

УДК 624.01

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОБОТИ ТА КРУТИЛЬНОЇ ЖОРСТКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ПЕРЕКРИТТІВ ТА МОСТІВ

Мельник О.С., Орлова О.М.

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

В статті розкрито особливості тріщиноутворення в залізобетонних конструкціях та виникаючі в них крутні моменти. Показано, що крутильним жорсткостям та міцностям в науковій літературі приділено мало уваги. Зроблено огляд різних інженерних методик визначення міцності та жорсткості залізобетонних елементів з нормальними тріщинами за дії крутного моменту. Існуючі дослідження кручення присвячені, як правило, вивченню міцності при крученні. Теорія деформації залізобетону з тріщинами припускає наявність просторових спіральних тріщин і неприйнятна для елементів з нормальними тріщинами (у частині визначення їх крутильної жорсткості), хоча експериментально доведено, що утворення нормальних тріщин призводить до зміни крутильних жорсткостей.

Ключові слова: залізобетонні конструкції, крутильна жорсткість, крутильна міцність, кручення, тріщиноутворення.

Постановка проблеми. Залізобетонні конструкції відрізняються особливістю тріщиноутворення, яке в свою чергу впливає на напружено-деформований стан складових елементів конструкцій. Утворення і розкриття різ-

них тріщин призводить до перерозподілу зусиль в статично невизначних конструкціях.

Кручення в звичайних і попередньо-напружених залізобетонних конструкціях виникає, переважно, як ефект силової дії на споруди.

Експериментальних робіт на міцність при крученні також мало в порівнянні з великою кількістю досліджень міцності залізобетону при згині, стисненні, поперечному зрізу.

Для більш досконалого вивчення цього питання необхідні подальші експериментальні та теоретичні дослідження. Однак, попередньо вивчені дані інженерів-будівельників вказують на включення розрахунку на кручення в процес проектування. Руйнування залізобетонних конструкцій в результаті сколювання, кручення, не менш рідкісні, ніж подібні руйнування, що виникають від поперечного зрізу.

У залізобетонних конструкціях кручення виникає через ексцентриситет прикладених зовнішніх навантажень у балках. Так, наприклад, балки перекриття, монолітно зв'язані з бортовими балками, викликають в останніх кручення, яке може бути основною силовою дією на бортову балку у разі монтажу її в стіну. Позацентрове навантаження від стін також викликає кручення в бортових балках за умови їх закріплення по кінцях, що перешкоджає закручуванню балок. При будь-якому несиметричному навантаженні ребристого перекриття або мостової споруди виникає крутний момент в окремих елементах.

Існує цілий ряд конструкцій, в яких неврахування крутильних моментів при розрахунках може призвести до конструктивних поломок і навіть до аварій, а також до неправильного представлення картини розподілення зусиль в системі. Дослідженнями, проведеними в США та Канаді Асоціацією портландцементу, виявлено цілий ряд аварій через неврахування саме кручення [1, с. 3].

Кручення являє собою досить складний напружений стан. В сучасному будівництві існує більше десятка методик розрахунку міцності залізобетонних елементів за дії кручення. Визначенню жорсткості залізобетонних елементів при крученні присвячена мала кількість наукових робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В різний час експериментальні та теоретичні розрахунки з визначення напружено-деформованого стану монолітних та збірних залізобетонних перекриттів, а також вплив їх просторової роботи на напружено-деформований стан окремих їх елементів були висвітлені в працях Азізова Т.Н., Айвазова Р.Л., Алексеева О.В., Арзуманяна К.М., Байкова В.М., Бедова А.І., Буракса А.І., Верещани О.І., Горнова В.Н., Дмитрієва С.А., Карнет Ю.Н., Крамаря В.Г., Куня В.Л., Левіна С.Е., Орловського Ю.І., Савченко О.С., Семченкова О.С., Шагіна О.Л. [1, с. 4; 3, с. 43; 6, с. 327].

У вище вказаних роботах зазначено, що при розрахунку конструкцій з урахуванням просторової роботи істотну роль в перерозподілі зусиль між окремими елементами відіграє не лише їх жорсткість при згині, але і крутильна, а також співвідношення між крутильною та згинальною жорсткостями.

Для оцінки крутильної жорсткості ребристих плит [4, с. 89] були випробувані дві збірні залізобетонні плити серії 1.442.1-1 з метою встановлення впливу на роботу плит різних з'єднань з опорними конструкціями.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. При експериментальних дослідженнях О.С. Семченкова [2, с. 159] було вста-

новлено, що жорсткість і міцність завантаженої плити, в складі збірного диску перекриття, значно вища, ніж жорсткість та міцність плити, дослідженої по балковій схемі. Внаслідок різниці вертикальних деформацій вертикальних несучих конструкцій виникає кручення в плитах перекриття.

Кут повороту ϕ стін у вертикальній площині визначається за формулою:

$$\phi = \frac{M_t \cdot l}{D_t} \quad (1)$$

де M_t – крутний момент в диску перекриття;
 D_t – жорсткість диску перекриття при крученні;
 l – довжина диску перекриття.

Внаслідок просторової роботи диску перекриття дія додаткових зусиль призводить до появи повздовжніх тріщин. Природа тріщиноутворення різноманітна.

Метою статті є огляд теоретичних та експериментальних досліджень зміни крутильних жорсткостей при тріщиноутворенні на перерозподіл зусиль в просторовій роботі плитно-ребристих систем.

Виклад основного матеріалу. Роботи А.Я. Барашкова, В.М. Бондаренка, М.І. Карпенка, А.Л. Козака, О.Ф. Яременка [1, с. 5; 10, с. 25] дозволили розраховувати залізобетонні перекриття з урахуванням тріщиноутворення і тривалих процесів.

В конструкціях зі слабким поперечним армуванням поява такого роду тріщин призводить до передчасного руйнування – зрізу вздовж прольоту. В плитно-ребристих системах (мостові конструкції, ребристі монолітні та збірні перекриття) на згинальну та крутильну жорсткості впливають різного роду тріщини [7, с. 101]. Неврахування при розрахунках співвідношення жорсткостей плит, а також додаткового навантаження призводить до появи тріщин.

Теоретичні та експериментальні дослідження були проведені В.Г. Квашою, І.Г. Іваніком, С.М. Стечишиним, І.А. Трифоновим, Б.Е. Уліцьким [9, с. 125]. Дослідження показали зміну перерозподілу зусиль між мостовими балками при тріщиноутворенні в полицях та ребрах таврових балок, з яких складається мостова конструкція. В цих працях наведені різні методики розрахунку залізобетонних елементів у складі перекриттів та прогінних конструкцій мостів, урахуваючи їх просторову роботу.

Б.В. Карабанов, на основі експериментальних досліджень В.Н. Горнова, зробив висновок, що крутильна жорсткість залізобетонних елементів зменшується швидше за згинальну при тріщиноутворенні.

У [4, с. 90] було розглянуто методику розрахунку умовної ребристої системи прольотом 5 м, що складається з 5 ребер 250X250 мм при навантаженні середнього ребра рівномірно розподіленим навантаженням $q=10\text{кН/м}$. Товщина полиць, що з'єднують ребра – 50 мм. В результаті досліджень було виявлено, що при зміні крутильної жорсткості тільки одного ребра в 4 рази (це цілком можливо в реальних залізобетонних балках) згинальні моменти можуть змінюватися в декілька разів, що суттєво впливає на напружено-деформований стан дослідної балки.

Однополічні ригелі каркасно-панельних будівель крім згинальних моментів у вертикальній та горизонтальній площинах піддаються також крутним моментам. Встановлено [64], що деформативність опорної частини ригелів при крученні, приблизно, в 10 разів перевищує деформативність поперечних перерізів однополічного ригеля в прольоті, що також однозначно підтверджує важливість врахування крутильної жорсткості при розрахунку такого типу ригелів.

Значення ефективності крутних моментів, а отже врахування жорсткості на кручення, в двомірних плитах в складних конструктивних системах має велике практичне та теоретичне значення. В залізобетонних плитах на ранніх стадіях напруженого стану з'являються тріщини в розтягнутих від згину зонах. Значна кількість діагональних тріщин в кутових частинах плити підтверджує суттєву роль крутних моментів, що виникають в ній.

Окрім того, недостатньо вивченим є питання впливу поперечного перерізу несучих елементів перекриттів та мостових конструкцій на перерозподіл зусиль між ними за дії локальних навантажень.

З аналізу вищевказаних робіт можна зробити висновок, що на просторову роботу залізобетонних мостових конструкцій, перекриттів і покриттів суттєво впливають як згинальні, так і крутильні жорсткості. В деяких з них відмічається вплив нормальних тріщин на крутильні жорсткості.

Перші наукові роботи, присвячені дослідженню міцності залізобетонних стержнів при крученні, були проведені на початку ХХ століття в Німеччині, результати яких були опубліковані: в 1912 р. – Ц. Бахом і О. Графом, і 1922 р. – О. Графом і Е. Мершем і в 1923 р. – Е. Мершем [11, с. 52-54; 12, с. 65]. До теперішнього часу їхня схема розрахунку прийнята в нормах Єврокоду 2.

Запропонована Е. Мершем схема розподілу зусиль у бетоні і арматурі отримала загальне визнання, і до теперішнього часу це уточнюють і модернізують. Теорія Е. Мерша є одним з напрямів в дослідженні міцності залізобетону при крученні.

Подальші дослідження, проведені Т. Міамото, К. Юнгом та ін. підтвердили головні висновки, зроблені О. Графом і Е. Мершем [11, с. 52-54; 12, с. 65].

Нині існує кілька пропозицій щодо оцінки міцності залізобетонних стержнів при крученні. При цьому, одні дослідники базуються на власних розрахункових моделях, інші намагаються удосконалити вже існуючі.

Розвиток методів розрахунку залізобетону за наявності кручення не відрізняється за своєю суттю від історії розвитку теорії розрахунку залізобетону і пройшло ті ж фази: від розрахунку за нормативними напруженнями до розрахунку за граничними станами.

Схему розподілу зусиль при крученні, запропоновану Е. Мершем, Е. Рауш розповсюдив на інші форми перерізу. Передумовою розрахункової моделі Е. Мерша являється те, що після утворення тріщин, що проходять під кутом 45° до поздовжньої осі елемента, уся арматура піддана дії розтягу, а розташовані між тріщинами бетонні смуги – стиску. Зовнішній крутний момент замінюється двома парами поперечних сил, що діють в площинах поперечного перерізу (рис. 1). Розтягуючі зусилля повністю сприймаються арматурою.

Розрахункова схема, прийнята в даному методі, відповідає дійсній роботі бетону на стиск і арматури на розтяг, але відсутність в розрахункових формулах такого важливого чинника, як міцність бетону, ставить під сумнів їх достовірність. Однак, ця схема не дозволяє визначити напружено-деформований стан залізобетонного елемента за наявності нормальних тріщин.

На основі численних дослідів П. Андерсен встановив, що формули Е. Рауша занижують несучу здатність елементів, і дійшов висновку, що арматура сприймає тільки частину головних напружень. П. Андерсен штучно з'єднав два абсолютно різних напружено-деформованих стани: стадію до утворення тріщин і стадію з тріщинами. Подібну спробу удосконалити метод Мерша-Рауша не можна визнати вдалою.

Г. Дж. Коуен, прирівнявши половину роботи зовнішнього моменту до енергії деформації арматури, визначив коефіцієнт теорії пружного кручення залізобетону λ в розрахунковій формулі теоретичним шляхом і встановив, що він залежить тільки від співвідношення сторін прямокутника h/b і може бути прийнятий для практичних розрахунків постійним і рівним 0,8. Окрім цього, Г. Дж. Коуен запропонував обчислювати величину крутного моменту, що сприймається бетонним перерізом, за формулами пластичного кручення. Такий підхід не узгоджується з результатами дослідів.

В 1940 р. М.С. Боришанським було проведено ряд експериментів з метою перевірки роботи елементів, армованих плоскими каркасами.

Починаючи з 1948 р., Н.Н. Лессіг під керівництвом професора О.О. Гвоздева провела експериментальні дослідження балок прямокутного профілю на кручення.

А.А. Цвяковим і Н.Н. Лессіг були запропоновані формули розрахунку міцності залізобетонних елементів прямокутного перерізу при крученні і згині з крученням, що базуються на методі граничної рівноваги. Дослідження, проведені Бурлаченко П.І., Лялиним І.М. та Чиненковим Ю.В., показали прийнятність методу А.А. Гвоздева – Н.Н. Лессіг до розрахунку міцності елементів прямокутного перерізу, що руйнуються з утворенням пластичного шарніру. П.І. Бурлаченко виділив ще крихке

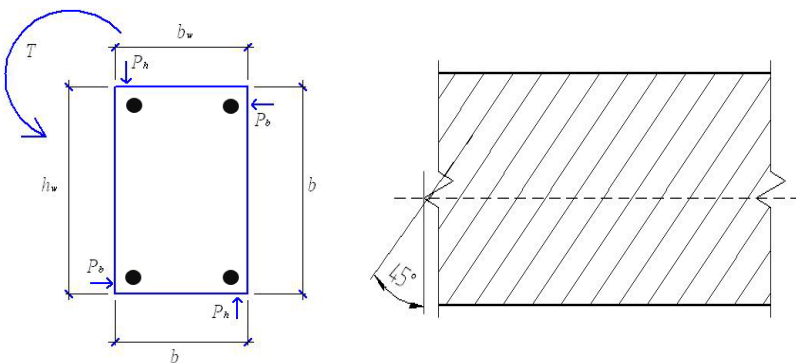


Рис. 1. Схеми зусиль при крученні, прийнята Е. Раушом

й руйнування від дії поперечної сили і кручення, а також руйнування, що характеризується роздавлуванням бетону на бічних гранях при напруженні у вертикальних стержнях арматури, менших від межі текучості.

Г.В. Мурашкін і Д.Х. Касаєв показали, що методика Н.Н. Лессіг може бути поширена на попередньо-напружені елементи. Дослідженню міцності попередньо-напружених залізобетонних елементів, підданих крученню і згину з крученням, були присвячені роботи А.В. Белубекяна, Х.М. Наджафова, Р.А. Складневої, Н.І. Тимофеева, А.І. Турова та ін [8, с. 70]. Дослідженнями, проведеними Л.К. Рулле, Т.П. Чистовою, Н.Н. Ячменевою, було показано можливість екстраполяції цієї теорії на елементи таврового перерізу [5, с. 159].

Д.Х. Касаєв у своїх дослідженнях виділяє момент тріщиноутворення T_{cr} за формулою:

$$T_{cr} = \left(0.88 + 0.08 \cdot \frac{h}{b}\right) \cdot R_{btm} \cdot W_{\tau,pl} \quad (2)$$

де h – висота прямокутного профілю; b – ширина прямокутного профілю;

R_{btm} – міцність бетону при розтягу;

$W_{\tau,pl}$ – пружньо-пластичний момент опору, який може бути обчислений за формулою:

$$W_{\tau,pl} = \frac{b \cdot h^2 \cdot \sqrt{2}}{3.43} \quad (3)$$

У методі, запропонованому О.С. Залесовим [1, с. 5], незважаючи на ряд прийнятих ним раціональних гіпотез, побудовані на цій основі рівняння деформації просторового перерізу не завжди знаходять експериментальні підтвердження, а прийняття подовжнього напруження у бетоні стислої зони, рівними R_b , має відповідне обґрунтування лише для окремих випадків складного напруженого стану цієї зони.

За кордоном отримав широке поширення метод графіків взаємодії, який використовується при складних навантаженнях. Суть його полягає у визначенні межі граничної області.

В 1928 році німецькими дослідниками під керівництвом Р. Залігера [12, с. 52] проводився ряд експериментальних досліджень по визначенню міцності при крученні для різних типів поперечних перерізів з бетону довжиною 1,95 м: квадратного, прямокутного і круглого. Бруски квадратного та прямокутного поперечного перерізу досліджувалися армовані та неармовані.

У всіх вище вказаних дослідженнях констатується, що наявність лише повздовжньої арматури практично не впливає на міцність при крученні. Але за наявності нормальних тріщин її вплив є суттєвим.

Для вивчення явища кручення в бетонних та залізобетонних елементах круглого (суцільного чи пустотілого) і прямокутного профілів було проведено багато експериментальних досліджень.

Із результатів даних досліджень, перш за все, впливає, що під дією крутного моменту в бетоні виникають головні розтягуючі напруження, які, в свою чергу викликають появу тріщин під кутом 45° до твірної циліндра чи призми, при чому послідовне розташування цих тріщин має характер спіралі (гвинтової лінії) з нахилом 45° .

В чисто бетонних зразках поява першої тріщини супроводжується миттєвим руйнуванням.

Ці ж дослідження показали, що подовжня арматура мало впливає на утворення перших тріщин, що сильно впливає на міцність перерізу. Опір крученню досяється при досягненні арматурою межі граничної текучості. Зовнішній шар бетону, що оточує арматуру при руйнуванні відвалюється і при розрахунку не враховується.

Для врахування нелінійних властивостей бетону найбільше поширення отримали нелінійні моделі, в яких властивості залізобетону з тріщинами апроксимуються властивостями деякого суцільного анізотропного тіла. Досконало розробляються методики, ґрунтовані на деформаційній теорії пластичності бетону і залізобетону Г.А. Генієва і теорії деформації залізобетону з тріщинами М.І. Карпенка [7, с. 102].

Практика показує, що поява тріщин в розтягнутій зоні неминуча. Проте, це ще не є ознакою небезпечного стану конструкції, оскільки розкриття тріщин, зазвичай, обмежене допустимою величиною, що не викликає зниження міцності і довговічності, а також порушення нормальної експлуатації.

У теорії залізобетону поширена модель, ґрунтована на понятті розрахункового перерізу. Як правило, розглядається стан перерізу до і після утворення тріщини. При цьому, широко використовується емпіричний і напівемпіричний підходи при вирішенні розрахункових завдань в залізобетоні.

Ефективною для розрахунку залізобетонних конструкцій, що працюють в умовах складного напруженого стану, являється методика С.Ф. Клованича, у якій використовуються просторові скінчені елементи.

Всі зазначені роботи стосуються дослідженню елементів за наявності просторових тріщин кручення. Вперше про вплив нормальних тріщин на жорсткість та міцність при крученні було вказано Азізовим Т.Н. [1, с. 6]. Показано, що нормальні тріщини суттєво знижують міцність та жорсткість елементів при крученні.

Для розрахунку жорсткості залізобетонних елементів з нормальними тріщинами при крученні визначалась величина нагельної сили (опір, який спричиняє арматура взаємному повороту двох суміжних блоків, відділених нормальною тріщиною) за методикою Азізова Т.Н. [1, с. 6]:

$$Q = \frac{\Delta M_t}{\Delta Q_{od} + 2 \cdot \Delta_{sm,s}} \quad (4)$$

де ΔM_t – переміщення точки від дії крутного моменту;

ΔQ_{od} – переміщення від дії одиничної нагельної сили.

Складова $\Delta_{sm,s}$ від зминання одиничною нагельною силою визначатиметься за формулою:

$$\Delta_{sm,s} = \phi_{cc} \left(1000 \cdot \frac{\bar{Q}^2}{d^3 \cdot E^2} + \frac{Q}{d \cdot E} \right) \quad (5)$$

Формула (5) є емпіричною і взята з розрахунків складних деталей на зсув. Після визначення нагельної сили визначається повне переміщення в тріщині.

Про появу нормальних та нахилених тріщин в розтягнутій зоні залізобетонних просторових конструкцій мостів та перекриттів знають всі інженери-проектувальники та провідні науковці.

Проте, доцільність досліджень присвячених проблемі тріщиноутворення та розрахунку конструкцій з наявністю саме нормальних тріщин підлягає сумніву провідних будівельників України.

Висновки і пропозиції. Чисте кручення елементів залізобетонних конструкцій, практично, не зустрічається. Проте, кручення елементів, що згинаються, має місце в усіх випадках, коли поперечне

навантаження прикладається на деякій відстані від подовжньої осі елементу. В процесі експлуатації конструкцій від згину в ребрах утворюються нормальні до подовжньої осі елементу тріщини.

Огляд досліджень просторової роботи перекриттів показав, що на просторову роботу істотний вплив робить не лише жорсткість при згині, але і крутильна жорсткість їх елементів.

Список літератури:

1. Азизов Т.Н. Учет кручения полог при расчете ребристых перекрытий / Т.Н. Азизов // Будівельні конструкції : міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: НДІБК, 2003. – Вип. 58. – С. 3-7.
2. Баженов В.А. Методика чисельного моделювання нелінійного деформування та руйнування просторових залізобетонних конструкцій / В.А. Баженов, О.І. Гуляр, В.А. Рутковський // Будівельні конструкції : міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: НДІБК, 2003. – Вип. 59. – С. 157-162.
3. Байков В.Н. Эффект крутящих моментов и распоров в железобетонных плитах, опертых по контуру / В.Н. Байков, А.И. Бедов, А.К. Фролов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1992. – № 3. – С. 41-48.
4. Кваша В.Г. Експериментальні дослідження залізобетонних прольотних будов, розширених приставними елементами / В.Г. Кваша // Будівельні конструкції : міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: НДІБК. – 1999. – Вип. 50. – С. 87-94.
5. Кодыш Э.Н. Применение метода дискретных связей для расчета железобетонных конструкций многоэтажных зданий / Э.Н. Кодыш, А.Н. Мамин // Будівельні конструкції : міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: НДІБК, 2005. – Вип. 62. – С. 159-164.
6. Козак А.Л. Численное моделирование нелинейных процессов деформирования железобетонных конструкций с учетом трещинообразования : дис. ... докт. техн. наук : 05.23.17 "Строительная механика" / Козак А.Л. ; Киевский техн. ун-т строительства и архитектуры. – К., 1995. – 455 с.
7. Лантух-Лященко А.І. До питання дослідження ортотропних плит / А.І. Лантух-Лященко // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво : респ. міжв. науково-технічний зб. – К.: Будівельник, 1982. – Вип. 31. – С. 100-103.
8. Рауш Э. Расчет железобетона на кручение и срез / Э. Рауш. – М.: Гл. ред. строит. лит., 1936. – 86 с.
9. Улицкий Б.Е. Пространственные расчёты балочных мостов / Улицкий Б.Е. – М.: Автотрансиздат, 1962. – 180 с.
10. Яременко А.Ф. Механика материалов и конструкций / А.Ф. Яременко, П.Г. Балдук. – Одесса: Внешреклам-сервис, 2001. – 254 с.
11. Graf O. Verdrehungsversuche zur Klarung der Schubfestigkeit von Eiseubeton / O. Graf, E. Morsch // Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens. – 1922. – N 258. – P. 52.
12. Morsch E. Der Eisenbetonbau, sein Theorie und Anwerdung / E. Morsch. – 1923. – I Band. 2 Hälfte.

Мельник А.С., Орлова О.М.

Уманский государственный педагогический университет
имени Павла Тычины

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ РАБОТЫ И КРУТЯЩЕЙ ЖЕСТКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕКРЫТИЙ И МОСТОВ

Аннотация

В статье раскрыты особенности трещинообразования в железобетонных конструкциях и возникающие в них крутящие моменты. Показано, что крутящим жесткости и прочности в научной литературе уделено мало внимания. Сделан обзор различных инженерных методик определения прочности и жесткости железобетонных элементов с нормальными трещинами за действия крутящего момента. Существующие исследования кручение посвящены, как правило, изучению прочности при кручении. Теория деформации железобетона с трещинами предполагает наличие пространственных спиральных трещин и неприемлема для элементов с нормальными трещинами (в части определения их крутильной жесткости), хотя экспериментально доказано, что образование нормальных трещин приводит к изменению крутильных жесткостей.

Ключевые слова: железобетонные конструкции, крутильная жесткость, крутильная прочность, кручение, трещинообразования.

Melnyk O.S., Orlova O.M.

Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University

**THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES
OF SPACE-TERM WORK AND CURRENT STRENGTH
OF FERROUS-CONCRETE ELEMENTS OF COURSES AND BRIDGES**

Summary

The article reveals the features of cracking in reinforced concrete constructions and torque moments arising there. It has been shown that little attention is paid to the twisty stiffenings and strengths in the scientific literature. A review of various engineering methods for determining the strength and rigidity of reinforced concrete elements with normal cracks under the action of torque. Existing torsion studies are usually devoted to the study of torsional strength. The theory of deformation of reinforced concrete with cracks implies the presence of spatial spiral cracks and is unacceptable for elements with normal cracks (in part with the determination of their torsional rigidity), although it has been experimentally proved that the formation of normal cracks leads to a change in torsional stiffness.

Keywords: concrete structures, torsional stiffness, torsional strength, torsion, cracking.