публікації: Белубекян А.В., Гибшман М.Є., Дюрменова С.С., Єлагін Е.Г., Залесов О.С., Карпенко М.І., Касаєв Д.Х., Меладзе Н.С., Попов В.І., Рулле Л.К., Складнева Р.А., Фомичев В.І., Чистова Т.П., Юдін В.К., Ячменева Н.Н., Bishara A., Charan B.G., Collins M.P., Cowan H.J., Hsu T.T., James K.W., Kemp E.L., Luis L.F., Rahal K.N., Reid S.G., Shanmugam S.P, Xia P. та ін.

У цих та інших роботах розглядаються елементи зі спіральними тріщинами при крученні, елементи прямокутного, таврового, кільцевого, двотаврового перерізів.

У процесі експлуатації конструкцій в системах, що деформуються просторово, від дії згинальних моментів в залізобетонних елементах утворюються нормальні тріщини. В той же час в цих елементах діють і крутні моменти. Існуючі методи визначення деформування залізобетону з тріщинами при крученні припускають наявність просторових спіральних тріщин і не є прийнятними для елементів з нормальними тріщинами.

Питанням розрахунку деформацій при крученні залізобетонних елементів з нормальними тріщинами присвячено мало робіт. Це роботи Азізова Т.Н., Красіна М.О., Срібняк Н.М., Мельника О.С., Парамонова Д.Ю., Стадника В.І. та ін. В роботах під керівництвом Т.Н. Азізова не розглядались методи розрахунків несучої здатності та деформативності залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами.

На основі огляду літератури у першому розділі поставлені задачі дослідження.

Другий розділ присвячений дослідженню напружено деформованого стану при крученні двотаврових залізобетонних елементів з нормальними тріщинами. Показано, що задача розрахунку жорсткості при крученні залізобетонних елементів з нормальними тріщинами включає в себе три етапи. На першому етапі слід розсікти поздовжню арматуру і визначити взаємне переміщення берегів нормальної тріщини. Цей етап є найскладнішим і найважливішим в за-

гальному розрахунку. На другому етапі слід визначити нагельні сили в поздовжній арматурі. Третій етап – це визначення жорсткості при крученні при визначених на попередньому етапі нагельних сил.

Розглянуто методики визначення взаємного переміщення берегів нормальної тріщини. При розробленні чисельно-аналітичної методики визначення взаємного переміщення берегів нормальної тріщини, враховуючи, що двотаврові елементи мають відносно малу товщину полицок і стінки, прийнято допущення розрахунку у вигляді тонких пластин.

Для розрахунку переміщень двотавровий елемент розсікається на два таврових. Верхній тавр має висоту стиснутої від згину зони елемента. Нижній тавр має висоту, яка дорівнює висоті нормальної тріщини (рис. 1). По лінії розтину діють внутрішні невідомі зусилля: погонні дотичні зусилля $\tau(x)$ і погонні моменти $m(x)$. Для цих невідомих зусиль розглянуті умови спільності деформацій у місті розсічення. Прирівнюючи переміщення верхнього тавра переміщенням нижнього тавра, а також кути повороту верхнього тавра кутам повороту нижнього тавра, отримано розв'язуючу систему диференціальних рівнянь для визначення невідомих зусиль $T(x)$ і $M_t(x)$ (див. рис. 1):

$$\left\{ \begin{array}{l} T \left(\frac{r_1^2}{GJ_1} + \frac{r_2^2}{GJ_2} \right) + Mt \left(\frac{r_1}{GJ_1} - \frac{r_2}{GJ_2} \right) + T'' \left(\frac{rr_1^3}{3EJ} + \frac{rr_2^3}{3EJ} \right) + Mt'' \left(\frac{rr_1^2}{2EJ} - \frac{rr_2^2}{2EJ} \right) = \frac{Mt_0 r_1}{GJ_1} \\ T \left(-\frac{r_1}{GJ_1} + \frac{r_2}{GJ_2} \right) + Mt \left(-\frac{1}{GJ_1} - \frac{1}{GJ_2} \right) + T'' \left(-\frac{rr_1^2}{2EJ} + \frac{rr_2^2}{2EJ} \right) + Mt'' \left(-\frac{rr_1}{EJ} - \frac{rr_2}{EJ} \right) = \frac{-Mt_0}{GJ_1} \end{array} \right. \quad (1)$$

де позначено: $T=T(x)$ – сумарні дотичні сили, при цьому $T^I(x)=\tau(x)$; $Mt=Mt(x)$ – сумарні моменти, при цьому $Mt^I(x)=m(x)$; GJ_1 , GJ_2 – крутильна жорсткість відповідно верхнього та нижнього таврів; Mt_0 – зовнішній крутний момент.

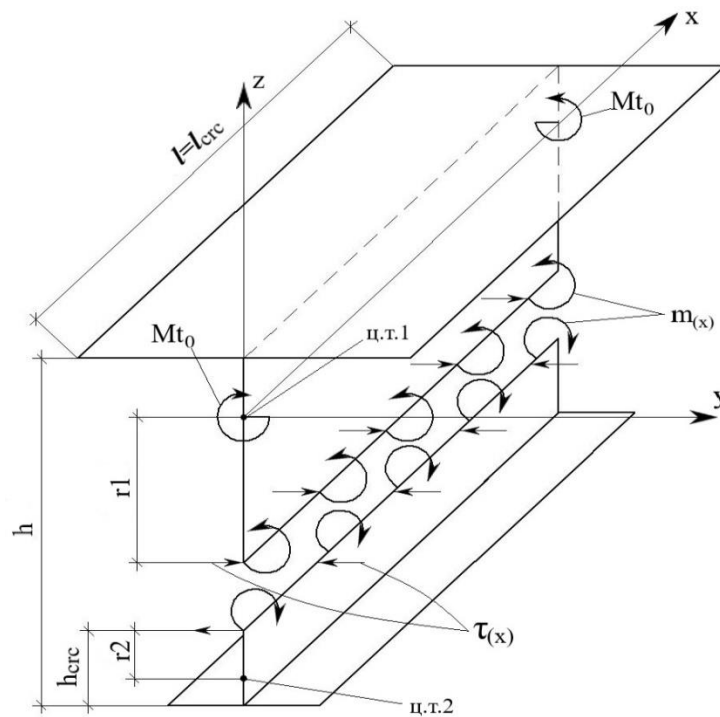


Рис. 1. Схема розділення двотаврового стрижня на два таврових

Граничні умови для невідомих (при $x=0$ і $x=L$) будуть мати вигляд:
 $T(0)=T(L)=0; M_x(0)=M_x(L)=0$, тобто сумарні дотичні сили і сумарні моменти на кінцях розглянутої ділянки (в місцях наявності нормальних тріщин) мають нульові значення. А погонні дотичні сили $\tau(x)$ і погонні моменти $m(x)$, навпаки, мають максимальні значення на границях ділянки. Тобто $\tau(0)=\tau(L)=\max; m(0)=m(L)=\max$. Такі граничні умови дозволили прийняти рішення системи диференціальних рівнянь (1) за допомогою розкладання невідомих зусиль і зовнішнього моменту в ряди Фур'є по синусах. В результаті отримана система двох алгебраїчних рівнянь, де невідомими є коефіцієнти Фур'є.

Після визначення невідомих $\tau(x)$ і $m(x)$ переміщення окремо верхнього і окремо нижнього таврів визначається як переміщення від дії зовнішнього крутного моменту та визначених з рішення системи рівнянь (1) внутрішніх зусиль.

Порівняння розрахунку за наведеною методикою з розрахунками з використанням програми Ліра з моделюванням об'ємними скінченими елементами показало хороший збіг даних, що говорить про достовірність розробленої методики. В той же час розрахунок за наведеною методикою не потребує використання складних програмних комплексів.

Розглянутий також метод стрижневої апроксимації. Для розрахунку двотавровий елемент розбивається на скінчену кількість стрижневих елементів прямокутного перерізу, які з'єднані між собою поперечними стрижнями.

Жорсткість поздовжніх стрижнів приймається як жорсткість кожного елемента прямокутного перерізу. Жорсткість поперечних стрижнів підбирається таким чином, щоб відносний кут закручування такої стрижневої системи дорівнював відносному куту закручування елемента, визначеному за точною методикою теорії кручення.

Таке моделювання у програмі Ліра дозволяє використовувати стрижневі скінчені елементи замість об'ємних, що суттєво спрощує розрахунки і в порівнянні з визначенням переміщень за формулами теорії кручення дозволяє враховувати наявність тріщини.

Недоліком такого підходу є факт попереднього визначення жорсткості поперечних стрижнів з використанням програми Ліра. Тому за основний метод прийнятий розроблений у другому розділі інженерний метод визначення взаємного переміщення берегів нормальної тріщини (рис. 2).

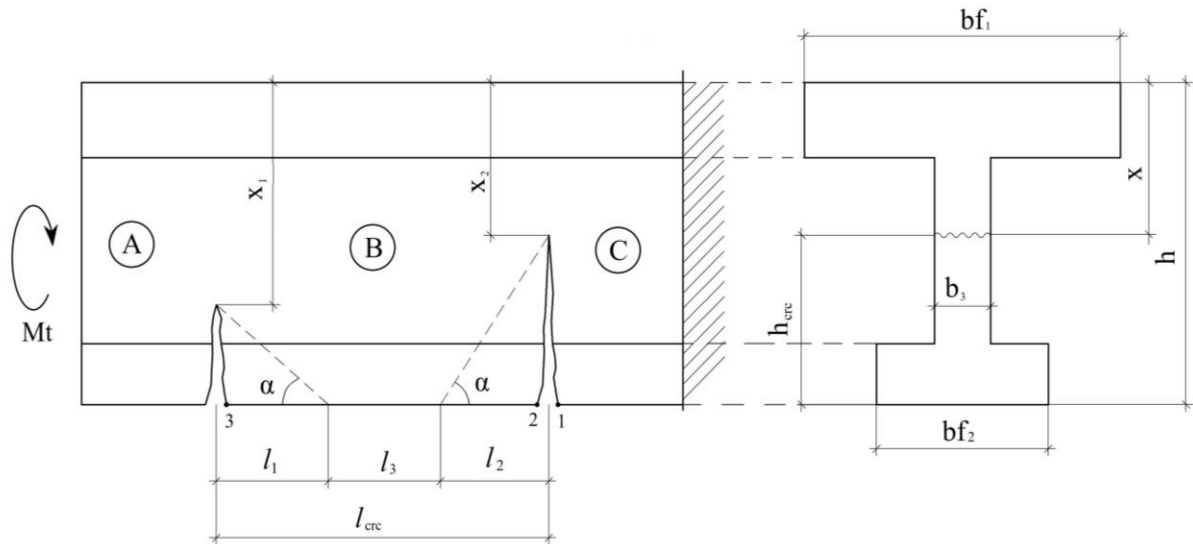


Рис. 2. Схема крутіння двотаврового елемента з нормальними тріщинами.

Крутний момент від блоку А до блоку В передається через частину перетину. У місці наявності тріщини жорсткість перерізу (як згинальна, так і крутильна) різко змінюється. В такому випадку елемент можна розраховувати як умовний елемент з перетином, висота якого змінюється за деякою кривою. Прийнято наближену гіпотезу, що в нашому випадку висота елемента змінюється за законом прямої лінії. При цьому вона змінюється від малої величини x_1 (для блоку В на рис. 3 зліва направо) до повної висоти h . Аналогічно з правого боку блоку В лінія зміни розрахункової висоти перетину буде змінюватися від x_2 до h . Позначимо через α кут нахилу цих ліній до горизонталі.

На довжині $l_3 = l_{crc} - l_1 - l_2$ елемент має повну висоту перетину, а, отже, і повну жорсткість. Довжина блоку В між нормальними тріщинами l_{crc} , що є відстанню між нормальними тріщинами, яке може бути визначено за будь-яким з відомих методів, в тому числі за методикою нормативних документів.

У перетині з тріщиною зліва від блоку В момент інерції при крученні $J_{crc,1}$ дорівнює моменту інерції таврового елемента висотою x_1 і полицею в верхній зоні; в перерізі праворуч від цього блоку момент інерції при крученні $J_{crc,2}$ буде дорівнювати моменту інерції тавра з висотою перетину x_2 .

З огляду на прийняте припущення про лінійну зміну висоти двотаврову балку представлено у вигляді елемента зі ступінчастою змінною висоти (рис. 3). При цьому висота перетину на довжині l_1 і на довжині l_2 відповідно визначається за формулами з геометричних побудов:

$$h_{ekv,1} = \frac{x_1 + h}{2}; h_{ekv,2} = \frac{x_2 + h}{2} \quad (2)$$

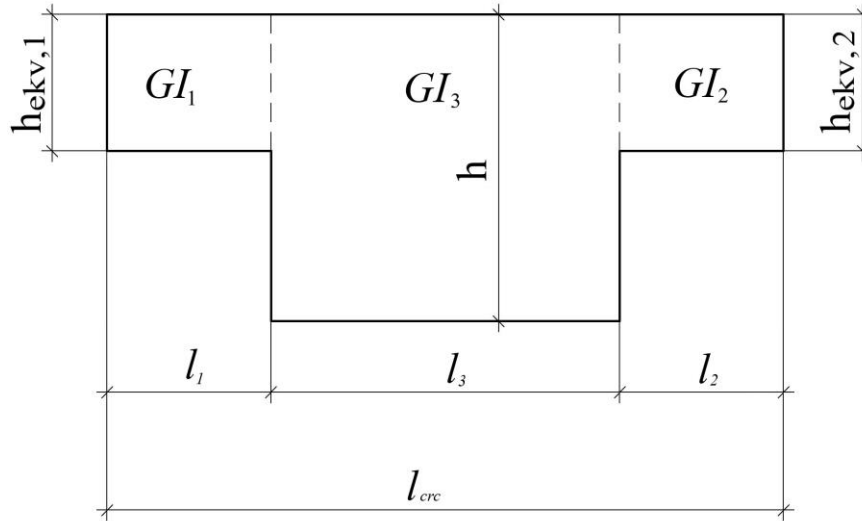


Рис.3. Схема подання елемента із ступінчастою зміною висоти

Крутильні жорсткості елементів на ділянках довжиною l_1 і l_2 визначаються як для таврових елементів з відповідною висотою перетину $h_{ekv,1}$ і $h_{ekv,2}$, а на ділянці довжиною $l_3=l_{crc}-l_1-l_2$ - як для двотаврового елемента з повною висотою перетину h .

Довжини l_1 і l_2 легко визначаються з геометричних побудов при відомому куті нахилу α (див. рис. 2). Знаючи висоти $h_{ekv,1}$ і $h_{ekv,2}$, а також довжини l_1 і l_2 , визначаються всі моменти інерції при крученні J_1 , J_2 і J_3 , а, отже, і жорсткості на цих відповідних ділянках GJ_1 , GJ_2 і GJ_3 .

Для вирішення основного завдання визначення жорсткості при крученні елемента з нормальними тріщинами потрібно знати взаємне зміщення точок 1 і 2 на рис. 2. Для цього слід від кута повороту між точками 1 і 3 відняти кут повороту між точками 2 і 3, тобто:

$$\varphi_{1-2} = \varphi_{1-3} - \varphi_{2-3} \quad (3)$$

Кут повороту між точками 2 і 3 визначається відомими методами опору матеріалів для двотаврового елемента з повною висотою перетину h :

$$\varphi_{2-3} = \frac{M_t l_3}{GJ_3} \quad (4)$$

А кут повороту між точками 1 і 3 (див. рис. 2) як елемент зі східчастою зміною висоти перетину за рис.3 буде визначено з виразу:

$$\varphi_{1-3} = \frac{M_t}{G} \left(\frac{l_1}{J_1} + \frac{l_2}{J_2} + \frac{l_3}{J_3} \right) \quad (5)$$

де J_1 і J_2 , як було сказано вище, це моменти інерції при крученні таврів з висотою відповідно $h_{ekv,1}$ і $h_{ekv,2}$, а J_3 -момент інерції двотаврового (повного) перетину з повною висотою h .

Розглянуто випадок, коли $l_3=l_{crc}-l_1-l_2 \leq 0$, а також випадок, коли $h_{ekv} > h-hf_1$ (де hf_1 - товщина верхньої полиці двотавру).

Для перевірки достовірності та точності методики розрахунку було проведено порівняння розрахунків за наведеною методикою з розрахунками в про-

грамі Ліра з використанням об'ємних скінчених елементів. В таблиці 1 наведені дані такого порівняння. Розглядалася двотаврова балка з повною висотою перетину $h=220$ мм. Варіювалися ширина bf_1 верхньої полиці і її товщина hf_1 ; ширина і товщина нижньої полиці bf_2 і hf_2 ; висота h_3 і товщина t стінки. Крім того варіювалася висота тріщини h_{crc} і відстань між тріщинами l_{crc} . Кут α в розрахунковій схемі за рис. 2 був прийнятий рівним 45° . У таблиці наведено переміщення від взаємного повороту між точками 1 і 3 (див. рис. 2), обчислені за запропонованою методикою і в програмі Ліра.

Таблиця 1.

Порівняння переміщень, визначених за розробленою методикою і за програмою Ліра із застосуванням об'ємних кінцевих елементів

№ п/п	bf_1 (м)	hf_1 (м)	bf_2 (м)	hf_2 (м)	t (м)	h_3 (м)	h_{crc} (м)	l_{crc} (м)	Δ_{teor} (мм)	Δ_{Lira} (мм)	Похибка δ %
1	0.30	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.110	0.30	80.65	87.81	8.15
2	0.30	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.123	0.30	84.37	91.80	8.09
3	0.30	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.174	0.30	102.37	106.64	4.00
4	0.30	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.142	0.30	90.48	97.69	7.38
5	0.30	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.045	0.30	65.72	70.00	6.11
6	0.30	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.058	0.30	68.22	74.73	8.72
7	0.20	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.110	0.30	105.88	111.22	4.80
8	0.20	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.123	0.30	112.09	117.69	4.76
9	0.20	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.174	0.30	143.00	143.56	0.39
10	0.20	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.142	0.30	122.42	127.58	4.04
11	0.20	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.045	0.30	81.56	83.78	2.66
12	0.20	0.03	0.09	0.05	0.03	0.15	0.058	0.30	85.55	90.55	5.52
13	0.30	0.04	0.09	0.05	0.03	0.14	0.110	0.30	43.92	49.02	10.41
14	0.30	0.04	0.09	0.05	0.03	0.14	0.123	0.30	45.08	50.28	10.35
15	0.30	0.04	0.09	0.05	0.03	0.14	0.174	0.30	50.48	54.21	6.88
16	0.30	0.04	0.09	0.05	0.03	0.14	0.142	0.30	46.99	52.01	9.66
17	0.30	0.04	0.09	0.05	0.03	0.14	0.045	0.30	39.12	43.53	10.14
18	0.30	0.04	0.09	0.05	0.03	0.14	0.058	0.30	39.95	45.31	11.84
Середнє значення %											6.9
Коефіцієнт варіації %											0.45

Дані таблиці свідчать про достатню точність запропонованого інженерного методу. В той же час враховуючи, що такий розрахунок можна проводити «вручну», можна бачити переваги запропонованого методу визначення взаємного зміщення берегів нормальної тріщини.

Третій розділ дисертації присвячений експериментальному дослідженню жорсткості та несучої здатності залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами (рис. 4).

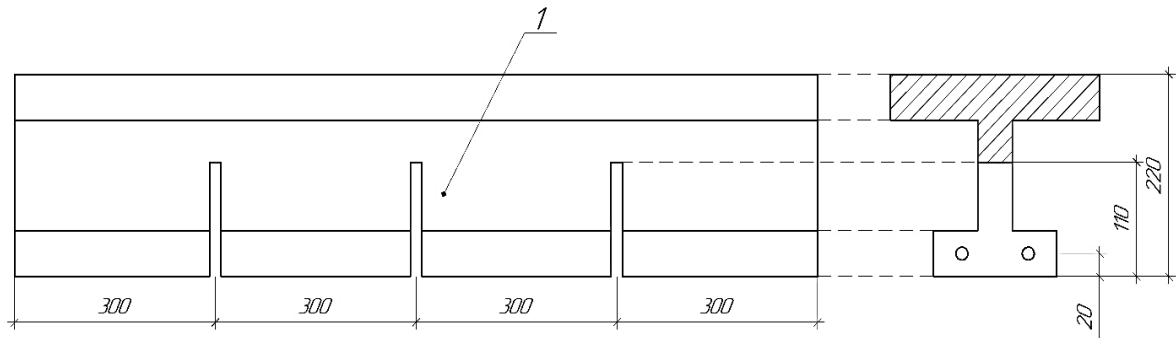


Рис. 4. Схема утворення штучних тріщин і армування зразків;
1 - вставка з оргскла

Штучні нормальні тріщини були створені за допомогою пластинок з оргскла, які вставляли 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 (див. рис. 4). Довжина блоків становила 300 мм. Крім того, три зразки були зроблені суцільними, без штучних нормальних тріщин.

На рис. 5 показана схема розташування приладів і загальний вигляд установки для випробування. Всього було випробувано 9 зразків залізобетонних двотаврових балок з штучно створеними нормальними тріщинами та три зразки без тріщин.



Рис. 5. Загальний вигляд стенду з зразком

Склад бетону підбирався таким чином, щоб його клас відповідав класу С 16/20. Для визначення модуля деформації бетону було виготовлено вісім призм розмірами 150x150x600 мм.

Експериментальні дослідження показали, що залежність «крутний момент-кут закручування» є практично лінійною. Суттєві нелінійні деформації

з'являлися на останніх етапах навантаження перед руйнуванням. Тому при нормативних навантаженнях можна вважати роботу зразків лінійною.

Картина тріщиноутворення усіх зразків з штучними нормальними тріщинами мала подібний характер. З вершини штучної тріщини з'являлася похила тріщина, яка розповсюджувалась до верхньої полиці балки. В подальшому картина декілька етапів навантаження залишалася незмінною. При подальшому навантаженні в верхній полиці балки з'являлася просторова тріщина. При цьому деформації суттєво збільшувалися. Після чого наставав момент руйнування балки. На рис. 6 та 7 показано загальний вигляд тріщин і руйнування зразків.



Рис. 6. Похила тріщина від вершини штучної нормальної тріщини у балці



Рис. 7. Загальний вигляд просторової тріщини руйнування верхньої полиці

Аналізуючи експериментальні дані можна констатувати, що наявність поздовжньої арматури впливає на міцність і жорсткість балок з нормальними тріщинами. Достатньо 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 елемента. При відсутності поздовжньої арматури верхня полка може руйнуватися при навантаженнях, набагато менших, ніж руйнуюче навантаження балок з поздовжньою арматурою.

Балки без штучних тріщин були випробувані для порівняння з балками з штучними нормальними тріщинами. На відміну від балок з штучними нормальними тріщинами в цих балках спочатку з'являлися похилі тріщини в ребрах (рис. 8). Потім ці тріщини розповсюджувалися в нижню полицю і верхню полицю. У верхній полиці з'являлася просторова тріщина. При цьому деформації різко зростали. Після цього балки руйнувалися в результаті втрати несучої здатності верхньої полиці (рис. 9). Руйнівні моменти балок без тріщин були більшими ніж руйнівні моменти балок з тріщинами.



Рис. 8. Похила тріщина у ребрі (балки без нормальних тріщин).

Експериментальні дослідження показали суттєву роль поздовжньої арматури у сприйнятті зовнішнього крутного моменту як при деформуванні, так і при руйнуванні. З давнього часу вважалося, що поздовжня арматура практично не впливає на несучу здатність і деформативність при крученні залізобетонних елементів. Це пов'язано з фактом, що експериментальні дослідження проводилися при крученні без наявності нормальних тріщин. Експериментальні дослідження автора, які в тому числі підтвердили теоретичні дослідження автора, показали, що для елементів з нормальними тріщинами цей вплив є суттєвим і повинен бути врахованим.



Рис. 9. Загальний вигляд руйнування (балки без нормальних тріщин).

У четвертому розділі розглянуто методику розрахунку жорсткості і несучої здатності залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами, зроблено порівняння експериментальних даних з теоретичними.

Розроблено методику визначення нагельних сил в поздовжній арматурі. Крученню елемента з нормальною тріщиною чинить опір зона бетону без тріщин та нагельна сила в поздовжній арматурі (рис. 10).

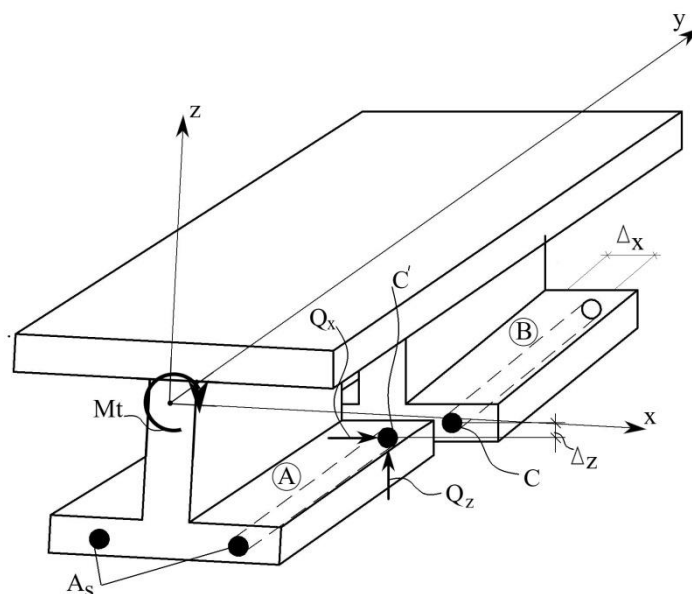


Рис. 10. Схема переміщень в перерізі з нормальною тріщиною і зусиль в поздовжній арматурі елемента, на який діє крутний момент

В результаті дії крутного моменту блок А повертається більше блоку В і в місці розташування нормальної тріщини з'являється зсув блоку А відносно блоку В. Це зсув Δ_x по осі x і зсув Δ_z по осі z . На відміну від існуючих робіт, де

враховувався тільки зсув по осі x , тут враховано зсув блоків і по осі x , і по осі z . При малій ширині перетину (або ребра для таврового перетину) переміщення по осі x є домінуючим. Однак, в загальному випадку, особливо при більшій ширині перерізу, впливом переміщення по осі Z нехтувати не слід. Крім того, при наявності двох і більше стрижнів поздовжньої арматури так само важливим є врахування обох складових переміщень.

Очевидно, що умовою спільності деформацій буде умова рівності нулю взаємного зміщення в точках розтину поздовжньої арматури зі сторони блоку А (див. рис. 10) і блоку В. Схема дії нагельних сил наведена на рис. 11.

Ця умова аналогічна умові відсутності переміщень в місті зайвої опори при розрахунку статично не визначених систем методом сил. З огляду на симетрію на рис. 11, для визначення величин невідомих нагельних сил Q_x і Q_z в арматурі виведена система рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} Q_x^2 A + Q_x B + Q_z C &= \Delta_x^{Mt} \\ Q_z^2 F + Q_z D + Q_x G &= \Delta_z^{Mt} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

де позначено:

$$A = \frac{500}{d^3 E_c^2}; \quad B = \frac{1}{d \cdot E_c} + \delta_{xx}; \quad C = \delta_{xz}; \quad F = \frac{2000}{d^3 E_c^2}; \quad D = \frac{2}{d \cdot E_c} + \delta_{zz}; \quad G = \delta_{zx} \quad (7)$$

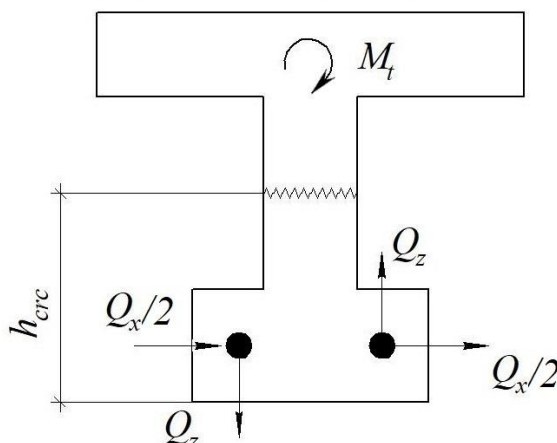


Рис. 11. Схема нагельних сил в поздовжній арматурі елемента двотаврового перерізу

В системі (6) прийняті позначення: δ_{xx} – взаємне зміщення берегів тріщини в напрямку дії сили Q_x від крутіння одиничними силами $Q_x=1$; δ_{xz} – взаємне зміщення берегів тріщини в напрямку дії сили Q_x від крутіння одиничними силами $Q_z=1$; δ_{zz} – взаємне зміщення берегів тріщини в напрямку дії сили Q_z від крутіння одиничними силами $Q_z=1$; δ_{zx} – взаємне зміщення берегів тріщини в напрямку дії сили Q_z від крутіння одиничними силами $Q_x=1$; Δ_x^{Mt} , Δ_z^{Mt} – взаємне зміщення берегів тріщини від крутіння зовнішнім моментом M_t в напрямку дії відповідно сили Q_x і Q_z ; Δ_{loc}^x , Δ_{loc}^z – переміщення від місцевої деформації в місці розташування арматури відповідно від сил Q_x і Q_z .

Величини δ_{xx} , δ_{zz} , δ_{zx} , δ_{xz} , Δ_x^{Mt} , Δ_z^{Mt} визначаються з рішення задачі взаємного зміщення берегів тріщини з розсіченою арматурою, яка вирішується різними

способами, описаними вище у другому розділі.

Слід зазначити, що величини δ_{xx} , δ_{zz} , δ_{zx} , δ_{xz} , Δ_x^{Mt} , Δ_z^{Mt} є величинами саме взаємного зміщення берегів тріщини на відміну від коефіцієнтів канонічних рівнянь методу сил, які виражають абсолютне переміщення певної точки, хоча природа їх однакова.

Величину Δ_{loc} краще визначати за емпіричними даними, наведеними в нормативних документах. Це пов'язано з фактом, що моделювання навіть за допомогою об'ємних скінчених елементів складно, тому що арматура в масиві бетону в реальних умовах стискає бетон під своєю поверхнею, а при комп'ютерному моделюванні скінчені елементи, розташовані з боку, протилежного напрямку нагельної сили, також чинять опір переміщенню. Величина Δ_{loc} визначається за емпіричною формулою, яка взята з відомих рекомендацій визначення переміщень в закладних деталях:

$$\Delta_{loc} = 1000 \frac{Q^2}{d^3 E_c^2} + \frac{Q}{d \cdot E_c} \quad (8)$$

де Q – сила, перпендикулярна вісі стрижня; d та E_c – відповідно діаметр стрижня та модуль пружності бетону.

Цей вираз враховано при виводі системи рівнянь (6) для визначення нагельних сил.

У роботі враховано, що величина нагельної сили залежить від відстані від поздовжньої арматури до грані елемента. Рішення виведеної системи квадратних рівнянь (6) дозволяє отримати величини нагельних сил в поздовжній арматурі, що є рішенням другої частини загальної задачі визначення жорсткості при крученні.

Після визначення нагельних сил жорсткість залізобетонного елемента з нормальною тріщиною визначається з виразу:

$$B_{crc} = \frac{\Delta_{bl}}{\Delta_{bl} + \Delta} B_t, \quad (9)$$

де Δ_{bl} – переміщення від крутіння грані цілого (без тріщин) блоку стрижня, відокремленого нормальною тріщиною. Воно визначається за відомими формулами опору матеріалів; B_t – крутильна жорсткість суцільного стержня без тріщин; Δ – повне переміщення в тріщині, яке дорівнює:

$$\Delta = 2 \cdot \Delta_{loc} \quad (10)$$

де Δ_{loc} визначається за (8), але тепер уже відома величина Q (вірніше її складові Q_x і Q_z). У формулі (10) величина Δ_{loc} множиться на 2, тому що переміщення в тріщині складаються з двох сторін нормальної тріщини.

Для оцінки достовірності розробленої методики в розділі зроблено порівняння результатів розрахунку переміщень в нормальній тріщині за розробленою методикою з даними експериментальних досліджень.

На рис. 12-15 наведені графіки «крутний момент-кут закручування» для деяких експериментальних балок.

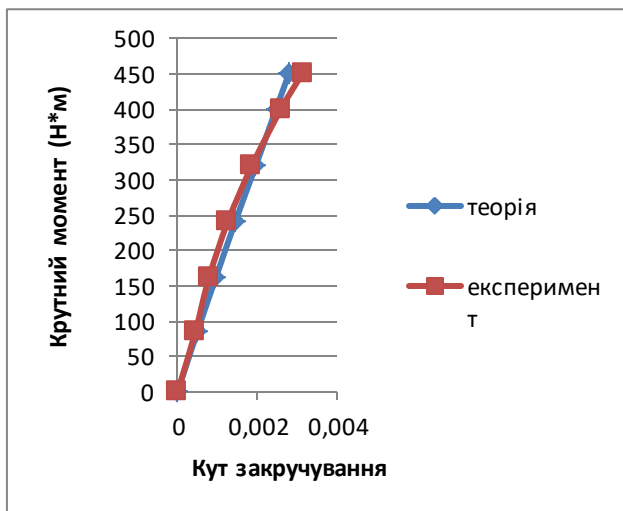


Рис. 12. Кути закручування для балки
bf=300; hf=30; ds=8

коефіцієнт варіації kv=10.91%

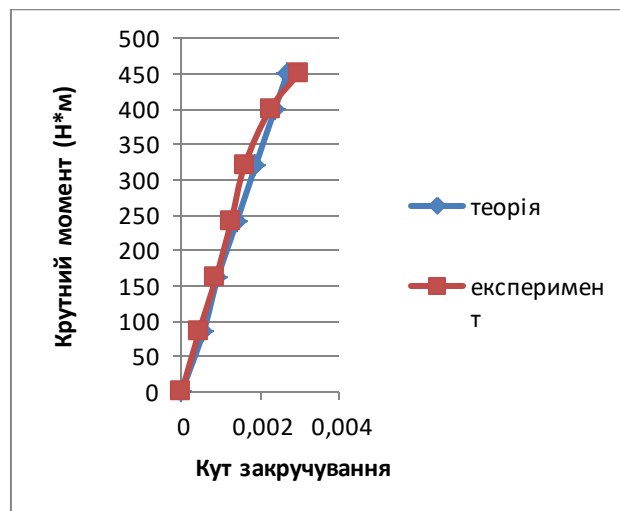


Рис. 13. Кути закручування для балки
bf=300; hf=30; ds=10

коефіцієнт варіації kv=10.54%

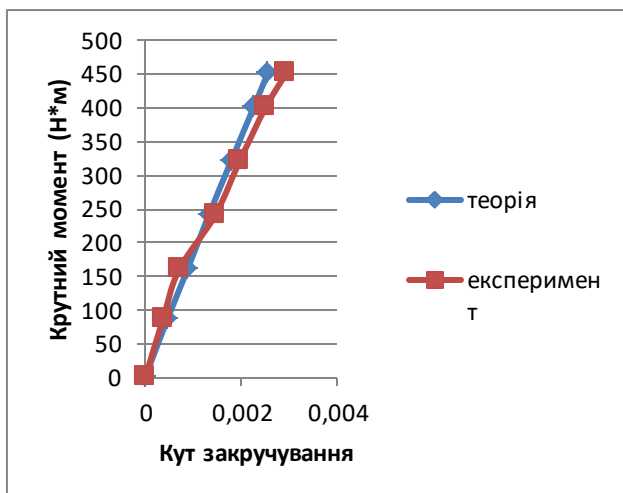


Рис. 14. Кути закручування для балки
bf=300; hf=30; ds=12

коефіцієнт варіації kv=14.79%

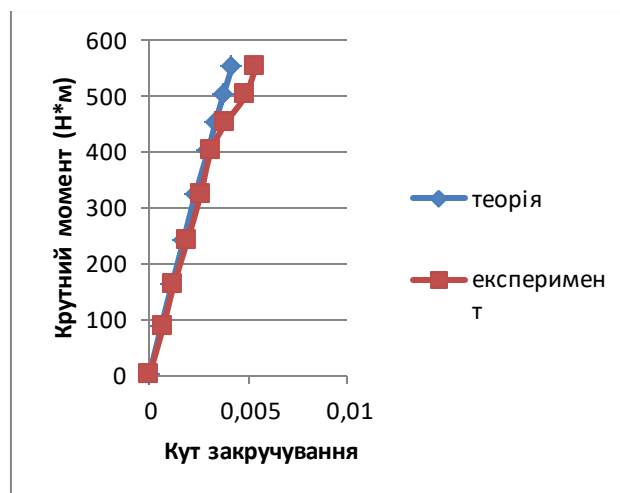


Рис. 15. Кути закручування для балки
bf=200; hf=30; ds=8

коефіцієнт варіації kv=7.35%

З рисунків 12-15 можна бачити, що теоретичні дані задовільно збігаються з експериментальними. Більша різниця між експериментальними та теоретичними даними лише на останніх етапах навантаження перед руйнуванням. Зважаючи на те, що при проектуванні деформативність елементів проектувальника цікавить на етапах дії нормативного навантаження, збіг експериментальних і теоретичних даних при нормативних навантаженнях набагато більший. Так, по зразках на рис. 12 та 13 якщо тільки одне останнє значення прибрати, то коефіцієнт варіації зменшиться відповідно до 8.5 та 6.5 відсотків.

Таким чином, порівняння експериментальних та теоретичних даних говорить про задовільну збіжність результатів, що дає змогу рекомендувати розроблену методику у практику проектування.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена важлива науково-технічна задача розроблення методики розрахунку жорсткості та несучої здатності при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами з врахуванням нагельної сили в поздовжній арматурі, її кількості і розташування. Результати досліджень дозволили зробити наступні висновки.

1. Розрахунок жорсткості та міцності при крученні залізобетонних елементів з нормальними тріщинами включає в себе три етапи: визначення взаємного зміщення берегів нормальної тріщини з умовно розсіченою поздовжньою арматурою; визначення нагельних сил в поздовжній арматурі та долі крутного моменту, що сприймає зона без тріщин; визначення жорсткості та несучої здатності перерізу. В дисертації розроблена чисельно-аналітична методика визначення взаємного зміщення берегів нормальної тріщини. Методика відрізняється своєю простотою, є достатньо точною для практичних розрахунків.

Розроблено також інженерну методику визначення взаємного переміщення берегів нормальної тріщини в елементах двотаврового перерізу. Запропоновано застосувати еквівалентну крутильну і згинальну жорсткість з умовно постійною еквівалентною жорсткістю.

Показано, що використання запропонованих методик дозволяє уникнути громіздкого і трудомісткого використання об'ємних скінчених елементів. Порівняння результатів, отриманих за розробленими методиками, з даними розрахунку за МСЕ з застосуванням об'ємних скінчених елементів, показало їх достовірність, що дозволяє використовувати запропоновані методики для визначення переміщень при крученні.

2. На основі експериментальних досліджень встановлено, що діаграма "крутний момент - кут закручування" залізобетонних елементів двотаврового перерізу з штучними нормальними тріщинами до високих рівнів навантаження має лінійний характер. Пластичні деформації мають місце на останніх етапах завантаження, перед руйнуванням, що дозволило для методики розрахунку деформативності в експлуатаційній стадії використовувати лінійні залежності. Встановлено, що основним типом руйнування є руйнування верхньої полиці двотаврового елемента з розвитком просторової тріщини кручення, яка бере початок від вершини нормальної тріщини. Встановлено, що армування елементів з нормальними тріщинами тільки поздовжньою арматурою суттєво впливає на їх жорсткість. Достатньо велику частину зовнішнього крутного моменту сприймають нагельні сили в поздовжній арматурі. Збільшення діаметра поздовжньої арматури, а також жорсткості і міцності верхньої полиці призводить до зменшення деформацій і відповідно збільшення жорсткості балок при крученні.

3. Розроблена методика визначення нагельних сил в поздовжній арматурі при крученні елемента двотаврового перерізу з нормальними тріщинами. На відміну від існуючих методик розроблена методика враховує дві складові нагельних сил, наявність двох і більше стрижнів поздовжньої арматури в перерізі, розташування поздовжньої арматури близько до грані елемента, скорегована методика визначення переміщень від зминання бетону під арматурою. Розроб-

лена методика визначення жорсткості та міцності при крученні в місті розташування нормальної тріщини залізобетонного елемента двотаврового перерізу. Розроблена інженерна методика визначення інтегральної жорсткості при крученні залізобетонних стрижневих елементів двотаврового перерізу.

4. Розроблені комп'ютерні програми за всіма розробленими методиками (визначення взаємного зміщення берегів тріщини, визначення нагельних сил, визначення переміщення в тріщині з арматурою, визначення жорсткості та міцності поперечного перерізу). Розроблені програми є дуже простими, їх застосування дозволяє визначати необхідні параметри напружено-деформованого стану без застосування складних моделей з використанням об'ємних скінчених елементів та складних програмних комплексів.

5. Проведено порівняння теоретичних значень кутів закручування та несучої здатності, отриманих за розробленими методиками, з експериментальними даними, яке показало їх задовільний збіг, що дає можливість використання розроблених методик та розроблених програм у практику проектування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. Orlova O. The experimental researches of reinforced concrete i-beam elements with normal cracks when turning// Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2 (53) 2019,171-176.
2. Азізов Т.Н., Орлова О.М. Інженерний спосіб визначення жорсткості при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами // "Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві", № 13, 2020 – С.3-15. *(Особистий внесок здобувача: складання системи рівнянь для визначення невідомих складових нагельних сил, складання алгоритму розрахунку, проведення розрахунків за розробленою методикою).*
3. Azizov T.N., Orlova O.M. Twisting rigidity of reinforced concrete elements of i-beam section with inclined cracks// Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, № 80,2020 – С.27-33. *(Особистий внесок здобувача: аналіз досліджень, створення розрахункової схеми, проведення розрахунків за розробленою методикою).*
4. Азізов Т.Н., Орлова О.М. Визначення взаємного переміщення берегів нормальної тріщини при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2020. Том 31(70) № 2. – С.189-197. *(Особистий внесок здобувача: аналіз досліджень, вирішення системи диференціальних рівнянь за допомогою рядів Фур'є, отримання графіків на основі запропонованої методики).*
5. Азізов Т.Н., Орлова О.М. Жорсткість і міцність при крученні залізобетонних двотаврових елементів з нормальними тріщинами при крученні//

Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2020. Том 31 (70) № 3. – С.124-129. *(Особистий внесок здобувача: виведення системи рівнянь для визначення складових нагельної сили, рішення системі квадратних рівнянь, виконання розрахунків, аналіз результатів).*

6. Орлова О.М. Експериментальні дослідження залізобетонних елементів із нормальними тріщинами при крученні / О.М. Орлова // Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. – 2020. Том 31(70) № 4. – С.255-259. *(Особистий внесок здобувача: підготовка і проведення експерименту, аналіз результатів експерименту, висновки).*
7. Азизов Т.Н., Орлова О.М. Определение перемещений при кручении двутаврового элемента с нормальными трещинами инженерным методом / Азизов Т.Н., Орлова О.М. // Нові технології в будівництві. – 2020 №38. – С. 16-22.

Статті у міжнародних виданнях та збірниках наукових праць, що включені до міжнародних науково-метричних баз:

8. Azizov T., Melnyk O., Orlova O., Kalenchuk-Porkhanova A., Vakal L. Calculation of reinforced concrete ceilings with normal cracks accounting the Chebyshev approximation // 6 th International Scientific Conference “Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings”. Transbud-2017. – Kharkiv, April 19-21, 2017 - S. 1-7. **(Scopus)** *(Особистий внесок здобувача: аналіз досліджень, пропозиції про апроксимацію переміщень в нормальній тріщині для двотаврових елементів).*

9. Taliat Azizov, Olga Orlova, Olena Nahaichuk «Calculation of turning rigidity of I-section reinforced concrete elements with normal cracks »,опублікованої в IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Transbud -2019, Volume 708, Issue 1, 19 December 2019, Article number 0120419.**(Scopus)** *(Особистий внесок здобувача: постановка задачі, обґрунтування розрахунку двотаврових елементів за допомогою стрижневої апроксимації).*

Статті у науковому періодичному виданні іншої держави:

10. Azizov T.N., Melnyk A.S., Vakal L.P., Kalenchuk-Porkhanova A.A., Orlova O.M. According to the calculation of reinforced concrete ceilings taking into account the change in torsional stiffness of prefabricated plates against the formation of normal cracks // Theoretical & Applied Science. – 2017. N 05 (49). S. 180-189. *(Особистий внесок здобувача: аналіз досліджень, постановка задачі і пропозиції про апроксимацію переміщень у нормальній тріщині двотаврових елементів).*

11. Азизов Т.Н., Орлова О.М., Нагайчук Е.В. Крутильная жесткость железобетонных двутавровых балок с многорядным армированием при наличии нормальных трещин// Sciences of Europe. - 2019. – Vol. 1, № 36. P. 35-39. *(Особис-*

тий внесок здобувача: виведення системи рівнянь для визначення нагельних сил в поздовжній арматурі, розрахунки за розробленою методикою).

Інші наукові праці:

12. Мельник О. С. Теоретичні та експериментальні дослідження просторової роботи та крутильної жорсткості залізобетонних елементів перекриттів та мостів / О. С. Мельник, О.М. Орлова // Молодий вчений. - 2018. - №11. С. 460-463. *(Особистий внесок здобувача: аналіз впливу крутильної жорсткості елементів на просторову роботу залізобетонних перекриттів).*

АНОТАЦІЯ

Орлова О.М. Жорсткість залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами при крученні – рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», Київ, 2021.

У дисертації розроблені методики розрахунку жорсткості та несучої здатності при крученні залізобетонних елементів двотаврового перерізу з нормальними тріщинами.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна задача визначення жорсткості та міцності при крученні залізобетонних елементів двотаврового поперечного перерізу з нормальними тріщинами з урахуванням нагельної сили в поздовжній арматурі, її кількості і розташування в перерізі. Показано, що задача визначення крутильної жорсткості елементів з нормальними тріщинами включає в себе три етапи: розсічення поздовжньої арматури і визначення взаємного зсуву берегів нормальної тріщини; визначення нагельних сил в поздовжній арматурі; обчислення жорсткості при крученні в місці розташування тріщини і елемента в цілому. Показано, що перше завдання є найбільш складним. Це завдання визначення взаємного переміщення берегів нормальної тріщини вирішене різними способами, в тому числі інженерним, що дозволяє без застосування ЕОМ розраховувати конструкції. Проведено експериментальні дослідження на зразках залізобетонних балок. Результати експериментальних досліджень порівняні з теоретичними пропозиціями. Показано їх гарний збіг. Розроблено програми для ЕОМ, в яких реалізовані всі запропоновані методики визначення взаємного зсуву берегів нормальної тріщини, нагельної сили і жорсткості при крученні елементів з нормальними тріщинами.

Ключові слова: крутильна жорсткість, нормальна тріщина, нагельна сила, двотавровий переріз, міцність при крученні.

АННОТАЦИЯ

Орлова О.М. Жесткость железобетонных элементов двутаврового сечения с нормальными трещинами при кручении – рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 - строительные конструкции, здания и сооружения. –

Государственное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт строительных конструкций», Киев, 2021.

В диссертации разработаны методики расчета жесткости и несущей способности при кручении железобетонных элементов двутаврового сечения с нормальными трещинами.

На основе теоретических и экспериментальных исследований решена важная научно-техническая задача определения жесткости и прочности при кручении железобетонных элементов двутаврового поперечного сечения с нормальными трещинами с учетом нагельной силы в продольной арматуре, ее количества и расположения в сечении. Показано, что задача определения крутильной жесткости элементов с нормальными трещинами включает в себя три этапа: рассечение продольной арматуры и определение взаимного смещения берегов нормальной трещины; определение нагельных сил в продольной арматуре; вычисление крутильной жесткости в месте расположения трещины и элемента в целом. Показано, что первая задача является наиболее сложной. Эта задача определения взаимного перемещения берегов нормальной трещины решена различными способами, в том числе инженерным, позволяющим без применения ЭВМ рассчитывать конструкции. Проведены экспериментальные исследования на образцах железобетонных балок. Результаты экспериментальных исследований сравнены с теоретическими предложениями. Показано их хорошее совпадение. Разработаны программы для ЭВМ, в которых реализованы все предложенные методики определения взаимного смещения берегов нормальной трещины, нагельной силы и крутильной жесткости элементов с нормальными трещинами.

Ключевые слова: крутильная жесткость, нормальная трещина, нагельная сила, двутавровое сечение, прочность при кручении.

ABSTRACT

Orlova O.M. The rigidity of reinforced concrete I-beam elements with normal cracks at torsion - manuscript.

Dissertation for the Degree of candidate of Technical sciences in specialty 05.23.01 - Building constructions, buildings and structures. - State Enterprise "State Research Institute of Building Constructions", Kyiv, 2021.

In the dissertation, methods for calculating the rigidity and bearing capacity during torsion of reinforced concrete I-beam elements with normal cracks were developed.

On the basis of theoretical and experimental researches, an important scientific and technical problem of determining the rigidity and torsional strength of reinforced concrete I-beam cross-sectional elements with normal cracks was solved taking into account the pin force in the longitudinal reinforcement, its number and location in the section. It is shown that the problem of determining the torsional stiffness of elements with normal cracks includes three stages: dissection of longitudinal reinforcement and determination of the mutual displacement of the sides of a normal crack; the determination of pin forces in longitudinal reinforcement; the calculation of torsional stiffness at the location of the crack and the element as a whole. It is shown that the

first task is the most difficult. The problem of determining the mutual displacement of the faces of a normal crack is solved by various methods, including engineering, which allows the design of structures without the use of a computer. The results of determining the mutual displacement of the faces of a normal crack using the developed numerical and analytical and engineering techniques are compared with calculations in software systems using volumetric finite elements. These results are shown to be in good agreement. At the same time, the use of the developed techniques makes it possible to abandon the use of cumbersome calculations with modeling by volumetric finite elements in real design, which greatly simplifies the design and saves labor costs.

It is shown that the torque in an element with normal cracks is perceived due to the concrete zone without cracks and pin forces in the longitudinal reinforcement. A method for determining the pin forces in longitudinal reinforcement has been developed. In this case, the vertical and horizontal components of the pin forces, the location of the longitudinal reinforcement within the section, the number of longitudinal reinforcement rods are taken into account. The developed method for determining the thrust forces in longitudinal reinforcement does not require the use of computer technology.

Experimental studies of rigidity and bearing capacity in torsion have been carried out on samples of reinforced concrete beams with normal cracks. The results of experimental studies are compared with theoretical proposals. They are shown to be in good agreement. Computer programs have been developed, in which all the proposed methods for determining the mutual displacement of the faces of a normal crack, the pin force and the torsional stiffness of elements with normal cracks are implemented.

Key words: torsional rigidity, normal crack, pin force, I-beam, torsional strength.