

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І
АРХІТЕКТУРИ

ЖУРАВСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР ДМИТРОВИЧ



УДК 624.012.45

МІЦНІСТЬ, ТРИЩИНОСТІЙКІСТЬ ТА ДЕФОРМАЦІЇ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПЛИТ ПРИ СКЛАДНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Галузь знань – Архітектура та будівництво

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертація є рукопис.

Робота виконана на кафедрі залізобетонних та кам'яних конструкцій Київського національного університету будівництва і архітектури МОН України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
Бамбура Андрій Миколайович,
ДП «Державний науково-дослідний інститут
будівельних конструкцій» (м. Київ),
завідувач відділом надійності конструкцій будівель і споруд.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Бабич Євген Михайлович,
Національний університет водного господарства та природокористування МОН України (м. Рівне),
завідувач кафедри промислового, цивільного
будівництва та інженерних споруд;

доктор технічних наук, професор,
Бліхарський Зіновій Ярославович,
Національний університет «Львівська політехніка»
МОН України,
директор інституту будівництва та інженерних систем;

доктор технічних наук, професор,
Клименко Євген Володимирович,
Одеська державна академія будівництва та архітектури
МОН України,
завідувач кафедри залізобетонних конструкцій та
транспортних споруд.

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.04 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31, а. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури (03037, м. Київ, пр. Повітрофлотський, 31).

Автореферат розісланий «26» березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.056.04
доктор технічних наук, доцент



Михайловський Д.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Ефективність і економічність будівництва в значній мірі залежить від вдалого впровадження нових будівельних технологій і матеріалів, використання нової техніки та розвитку методів розрахунку та проектування. Сучасні матеріали і технології дозволяють розробляти нові конструктивні рішення будівель та споруд, зменшувати тривалість їх зведення, знижувати трудовитрати на будівельні роботи, а також подовжують тривалість їх експлуатації. В основному цього досягають за рахунок якісного підвищення міцнісних характеристик матеріалів.

Залізобетон, один із найрозповсюдженіших конструктивних матеріалів які використовуються у будівництві, але він має два основні недоліки – велику власну вагу і низьку тріщиностійкість.

Основними шляхами по зменшенню власної ваги і підвищенню тріщиностійкості залізобетонних конструкцій є: використання більш високоміцних бетонів та попереднє напруження в конструкціях. Особливо ефективно залізобетон працює при попередньому напруженні в двох напрямках.

Одним із способів підвищення міцнісних і жорсткісних властивостей бетону є введення до його складу різних композитних домішок. В цій якості все ширшого розповсюдження набувають сталеві волокна (фібри). Такий матеріал отримав назву – сталефібробетон.

Завдяки введенню у бетонну матрицю сталевих волокон змінюється її структура, так як з'являються внутрішні армуючі елементи, які дозволяють збільшити межу міцності на розтяг при згині – у 1,5...2,5 рази, а головне зменшити деформативність матеріалу в 10...20 разів у порівнянні з відповідними характеристиками бетонної матриці. Не менш суттєвим є покращення низки інших характеристик матеріалу таких як морозостійкість, водонепроникність, корозійна стійкість, термостійкість, стійкість до стирання та удару, тощо.

Вивчення сталефібробетону в якості замітника звичайного важкого бетону почалося достатньо недавно, але вже довело перспективність даного напрямку. Була вивчена ефективність армування бетонної матриці із різними видами сталевих фібр, визначені їх характеристики та оптимальні проценти армування бетонної матриці.

Треба зазначити, що дослідження сталефібробетону як конструктивного матеріалу не охоплюють попередньо-напружені конструкції, зокрема плитні. Сучасні проектні рішення використовують великі прольоти. Тому несучі елементи повинні армуватись попередньо-напруженою арматурою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації і отримані результати відповідають актуальному напрямку науково-технічної політики України відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 23.05.2011р. №547 «Про затвердження Порядку застосування будівельних норм, розроблених на основі національних технологічних традицій, та будівельних норм, гармонізованих з нормативними документами Європейського Союзу». Дослідження виконані в межах кафедральної науково-дослідної роботи «Удосконалення залізобетонних та кам'яних будівельних конструкцій». У даній темі автором була розроблена методика розрахунку сталефібробетонних плит з двохосно попередньо-напруженою арматурою з урахуванням дійсного напруженого стану.

Мета дослідження. Мета наукової роботи полягає у дослідженні, узагальненні і уточненні методу розрахунку несучої здатності, тріщиностійкості та прогинів двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит при поперечних навантаженнях на основі деформаційної моделі. Розробити методика розрахунку несучої здатності, тріщиностійкості та прогинів двохосно попередньо-напружених СФБ плит при поперечних навантаженнях. Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

- розробити методики розрахунку несучої здатності, тріщиностійкості та прогинів сталевібробетонних плит при спільній дії поперечних навантажень та бокового обтиску попередньо-напруженою арматурою;
- експериментально дослідити двохосно попередньо-напружених СФБ плит для визначення їх несучої здатності, тріщиностійкості та прогинів;
- на основі аналізу існуючих методик розробити удосконалену методика розрахунку деформації усадки і повзучості сталевібробетону при одноосному та двохосному стиску СФБ;
- розробити рекомендації щодо визначення критерія переходу швидкоплинних деформацій повзучості СФБ до тривалих деформацій повзучості при одноосному та двохосному стиску;
- експериментально дослідити деформації усадки і повзучості сталевібробетону при одноосному та двохосному стиску;
- розробити методики розрахунку втрат попереднього напруження в арматурі двохосно попередньо-напружених СФБ плит, викликаних усадкою та повзучістю СФБ;
- експериментально дослідити втрати попереднього напруження в арматурі двохосно попередньо-напружених СФБ плит, викликаних усадкою та повзучістю СФБ;
- розробити загальну методика розрахунку несучої здатності комбіновано армованих згинальних елементів при спільній дії поперечних навантажень та бокового обтиску попередньо-напруженою арматурою.

Об'єкт дослідження. Плитні конструкції, армовані сталлю фіброю та попередньо-напруженою арматурою, розташованою у двох напрямках.

Предмет дослідження. Напружено-деформований стан двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит при поперечних навантаженнях.

Методи дослідження являють собою сукупність методів бібліографічного пошуку, теоретично-аналітичних методів будівельної механіки та теорії залізобетону, аналізу даних отриманих при випробуваннях експериментальних зразків та чисельних дослідженнях з використанням сучасних обчислювальних програм.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- проведено аналіз та виявлено нові закономірності деформування, утворення тріщин та руйнування двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит при поперечному згині;
- отримані нові положення та методика розрахунку несучої здатності, тріщиностійкості та прогинів двохосно попередньо-напружених СФБ плит;

- виявлено закономірності протікання деформацій повзучості СФБ в умовах одноосного та двохосного стиску;
- отримані узагальнені аналітичні положення та методики розрахунку відносних деформацій повзучості СФБ в умовах одноосного та двохосного стиску;
- проведено аналіз та виявлено нові закономірності зміни напружень в двохосно попередньо-напружених плитах, викликаних деформаціями повзучості та усадки СФБ;
- розроблено методику розрахунку втрат попереднього напруження в арматурі двохосно напружених плит, викликаних усадкою та повзучістю СФБ;
- розроблено загальну методику розрахунку несучої здатності, тріщиностійкості та прогинів комбіновано армованих згинальних елементів при спільній дії поперечних навантажень та бокового обтиску попередньо-напруженою арматурою

Вдосконалено:

- залежності для визначення НДС для СФБ з попередньо-напруженою арматурою;
- визначення параметрів швидкоплинної та тривалої повзучості СФБ у нелінійній постановці;
- методику експериментальних досліджень деформацій повзучості та усадки СФБ;
- аналітичні залежності для визначення втрат напружень в умовах двохосного стиску.

Практичне значення результатів:

- розроблено інженерну методику урахування втрат попереднього напруження в арматурі двохосно попередньо-напружених СФБ плит, викликаних усадкою та повзучістю СФБ;
- запропоновано алгоритм визначення втрат попереднього напруження в арматурі від швидкоплинної деформації повзучості СФБ;
- розроблено методику розрахунку несучої здатності та тріщиностійкості збірних залізобетонних плит аеродромних та дорожніх покриттів.

Результати досліджень впроваджено:

- при проектуванні монолітно-каркасних будівель з перекриттями, які армовані попередньо-напруженою арматурою у двох напрямках, на об'єктах ТОВ «Єврокон Україна»;
- при розробці доповнень та удосконалень діючих нормативних документів в ДП ДНДІБК;
- в навчальному процесі при викладанні курсів: «Залізобетонні конструкції», «Дисципліна спеціальної підготовки випускаючої кафедри – залізобетонні конструкції», при підготовці освітніх рівнів бакалавра та магістра за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Достовірність результатів

Достовірність результатів досліджень щодо методики розрахунку несучої здатності, тріщиностійкості та прогинів сталевібробетонних плит з двохосно попередньо-напруженою арматурою, визначається доброю збіжністю теоретичних розрахунків з експериментальними даними.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 60 робіт. Основні результати досліджень викладені в 26-ти статтях у друкованих виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, у 7-ти наукових виданнях інших

держав та фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних.

Особистий внесок здобувача. Усі викладені у дисертаційній роботі ідеї, наукові розробки та положення отримані автором самостійно. В проведених спільно з іншими авторами наукових дослідженнях автор розробляв загальну програму і методологію досліджень, здійснював наукове керівництво та приймав безпосередню участь в експериментальних і теоретичних дослідженнях, аналізував та узагальнював отримані результати. В роботах, опублікованих у співавторстві, особистий вклад здобувача полягає у формулюванні задач наукових досліджень, в науковому обґрунтуванні та розробці методів та способів їх розв'язання, а також у керівництві роботами, пов'язаними з використанням на практиці результатів досліджень.

Дисертація не містить матеріалів кандидатської дисертаційної роботи автора.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на таких науково-практичних конференціях і наукових семінарах: ConChem International Exhibition & Conference. Dusseldorf, Germany, 1997; International Conference «Innovation in Concrete Structures: Design and Construction». Dundee, Scotland, UK, 1999; IV-й міжнародний симпозиум «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». Тернопіль, 2000; VI Міжнародна наукова конференція «Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля» Львів-Кошице-Жешув: Львів. НУ «Львівська політехніка», 2001; Міжнародна наукова конференція «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». Рівне, 2001 р.; V-й Міжнародний симпозиум «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». Луцьк, 2002 р.; Міжнародна наукова конференція «Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди». Рівне, 28-30 травня 2003 р.; V-а Всеукраїнська науково-технічна конференція «Будівництво в сейсмічних районах України». НДІБК, Ялта, 2004 р.; VI-й Міжнародний симпозиум «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій». Ужгород, 2005.; 7-ма науково-технічна конференція «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація». м. Кривий Ріг, 9-11 жовтня 2006 р.; XVII Міжнародна наукова конференція «Актуальні проблеми будівництва та інженерії довкілля» Львів-Кошице-Жешув: Львів. НУ «Львівська політехніка», 2013.; 75-та науково-практична конференція КНУБА. Київ, 16-17 квітня 2014 р.; Научно-практическая конференция «Эффективное строительство. Объекты, технологии, конструкции и материалы». Одесса, 25 февраля 2016 г.; Науково-практична конференція «Будівлі спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції». КНУБА, Київ, 2-3 червня 2016 р.; Міжнародна науково-технічна конференція «Ефективні технології і конструкції у будівництві та архітектура села». Львівський НАУ, Львів-Дубляни, 28 квітня 2018 р.; Науково-практична конференція «Будівлі спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції». КНУБА, Київ, 24-25 травня 2018 р.; XX Міжнародний науково-практичний форум «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій». Львівський НАУ, Львів-Дубляни, 17-19 вересня 2019 р.; Международная научная конференция «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации». Новополюк, Беларусь, 28-29 ноября 2019 г.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 60 робіт. Основні результати досліджень викладені в 30-ти статтях у друкованих виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, у 7-ми наукових виданнях інших держав та фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних, 6 статей у періодичних виданнях інших держав, 7 статей у виданнях, які додатково відображають матеріали дисертації.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 327 сторінок, у тому числі 133 рисунки, 46 таблиць, список використаних джерел із 298 найменувань на 33 сторінках, два додатки на 7 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проблеми, що вирішується в дисертаційній роботі, сформульовано мету та задачі досліджень. Зазначено наукову новизну та практичне значення і впровадження результатів дисертаційної роботи, вказані прийняті методи досліджень та особистий внесок здобувача, відомості про апробацію результатів роботи, публікації, структуру і обсяг дисертації.

В **першому розділі** розглянуто і проаналізовано ефективні залізобетонні плити, попередньо-напружені у двох напрямках. У сучасному будівництві такі плитні елементи все більше використовують в будівлях і спорудах, в дорожньому будівництві (покриття доріг, мости та шляхопроводи, тунелі) та ін.

Серед вчених, які займались дослідженню та розробці методів розрахунку плитних залізобетонних елементів, значний вклад зробили Азізов Т.Н., Бабич Є.М., Бамбура А.М., Барашиков А.Я., Барабаш В.М., Бліхарський З.Я., Борисюк О.П., Гнідець Б.Г., Дорофєєв В.С., Карпенко М.І., Карпенко С.М., Карпюк В.М., Кваша В.Г., Колчунов В.І., Клименко Є.В., Клименко Ф.Є., Кріпак В.Д., Лапенко О.І., Лісоцький Р.В., Масюк Г.Х., Немчинов Ю.І., Нижник О.В., Отрош Ю.А., Павліков А.М., Пашинський В.А., Ромашко В.М., Савицький М.В., Семенюк С.Д., Семко О.В., Стороженко Л.І., Храмцов В.П., Фомін С.Л., Шагін О.Л., Шмуклер В.С., Яковенко І.А., M. Huber, S. Timoshenko, S. Woinowsky - Krieger та ін.

Складний напружено-деформований стан залізобетонних конструкцій досліджували Бамбура А.М., Барашиков А.Я., Давиденко О.І., Демчина Б.Г., Коляков М.І., Кочкарьов Д.В., Aschl H., Atan V., Curbach Manfred, David W. Murray, Deng Zhiheng, Filson A.H., Gerstle K., Hampel T., Helmut B. Kupfer, Hilsdorf H.K., Kurt H. Gerstle, Quast Matthias, Ritter R., Rong C., Ruch H., Scheerer S., Sheng Jun, Shi Q., Slate F.O., Slate F.O., Speck K., Tasuji N.E., Zhang T., Zhao H. та ін.

Дослідженню сталевібробетонних конструкцій та розробці методів їх розрахунку присвятили свої роботи Андрійчук О.В., Бабич Є.М., Барашиков А.Я., Бамбура А.М., Батсон Г.Б., Білозір В.В., Гетун Г.В., Дробошинць С.Я., Крилов Б.О., Кричевський О.П., Кричевський С.О., Лисенко Є.Ф., Мандель Д.А., Митрофанов Е.І., Павлов А.П., Рамачадран В., Ромуальді Д.П., Сакварелідзе А.В., Сопільняк А.В., Сунак О.П. та ін.

На основі порівняльного аналізу використання сталевібробетону в плитних конструкціях визначено мету та задачі дослідження.

У **другому розділі** розглянуто міцнісні та деформативні характеристики сталевібробетону (СФБ). Наведений огляд існуючих досліджень міцності

сталефібробетону на стиск та розтяг. Численні дослідження підтверджують ефективність СФБ. Міцність сталефібробетону на розтяг збільшується в 1,5...3 рази у порівнянні з бетоном, а на стиск – на 40...60%. При наявності сталевих волокон до 2% від об'єму матеріалу морозостійкість збільшилась у 3...5 разів, водонепроникність зразків – на 2...3 класи, стійкість до стирання сталефібробетону підвищилась на 35...40%, опір удару – 3...3,5 рази, термостійкість – у 3 рази. Також доведено, що міцність бетону та сталефібробетону збільшується при наявності бокового обтиску.

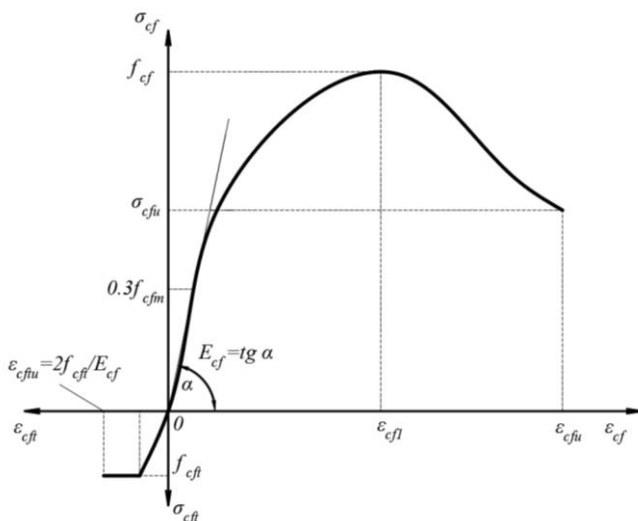
Розглянуто існуючі дослідження усадки і повзучості бетону та сталефібробетону при одноосному та двохосному стиску. Виявилось, що дослідження усадки і повзучості сталефібробетону практично відсутні.

Наведені характеристики сталефібробетону, який був використаний у дослідних зразках-плитах. Зразки першої серії армувалися сумішшю сталевих фібр марки STAFIB 50/1.0 та STAFIB 30/0.6 із анкерами на кінцях, процентне відношення яких становило по 0,5% по об'єму кожної фібри. Зразки другої серії містили 1,0% за об'ємом хвилястих фібр марки NOVOKON URW 50/1.0.

Для побудови теоретичних діаграм « σ - ε » при стиску сталефібробетонних призм була використана залежність з ДБН:

$$\sigma_{cf} = f_{cf} \sum_{k=1}^5 a_k \eta^k, \quad (1)$$

де: $\eta = \varepsilon_{cf} / \varepsilon_{cf1}$; ε_{cf1} - відносні деформації СФБ при максимальних напруженнях;
 a_k - коефіцієнти полінома, які визначаються у залежності від експериментального значення призмової міцності СФБ.



Загальна діаграма « σ - ε » при одноосному стиску та розтягу СФБ, яка прийнята у подальших розрахунках, показана на рис. 1.

Рис. 1. Діаграма « σ - ε » при одноосному стиску та розтягу СФБ

Для визначення деформацій повзучості бетону при одноосному стиску були виготовлені призми розміром 75x75x400 мм, а при двохосному стиску – плити розміром 40x300x300 мм. Призми обох серій завантажувались в пружинних установках одноосно з рівнем обтиску $0,27f_{cf}$ та $0,66f_{cf}$.

Плити I серії завантажувались в пружинних установках двохосно з рівнем обтиску $\sigma_x = 0,66f_{cf}$ та $\sigma_y = 0,66f_{cf}$; $\sigma_x = 0,66f_{cf}$ та $\sigma_y = 0,27f_{cf}$; $\sigma_x = 0,66f_{cf}$ та $\sigma_y = 0$ (рис. 2). Плити II серії завантажувались в пружинних установках двохосно з рівнем обтиску $\sigma_x = 0,63f_{cf}$ та $\sigma_y = 0,6f_{cf}$; $\sigma_x = 0,63f_{cf}$ та $\sigma_y = 0,23f_{cf}$; $\sigma_x = 0,63f_{cf}$ та $\sigma_y = 0$.



Рис. 2. Загальний вигляд установки для створення двохосного стиску

Для визначення деформацій повзучості при одноосному стиску пропонується залежність:

$$\varepsilon_{cf,crp}(t,\tau) = \sigma_{cf} C_{cf}^*(\tau) \left(1 - e^{-m(t-\tau)^p} \right), \quad (2)$$

де: σ_{cf} - тривалі стискаючі напруження в сталевібробетоні (МПа); $C_{cf}^*(\tau)$ - гранична міра повзучості сталевібробетону в нелінійній області; t - довільний час (добы); τ - вік завантаження бетону (добы); m, p - параметри, які визначаються експериментально ($m=0,01$; $p=0,2$).

Для визначення деформацій повзучості при одноосному стиску пропонується залежність:

$$\varepsilon_{cf,crp}(t,\tau) = \sigma_{cf} C_{cf}^*(\tau) \left(1 - e^{-m(t-\tau)^p} \right), \quad (2)$$

де: σ_{cf} - тривалі стискаючі напруження в сталевібробетоні (МПа); $C_{cf}^*(\tau)$ - гранична міра повзучості сталевібробетону в нелінійній області; t - довільний час (добы); τ - вік завантаження бетону (добы); m, p - параметри, які визначаються експериментально ($m=0,01$; $p=0,2$).

Значення $C_{cf}^*(\tau)$ визначається за формулою:

$$C_{cf}^*(\tau) = \xi_r \xi_w C_{cf}(\tau) e^{\eta_{\tau}^{15}}, \quad (3)$$

де $C_{cf}(\tau)$ - гранична міра повзучості сталевібробетону в лінійній області; ξ_r, ξ_w - коефіцієнти, що враховують відповідно масштабний фактор і вологість

навколишнього середовища; $\eta_{\tau} = \frac{\sigma_{cf}}{f_{cf}(\tau)}$ - відносний рівень стискаючих напружень в

момент завантаження зразків τ , $f_{cf}(\tau)$ - призмova міцність сталевібробетону в момент часу τ (МПа).

Для визначення деформацій повзучості сталевібробетону в умовах двохосного стиску використана модель ортотропного тіла з осями ортотропії, які збігаються з напрямками головних напружень, і яку можна записати в загальній матричній формі

$$\left\{ \varepsilon_{cf,crp,2}^* \right\} = [C] \left\{ \sigma_{cf} \right\}, \quad (4)$$

або в розгорнутому вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{cf,crp,2x}^*(t) \\ \varepsilon_{cf,crp,2y}^*(t) \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{cc} \frac{1}{E_{cf,x}(t)} - \frac{\nu_{yx}(t)}{E_{cf,y}(t)} & \\ \frac{\nu_{xy}(t)}{E_{cf,x}(t)} & \frac{1}{E_{cf,y}(t)} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{cf,x} \\ \sigma_{cf,y} \end{array} \right\}, \quad (5)$$

де: $\{\varepsilon_{cf,crp,2}^*\}$ - вектор деформацій швидкоплинної повзучості сталевібробетону; $[C]$ - матриця механічних характеристик сталевібробетону; $\{\sigma_{cf}\}$ - вектор напружень; $E_{cf,x}(t)$, $E_{cf,y}(t)$ - січні модулі деформацій сталевібробетону в напрямку осей X та Y в момент часу t ; $\nu_{yx}(t)$ - коефіцієнт поперечної деформації в момент часу t , який характеризує напрям деформацій по осі Y при дії напруження в напрямку осі X ; $\nu_{xy}(t)$ - аналогічно $\nu_{yx}(t)$.

Коефіцієнти поперечних деформацій $\nu_{xy}(t)$ та $\nu_{yx}(t)$, які входять в залежність (5), можна визначити за формулами:

$$\nu_{xy}(t) = \sqrt{\nu_x(t)\nu_y(t)\frac{E_{cf,x}(t)}{E_{cf,y}(t)}}; \nu_{yx}(t) = \sqrt{\nu_y(t)\nu_x(t)\frac{E_{cf,y}(t)}{E_{cf,x}(t)}}, \quad (6)$$

де: $\nu_x(t)$, $\nu_y(t)$ - коефіцієнти поперечних деформацій при одноосьовому стиску, що визначаються за формулою [5]:

$$\nu_x(t) = 0,16 + \left(\frac{\eta_{\tau x} - 0,164}{k_{cx}}\right)^6 e^{\left(\frac{\tau-1}{t}\right)}; \nu_y(t) = 0,16 + \left(\frac{\eta_{\tau y} - 0,164}{k_{cy}}\right)^6 e^{\left(\frac{\tau-1}{t}\right)}, \quad (7)$$

k_{cx} та k_{cy} - коефіцієнти, що враховують збільшення міцності сталевібробетону при двохосному стиску, які визначається із залежності ДБН:

$$k_{cx} = 1,0 + 1,38 \frac{\sigma_{cf,y}}{f_{cf}(t)} - 1,15 \left(\frac{\sigma_{cf,y}}{f_{cf}(t)}\right)^2; k_{cy} = 1,0 + 1,38 \frac{\sigma_{cf,x}}{f_{cf}(t)} - 1,15 \left(\frac{\sigma_{cf,x}}{f_{cf}(t)}\right)^2. \quad (8)$$

Для визначення межі переходу швидкоплинних деформацій повзучості СФБ в тривалі деформації пропонується визначати швидкість $V_{crp}(t, \tau)$ та прискорення $\chi_{crp}(t, \tau)$ деформацій повзучості за формулами:

$$V_{crp}(t, \tau) = \varepsilon_{cf,crp}(t, \tau) A_t + \sigma_{cf} C_{cf}^*(\tau) B_t; \quad (9)$$

$$\chi_{crp}(t, \tau) = \varepsilon_{cf,crp}(t, \tau) C_t + \sigma_{cf} C_{cf}^*(\tau) B_t (2A_t + D_t), \quad (10)$$

в які входять параметри

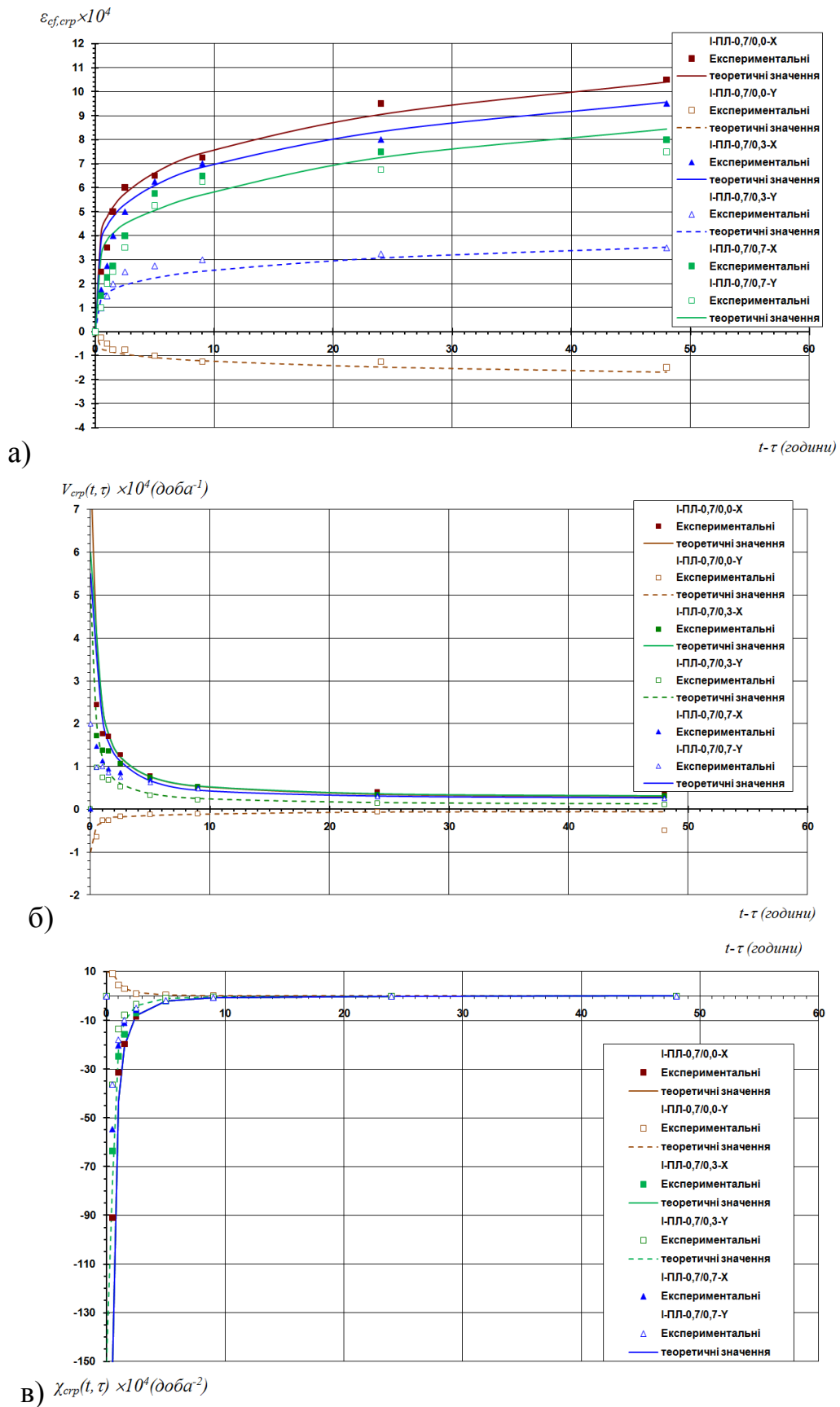
$$A_t = \frac{t \lg t - 2,432 \lg t + 1,563 \lg \tau}{t \lg t (5,6 \lg t - 3,6 \lg \tau)}; \quad (11)$$

$$B_t = mp(t - \tau)^{p-1} e^{-m(t-\tau)^p}; \quad (12)$$

$$C_t = \frac{t \lg t + 0,434t - 1,056}{t^2 \lg t (5,6 \lg t - 3,6 \lg \tau)} - A_t \frac{0,608 \lg t + (\lg t + 0,868)(2,8 \lg t - 1,8 \lg \tau)}{t \lg t (2,8 \lg t - 1,8 \lg \tau)}; \quad (13)$$

$$D_t = \frac{p - 1 - mp(t - \tau)^p}{t - \tau}. \quad (14)$$

Графіки відносних деформацій, зміни швидкості та прискорення відносних деформацій швидкоплинної повзучості СФБ плит I та II серії наведено на рис. 3 та 4. З графіків зміни швидкості та прискорення відносних деформацій швидкоплинної повзучості видно, що швидкоплинна повзучість сталевібробетону припиняє інтенсивно розвиватись через 25...30 годин після завантаження.



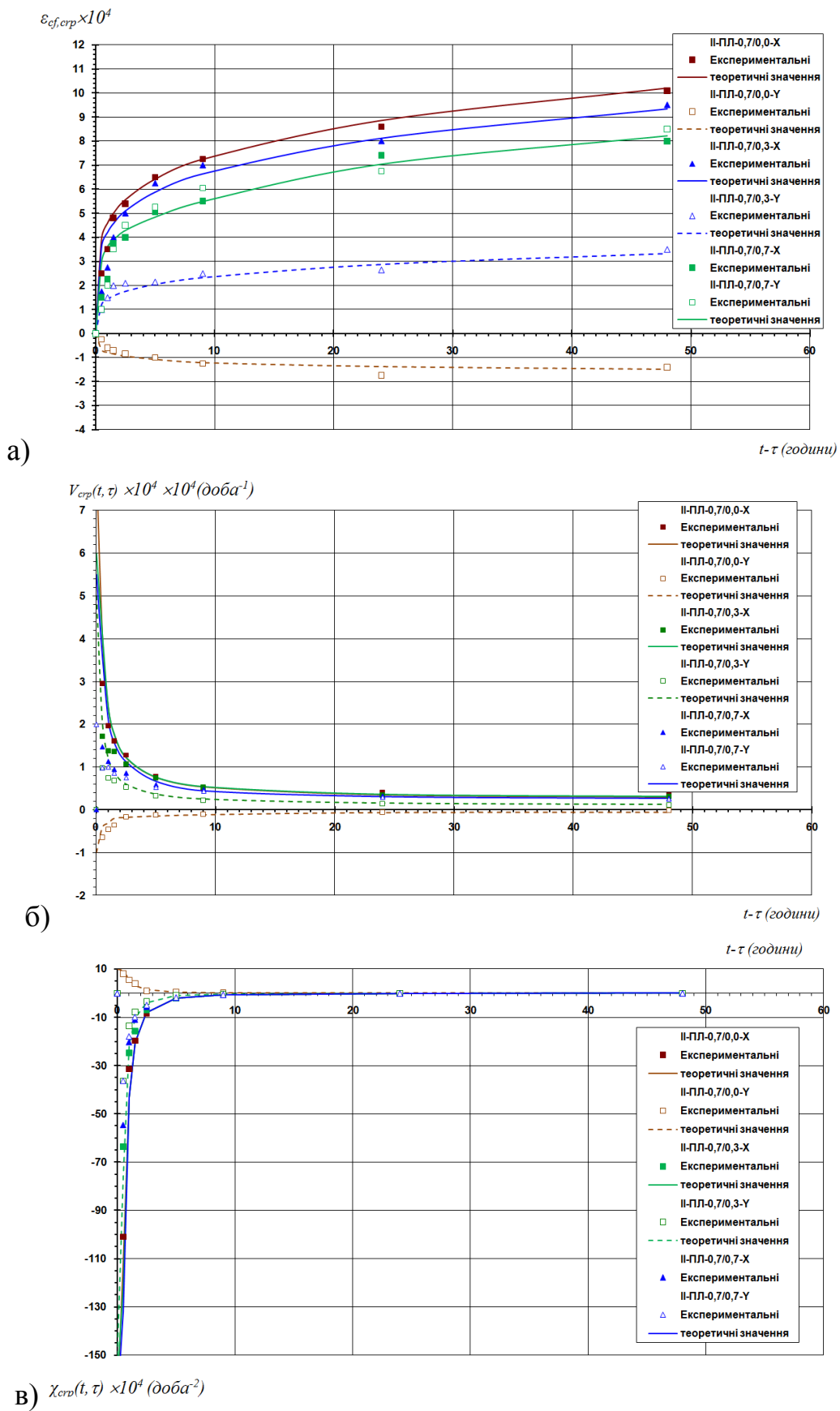


Рис. 4. Графіки відносних деформацій (а), зміни швидкості (б) та прискорення (в) відносних деформацій швидкоплинної повзучості СФБ плит II серії

У третьому розділі наведені результати експериментальних та теоретичних досліджень втрат попереднього напруження в двохосно попередньо-напружених зразках-плитах, викликаних пружно-миттєвими деформаціями сталевібробетону та деформаціями усадки та повзучості СФБ.

Дослідження виконувались на плитах розміром 40×800×800 мм з попередньо напруженою арматурою Ø5 Вр-II в одному та двох напрямках (рис. 5). Об'єм і зміст роботи приведені у табл. 2. Виготовлено дві серії плит з різним рівнем попереднього напруження. Для виготовлення попередньо-напружених у двох напрямках плит запроектовані і виготовлені дві силові сталеві рами (рис. 6). В кожній рамі створювалось напруження для двох плит-близнюків.

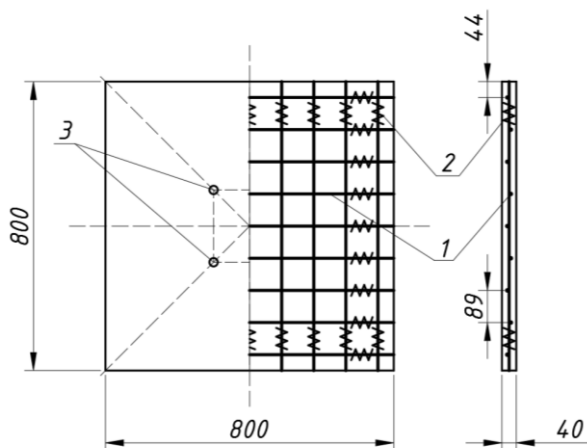


Рис. 5. Армуння дослідних зразків-плит: 1 – попередньо-напружені стержні Ø5Вр-II; 2 – спіралі; 3 – марки (8 шт.)



Рис. 6. Загальний вид силових рам для створення двохосно попередньо-напружених плит

Таблиця 2

Об'єм досліджень втрат попереднього напруження

Но- мер серії	Марка зразка	Кіль- кість зразків	Рівень обтиску по осі				Кількість арматурних стержнів вздовж осі	
			запланований		фактичний			
			х	у	х	у	х	у
I	I-ПП-0.7/0.0	2	0.7	0.0	0.66	0	9	9
	I-ПП-0.7/0.3	2	0.7	0.3	0.66	0.29	9	6
	I-ПП-0.7/0.7	2	0.7	0.7	0.66	0.66	9	9
	I-ПП-У	2	-	-	-	-	9	9
II	II-ПП-0.7/0.0	2	0.7	0.0	0.63	0.0	9	9
	II-ПП-0.7/0.3	2	0.7	0.3	0.63	0.28	9	6
	II-ПП-0.7/0.7	2	0.7	0.7	0.63	0.63	9	9
	II-ПП-У	2	-	-	-	-	9	9

У результаті проведених експериментальних досліджень отримані сумарні пружно-миттєві деформації і деформації повзучості попередньо напружених сталевібробетонних плит, а також усадочні деформації сталевібробетонних плит без попереднього напруження. Середні значення втрат попереднього напруження від пружно-миттєвих деформацій та деформацій повзучості сталевібробетонних плит наведені на рис. 5, 6.

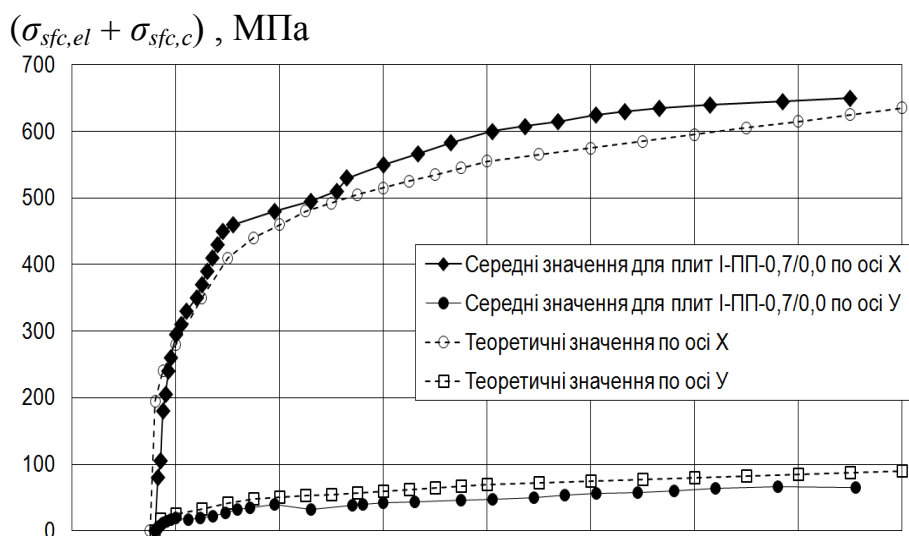
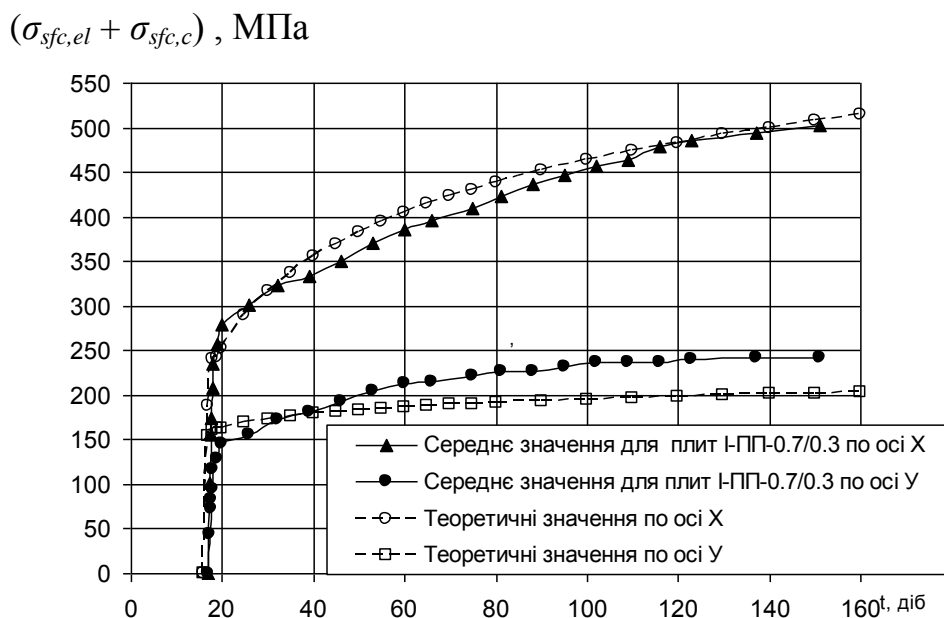
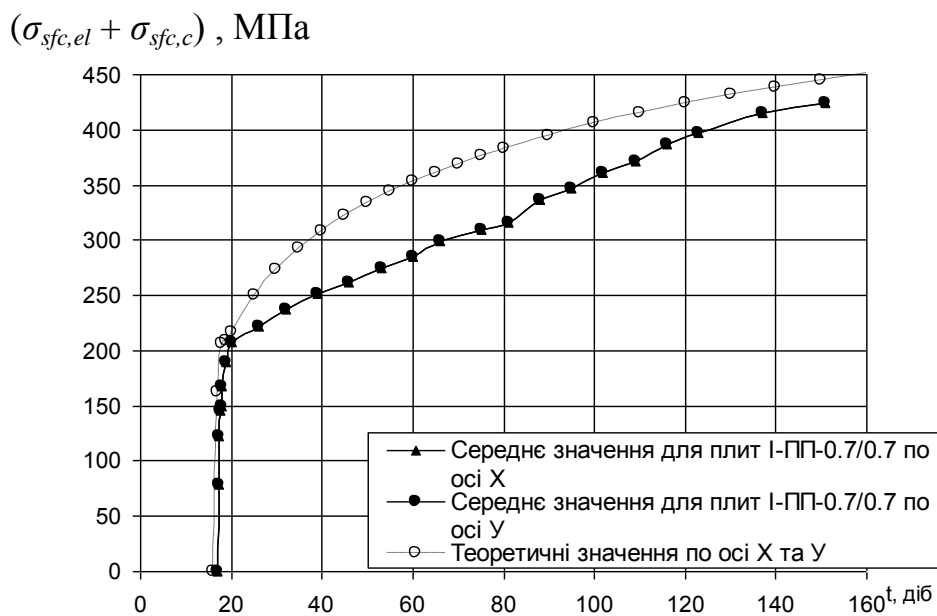


Рис. 5. Середні значення втрат попереднього напруження від пружно-миттєвих деформацій та деформацій повзучості СФБ плит I серії

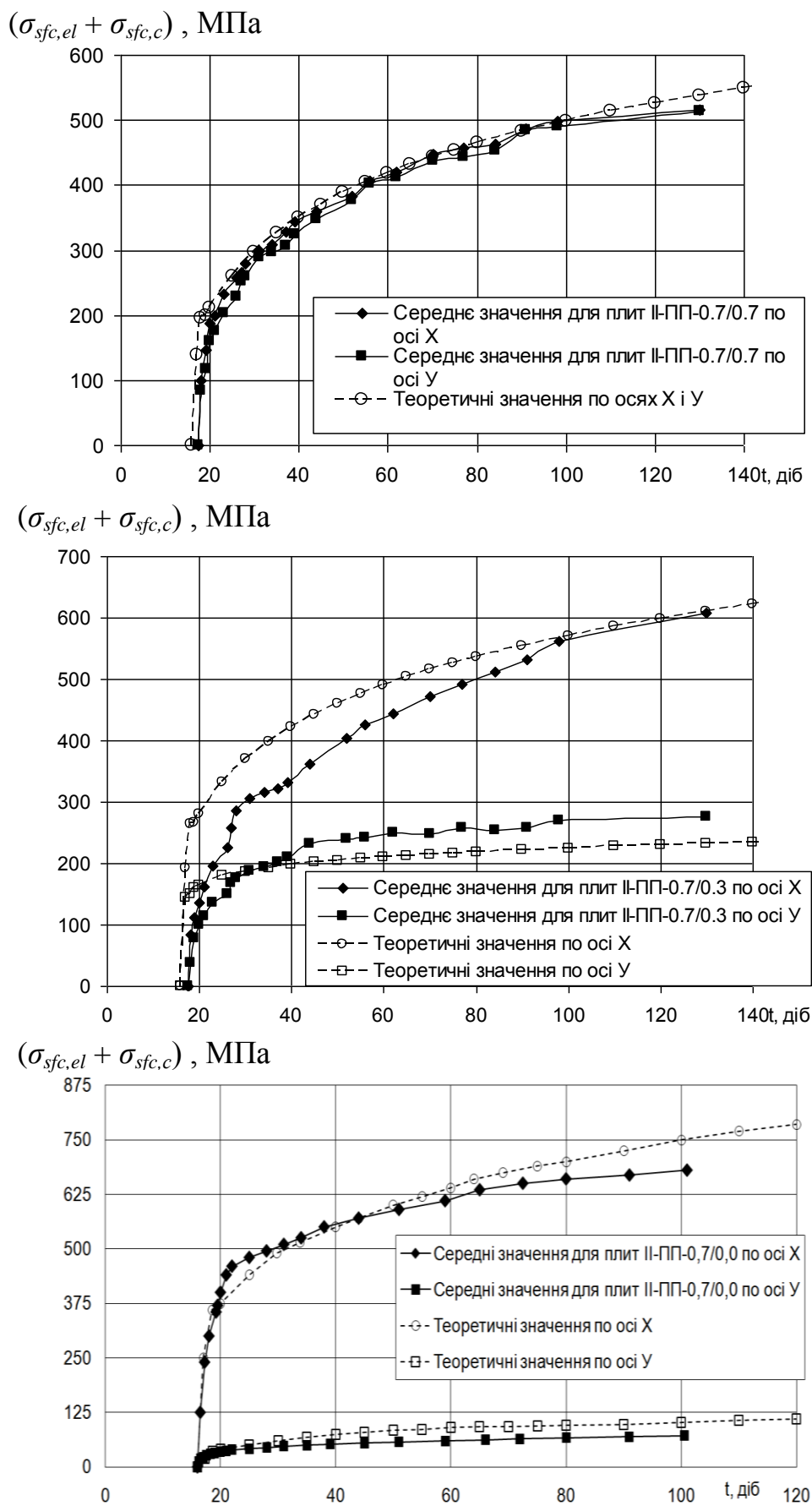


Рис. 6. Середні значення втрат попереднього напруження від пружно-миттєвих деформацій та деформацій повзучості СФБ плит II серії

У результаті експериментальних досліджень встановлені фактичні напруження та відносні деформації розтягу в арматурних стержнях дослідних СФБ плитах перед випробуванням їх на дію поперечного навантаження. Ці значення наведені в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3

Експериментальні значення напружень в арматурі в СФБ плитах

Но- мер серії	Марка плити	Напруження в арматурі перед відпуском з упорів на бетон, σ_p , МПа		Втрати напружень, σ_{los} , МПа		Напруження в арматурі перед випробуванням, σ_{p0} , МПа	
		X	Y	X	Y	X	Y
I	I-ПП-0.7/0.7	-1400	-1400	-434	-434	-966	-966
	I-ПП-0.7/0.3	-1400	-1000	-505	-243	-895	-657
	I-ПП-0.7/0.0	-1400	0	-671	-65	-729	-65
II	II-ПП-0.7/0.7	-1400	-1400	-511	-511	-889	-889
	II-ПП-0.7/0.3	-1400	-1000	-605	-272	-795	-628
	II-ПП-0.7/0.0	-1400	0	-679	-72	-721	-72

Таблиця 4

Експериментальні значення відносних деформації арматури в СФБ плитах

Но- мер серії	Марка плити	Відносні деформації арматури перед відпуском з упорів на бетон, $\varepsilon_p \times 10^3$		Відносні деформації арматури, що відповідають сумарним втратам напружень, $\varepsilon_{los} \times 10^3$		Відносні деформації арматури перед випробуванням, $\varepsilon_{p0} \times 10^3$	
		X	Y	X	Y	X	Y
I	I-ПП-0.7/0.7	-7,0	-7,0	-2,17	-2,17	-4,83	-4,83
	I-ПП-0.7/0.3	-7,0	-5,0	-2,53	-1,22	-4,47	-3,78
	I-ПП-0.7/0.0	-7,0	0	-3,36	-0,33	-3,64	-0,33
II	II-ПП-0.7/0.7	-7,0	-7,0	-2,56	-2,56	-4,44	-4,44
	II-ПП-0.7/0.3	-7,0	-5,0	-3,03	-1,36	-3,97	-3,64
	II-ПП-0.7/0.0	-7,0	0	-4,11	-0,36	-2,89	-0,36

Аналіз отриманих даних показав, що найбільші втрати напружень виникли в одноосно обтиснутих плитах марок I-ПП-0.7/0.0 та II-ПП-0.7/0.0 вздовж осі X. Вони становили на 54,6% та 32,9% більшими від двоосно обтиснутих плит марок I-ПП-0.7/0.7 та II-ПП-0.7/0.7 відповідно, та на 32,9% та 12,2% більшими від двоосно обтиснутих плит марок I-ПП-0.7/0.3 та II-ПП-0.7/0.3 відповідно.

Вздовж осі Y в одноосно обтиснутих плитах марок I-ПП-0.7/0.0 та II-ПП-0.7/0.0 в ненапруженій арматурі виникли незначні розтягуючі зусилля внаслідок деформацій розтягу бетону від дії обтиску вздовж осі X.

Для розрахунку втрат попереднього напруження від пружно-миттєвих деформацій та деформацій повзучості сталевібробетонних плит використовується методика розрахунку деформацій повзучості СФБ, яка наведена в розділі. При цьому зусилля обтиску СФБ напруженою арматурою приймаються не постійними, а змінними пропорційно росту деформаціям повзучості. Результати теоретичних розрахунків втрат попереднього напруження від пружно-миттєвих деформацій СФБ, від сумарних деформацій усадки і повзучості СФБ та від швидкоплинних деформацій повзучості СФБ наведені в табл. 5. Експериментальні та теоретичні значення сумарних втрат напружень в арматурі від пружно-миттєвих деформацій та деформацій усадки та повзучості СФБ дослідних плит наведені в табл. 6.

Таблиця 5

Теоретичні значення втрат напружень в арматурі в дослідних плитах

Но- мер серії	Марка плити	Втрати напружень від пружно- миттєвих деформацій СФБ, ΔP_{el} , кН		Сумарні втрати напружень від деформацій усадки і повзучості СФБ, ΔP_c , кН		Втрати напружень від швидко плин-них деформацій повзучості СФБ, ΔP_{cc} , кН	
		X	Y	X	Y	X	Y
I	I-ПП-0.7/0.7	3,37	3,37	5,84	5,84	1,26	1,26
	I-ПП-0.7/0.3	3,76	2,11	6,44	1,92	0,71	0,14
	I-ПП-0.7/0.0	4,26	0	10,10	0	1,64	0
II	II-ПП-0.7/0.7	2,81	2,81	8,01	8,01	1,21	1,21
	II-ПП-0.7/0.3	3,84	3,03	8,50	1,81	1,72	0,31
	II-ПП-0.7/0.0	4,98	0	9,96	0	2,19	0

Таблиця 6

Експериментальні та теоретичні значення втрат напружень в арматурі в дослідних плитах

Но- мер серії	Марка плити	Експериментальні значення повних втрат напружень, $\Delta P_{експ}$, кН		Теоретичні значення повних втрат напружень, $\Delta P_{теор}$, кН	
		X	Y	X	Y
I	I-ПП-0.7/0.7	8,68	8,68	9,20	9,20
	I-ПП-0.7/0.3	10,10	4,86	10,20	4,03
	I-ПП-0.7/0.0	13,42	0	14,36	0
II	II-ПП-0.7/0.7	10,22	10,22	10,82	10,82
	II-ПП-0.7/0.3	12,10	5,44	12,34	4,84
	II-ПП-0.7/0.0	13,58	0	14,94	0

У четвертому розділі виконані експериментально-теоретичні дослідження міцності і тріщиностійкості двохосно попередньо-напружених плит при дії поперечного навантаження та бокового обтиску.

Для визначення несучої здатності плити розглядаємо схему, в якій на плиту діє рівномірно-розподілене навантаження та зусилля попереднього обтиску у двох напрямках P_x та P_y (рис. 4.2). Характеристики армування прийняті згідно рис. 4.3.

Розрахунок визначення несучої здатності виконується у двох напрямках, вирізавши смуги шириною $b_x=S_x$ та $b_y=S_y$. На першому етапі визначаємо

напруження обтиску сталефібробетону, яке передається попередньо-напруженою арматурою з урахуванням усіх втрат (див. Розділ 3). Напружено-деформований стан в перерізі показано на рис. 11.

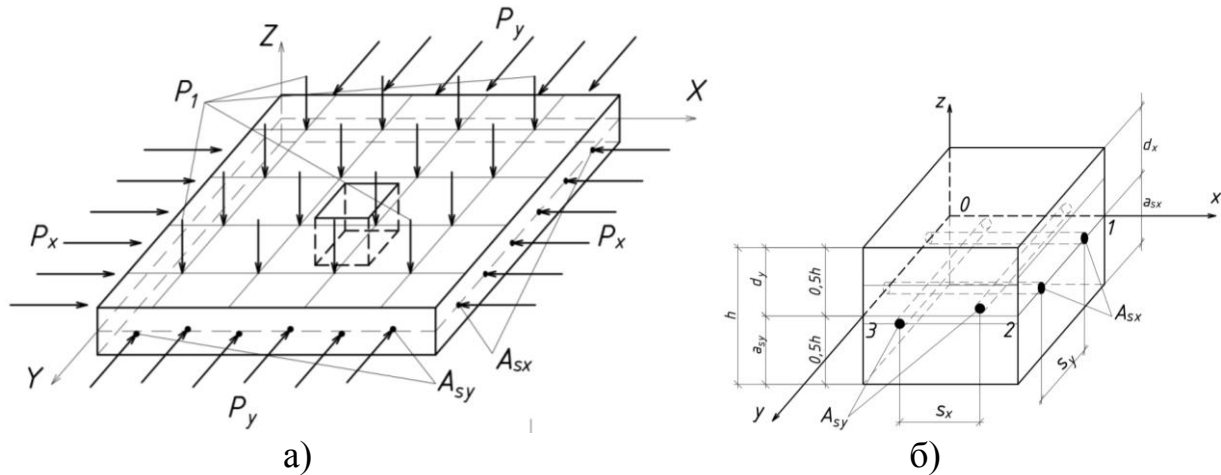


Рис. 11. Схема завантаження дослідної сталефібробетонної плити (а) та характеристики армування одиночного фрагмента плити (б):

P_1 – одиночне вертикальне навантаження; P_x та P_y - зусилля попереднього обтиску відповідно вздовж осей X та Y

Після прикладання вертикального навантаження напружено-деформований стан можна розділити на три стадії (рис. 12).

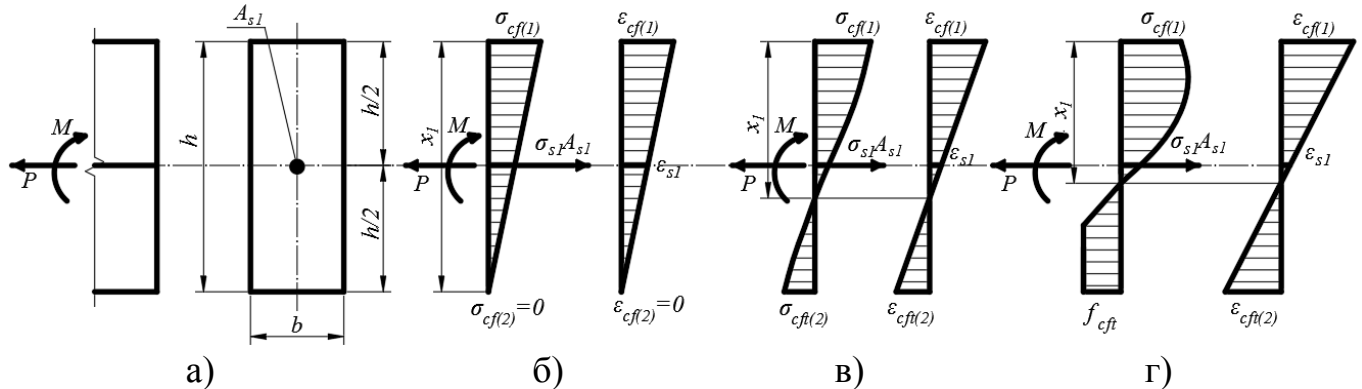


Рис. 12. Напружено-деформований стан прямокутного сталефібробетонного перерізу з попередньо-напруженою арматурою в центрі перерізу при дії згинального моменту: а - поперечний переріз елемента; б – епюра напружень та деформацій при дії згинального моменту та сили обтиску на стадії I; в – епюра напружень та деформацій при дії згинального моменту та сили обтиску на стадії II (стадія утворення тріщин); б – епюра напружень та деформацій при дії згинального моменту та сили обтиску на стадії III (стадія руйнування);

На першій стадії при незначному навантаженні стискуючі напруження та деформації у верхній зоні перерізу збільшуються, а в нижній зоні перерізу зменшуються і досягають значень $\sigma_{cf(2)}=0$ та $\varepsilon_{cf(2)}=0$ (рис. 12, б). При цьому напруження розтягу в арматурі σ_{s1} зменшаться.

На другій стадії при подальшому збільшенні навантаження стискуючі напруження та деформації у верхній зоні перерізу ще збільшуються, а в нижній зоні

перерізу виникає розтяг і напруження та деформації змінюють знак $-\sigma_{cf(2)} = \sigma_{cft(2)}$ та $-\varepsilon_{cf(2)} = \varepsilon_{cft(2)}$ (рис. 12, в). При цьому напруження розтягу в арматурі σ_{sI} ще зменшуються. На цій стадії виникають нормальні тріщини і вона прийнята для розрахунку тріщиностійкості та ширини розкриття тріщин.

На третьій стадії при подальшому збільшенні навантаження стискуючі напруження та деформації у верхній зоні перерізу досягають граничних значень ($\sigma_{cf(1)} = f_{cf}$ та $\varepsilon_{cf(1)} = \varepsilon_{cfu}$), а в нижній зоні перерізу напруження розтягу та деформації досягають граничних значень ($\sigma_{cft(1)} = f_{cft}$ та $\varepsilon_{cf(2)} = \varepsilon_{cftu}$) (рис. 12, г). При цьому напруження розтягу в арматурі σ_{sI} ще зменшуються. Ця стадія прийнята для розрахунку несучої здатності.

За критерій вичерпання несучої здатності по нормальному перерізу СФБ елемента приймається руйнування СФБ при досягненні фібровими деформацій граничних значень $\varepsilon_{cftu} = -2f_{cftu} / E_{cf}$. Тоді значення граничного згинального моменту в напрямку однієї осей M для СФБ згинальних елементів прямокутного перерізу з попередньо-напруженою арматурою рекомендується визначати за формулами:

$$\frac{bf_{cf}k_c}{\aleph} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} - \frac{3}{4}bf_{cft}(h-x_I) + \sigma_{sp}A_{sp} = 0; \quad (15)$$

$$\frac{bf_{cf}k_c}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} + \frac{11}{24}bf_{cft}(h-x_I)^2 + \sigma_{sp}A_{sp}(x_I - z_{sp}) - M = 0. \quad (16)$$

В залежностях (4.7), (4.8) згідно ДСТУ:

$\aleph = \left(\frac{I}{r}\right)$ - кривизна вигнутої осі в перерізі (1/м):

$$\aleph = \left(\frac{I}{r}\right) = \frac{\varepsilon_{c(1)} - \varepsilon_{c(2)}}{h}; \quad (17)$$

$\varepsilon_{cf(1)}$ - відносні деформації сталевібробетону в стиснутій зоні перерізу;

$\varepsilon_{cf(2)}$ - відносні деформації сталевібробетону в розтягнутій зоні перерізу;

γ - відношення відносних деформацій стиску $\varepsilon_{cf(1)}$ до граничних ε_{cft} :

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\varepsilon_{cf1}}; \quad (18)$$

x_I - висота стиснутої зони (м):

$$x_I = \frac{\varepsilon_{c(1)}}{\aleph}; \quad (19)$$

$\bar{\aleph}$ - відносна кривизна (1/м):

$$\bar{\aleph} = \frac{\aleph}{\varepsilon_{cf1}}; \quad (20)$$

$\sigma_{sp} = E_{sp}(\bar{\aleph}(x_I - z_{sp}) - \varepsilon_{p0})$ - напруження в арматурі;

ε_{p0} - відносні деформації, викликані попереднім напруженням арматури з

урахуванням усіх втрат;

z_s - відстань від центра ваги арматури до крайньої стиснутої грані перерізу;

a_k - коефіцієнти полінома, які визначаються у залежності від експериментального значення призмової міцності СФБ ;

k_c - коефіцієнт, що враховує збільшення міцності сталевібробетону при двохосному стиску і визначається за формулами (8).

Представимо рівняння (15), (16) у вигляді

$$N_{cf} - N_{cft} + N_s = 0; \quad (21)$$

$$M_{cf} + M_{cft} + M_s = M, \quad (22)$$

де: N_{cf} , M_{cf} - зусилля в стиснутій зоні СФБ;

N_{cft} , M_{cft} - зусилля в стиснутій зоні СФБ;

N_s , M_s - сумарні зусилля в арматурі.

Розпишемо значення внутрішніх зусиль

$$N_{cf} = \frac{bf_{cf}\varepsilon_{cf1}}{\aleph} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1}; \quad (23)$$

$$N_{cft} = \frac{3}{4}bf_{cft} \left(h - \frac{\varepsilon_{cf(1)}}{\aleph} \right); \quad (24)$$

$$N_s = A_{sp}E_{sp} \left(\aleph(x_I - z_{sp}) - \varepsilon_{p0} \right); \quad (25)$$

$$M_{cf} = \frac{bf_{cf}k_c}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2}; \quad (26)$$

$$M_{cft} = \frac{11}{24}bf_{cft} (h - x_I)^2; \quad (27)$$

$$M_s = A_{sp}E_{sp} \left(\aleph(x_I - z_{sp}) - \varepsilon_{p0} \right) (x_I - z_{sp}), \quad (28)$$

Величину кривизни пропонується визначати за формулами

$$\aleph = \frac{-b_{\Sigma} + \sqrt{b_{\Sigma}^2 - 4a_{\Sigma}c_{\Sigma}}}{2a_{\Sigma}}, \quad (29)$$

де: $a_{\Sigma} = A_{sp}E_{sp}z_{sp}; \quad (30)$

$$b_{\Sigma} = \frac{3}{4}bhf_{cft} - A_{sp}E_{sp}\varepsilon_{cf(1)} + A_{sp}E_{sp}\varepsilon_{p0}; \quad (31)$$

$$c_{\Sigma} = -\frac{3}{4}bf_{cft}\varepsilon_{cf(1)} - bf_{cf}\varepsilon_{cf1} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1}. \quad (32)$$

Після визначення кривизни \aleph її значення підставляють у формули (26)...(28) для визначення моментів M_{cf} , M_{cft} та M_s . Після цього визначаємо згинальний момент M за формулою (22), який відповідає кривизні \aleph .

Графіки «момент-кривизна» при розрахунку несучої здатності плит I та II серій наведені на рис. 13...20.

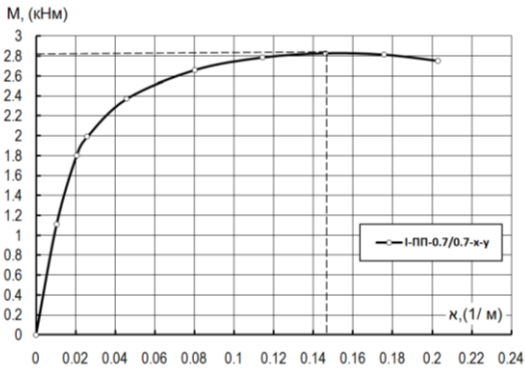


Рис. 13. Графік «момент-кривизна» при розрахунку несучої здатності плити I-ПП-0,7/0,7

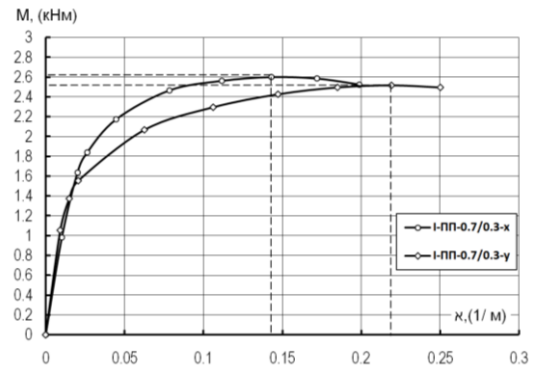


Рис. 14. Графіки «момент-кривизна» при розрахунку несучої здатності плити I-ПП-0,7/0,3

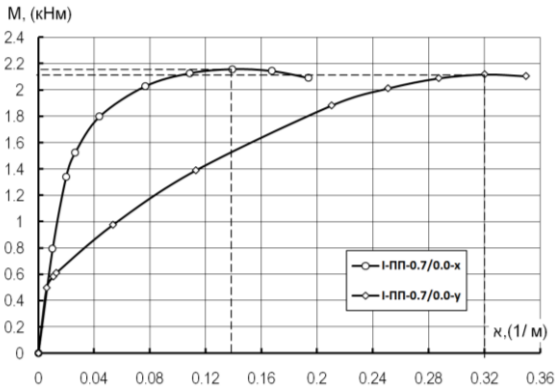


Рис. 15. Графіки «момент-кривизна» при розрахунку несучої здатності плити I-ПП-7,0/0,0

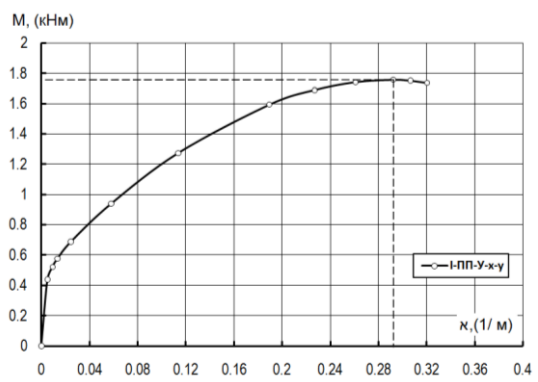


Рис. 16. Графік «момент-кривизна» при розрахунку несучої здатності плити I-ПП-У

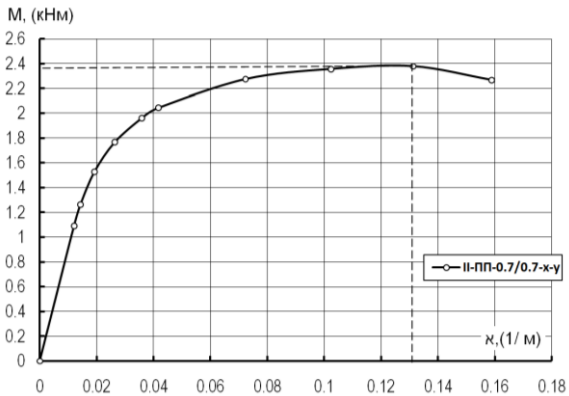


Рис. 17. Графік «момент-кривизна» при розрахунку несучої здатності плити II-ПП-0,7/0,7

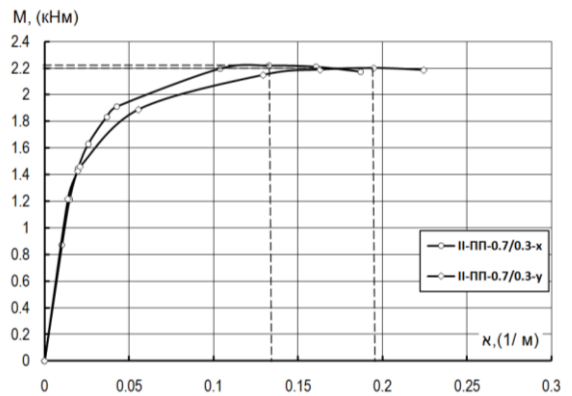


Рис. 18. Графіки «момент-кривизна» при розрахунку несучої здатності плити II-ПП-0,7/0,3

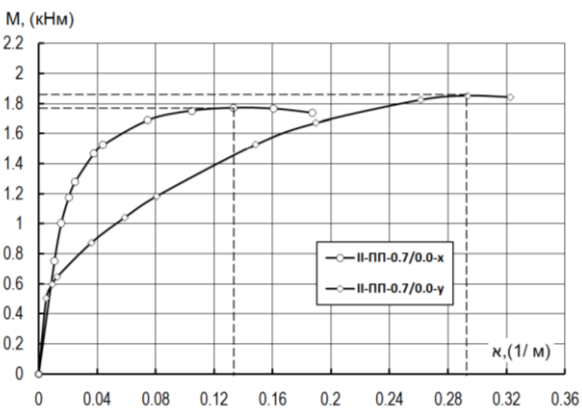


Рис. 19. Графік «момент-кривизна» при розрахунку несучої здатності плити II-ПП-0,7/0,0

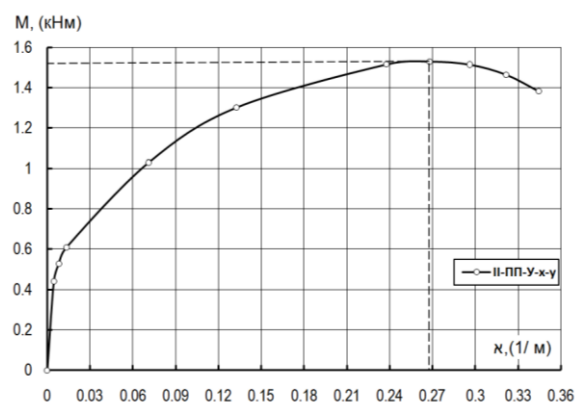


Рис. 20. Графік «момент-кривизна» при розрахунку несучої здатності плити II-ПП-У

Випробування дослідних зразків здійснювалось на силовому стенді (рис. 21). Плити завантажувались 16-ма зосередженими силами P_1 рівномірно по усій площі плити з кроком 180 мм за допомогою гідравлічних домкратів через систему траверс з шарнірними вузлами. Це моделювало рівномірно розподілене навантаження q (рис. 22). Плити опирались шарнірно по чотирьом сторонам. Прольоти вздовж осей X та Y становили 700 мм. При випробуванні вимірювались деформації СФБ на нижній та верхній поверхнях плит за допомогою тензодатчиків. Також вимірювались прогини плит в центрі плити та деформації опор за допомогою індикаторів годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Величина навантаження фіксувалась на манометрі насосної станції, до якої були приєднані гідравлічні домкрати.



Рис. 21. Експериментальна установка для випробування дослідних плит

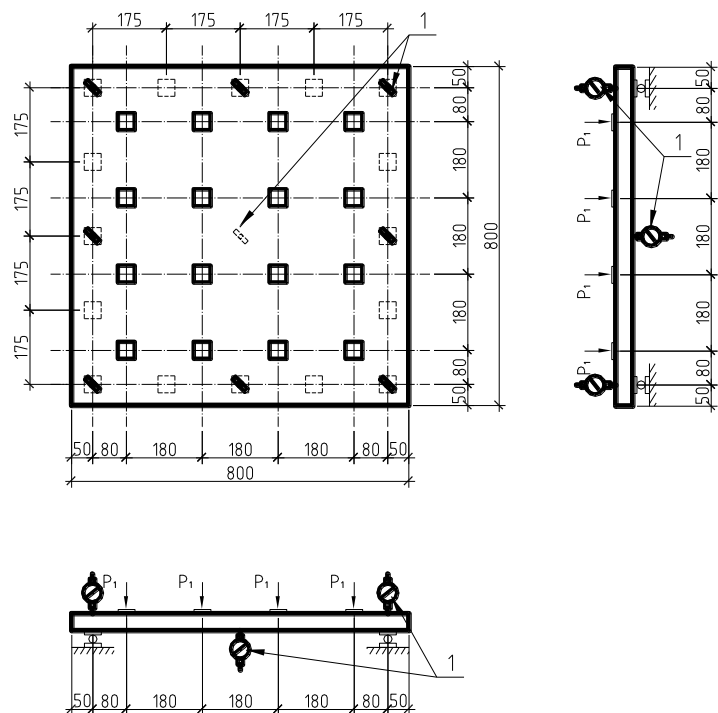


Рис. 22. Схема завантаження плит: 1 – індикатори.

Під час дослідження було встановлено зусилля тріщиноутворення та руйнуюче зусилля попередньо-напружених сталевібробетонних плит та плит без попереднього напруження.

Для визначення згинальних моментів в плиті від рівномірно-розподіленого навантаження використовуємо залежності

$$M_x = \frac{\sum M \cdot B_x}{B_x + B_y}, \quad (33)$$

$$M_y = \sum M - M_x, \quad (34)$$

де M_x , M_y - згинальні моменти в плиті відповідно вздовж осей X та Y;

$\sum M$ - сумарний згинальний момент в плиті від зовнішнього навантаження, який визначається як для балки на двох опорах;

B_x, B_y - жорсткості плити в напрямку відповідних осей X та Y.

Так як жорсткості дослідних плит у двох напрямках однакові, тоді залежність (34) має вигляд

$$M_x = M_y = \frac{1}{2} \sum M = \frac{ql^2}{16}. \quad (35)$$

Експериментальні та теоретичні значення рівномірно-розподіленого навантаження та згинальних моментів, при яких відбулось руйнування дослідних плит наведені в табл. 7.

Таблиця 7

Експериментальні та теоретичні значення несучої здатності дослідних плит

Но- мер серії	Марка плити	Навантаження при руйнуванні $q_w, \text{кН/м}^2$		Момент при руйнуванні, $M_w, \text{кНм}$		
		однієї плити	середнє	експери- ментальний	теоретичний	
					по X	по Y
I	I-ПП-0.7/0.0-1	194,77	198,54	2,130	2,158	2,118
	I-ПП-0.7/0.0-2	202,31				
	I-ПП-0.7/0.3-1	239,34	241,33	2,595	2,600	2,515
	I-ПП-0.7/0.3-2	244,32				
	I-ПП-0.7/0.7-1	260,45	262,42	2,812	2,827	2,827
	I-ПП-0.7/0.7-2	264,39				
	I-ПП-У-1	160,91	162,37	1,739	1,758	1,758
	I-ПП-У-2	163,83				
II	II-ПП-0.7/0.0-1	158,62	162,48	1,751	1,771	1,851
	II-ПП-0.7/0.0-2	166,35				
	II-ПП-0.7/0.3-1	203,82	205,46	2,203	2,217	2,201
	II-ПП-0.7/0.3-2	207,10				
	II-ПП-0.7/0.7-1	226,39	221,00	2,369	2,378	2,378
	II-ПП-0.7/0.7-2	215,71				
	II-ПП-У-1	135,95	141,29	1,516	1,530	1,530
	II-ПП-У-2	146,63				

При випробуванні дослідних зразків-плит встановлено, що перші тріщини виникли перпендикулярно до осі, вздовж якої був менший рівень обтиску від напруженої арматури (вісь Y). Після подальшого збільшення навантаження виникають тріщини в іншому напрямку, перпендикулярному до осі X. В плитах марок I-ПП-0.7/0.7, II-ПП-0.7/0.7 та I-ПП-У, II-ПП-У виникли одночасно в двох напрямках. Схеми розташування тріщин на нижніх поверхнях плит серії I та II наведені на рис. 23 та 24.

Розрахунок тріщиностійкості плит виконуємо вздовж осей X та Y, враховуючи такі передумови:

1. Перерізи після деформацій залишаються плоскими і деформації по висоті перерізу елемента змінюються за лінійним законом.

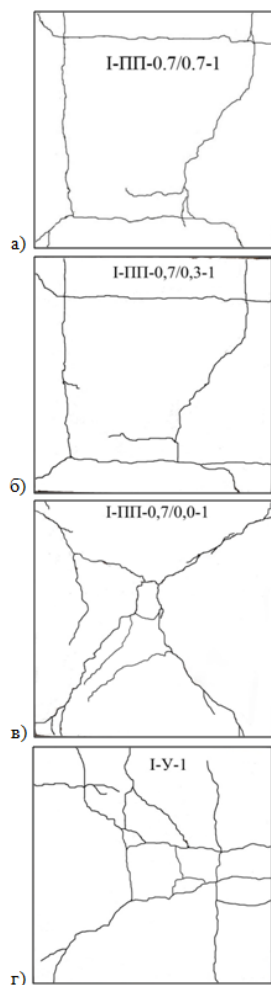


Рис. 23. Розміщення тріщин на нижніх поверхнях плит серії I після руйнування

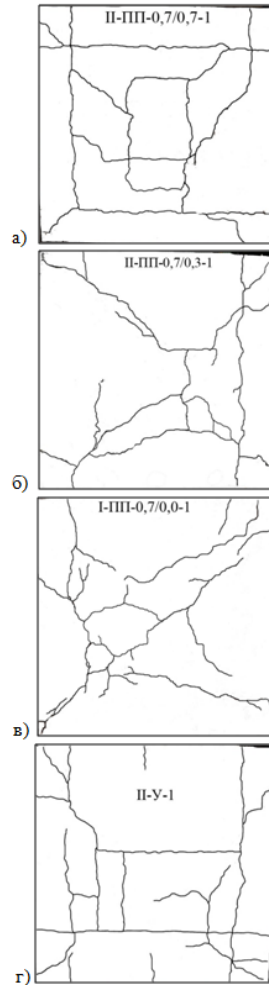
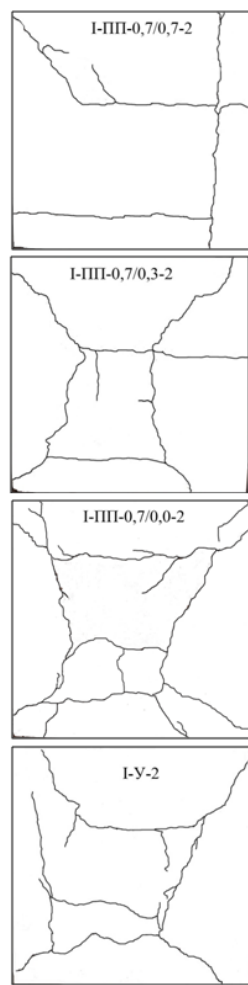
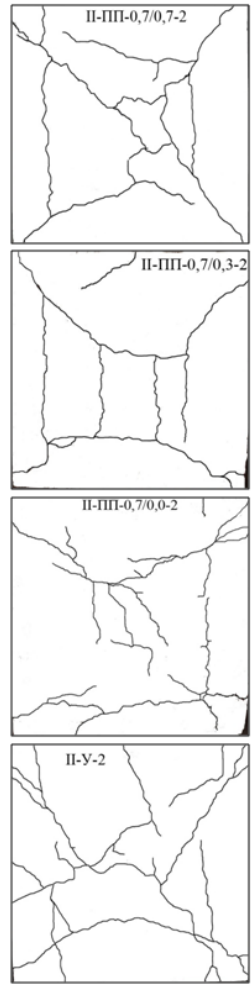


Рис. 24. Розміщення тріщин на нижніх поверхнях плит серії II після руйнування



2. В сталевібробетоні розтягнутої зони розвиваються не пружні деформації, максимальні значення яких становлять $\varepsilon_{cfu} = -2f_{cfu} / E_{cf}$.

3. Напруження в стиснутій зоні СФБ можна визначати тільки з урахуванням пружних деформацій. При обмеженні напружень в стиснутій зоні величиною $\sigma_{cf} \leq 0,6f_{cfk}$ нелінійні деформації стиснутої зони незначні, тому еюра напружень в стиснутій зоні близька до трикутної.

4. Напруження в ненапруженій арматурі дорівнюють напруженням, що відповідають приросту деформацій навколишнього СФБ. Напруження в такій арматурі, яка розташована поблизу крайнього розтягнутого волокна (без урахування впливу усадки і повзучості) становлять $(2f_{cfu} / E_{cf})E_s = 2\alpha f_{cfu}$.

5. Напруження в напруженій арматурі становлять $\sigma_{sp} + 2\alpha f_{cfu}$, тобто є сумою попереднього напруження (з урахуванням усіх втрат) і напруження, що відповідає приросту пружних деформацій навколишнього СФБ після погашення обтиску.

6. Напруження в стиснутій зоні СФБ можна визначати тільки з урахуванням пружних деформацій. При обмеженні напружень в стиснутій зоні величиною

$\sigma_{cf} \leq 0,6 f_{cfk}$ нелінійні деформації стиснутої зони незначні, тому еюра напружень в стиснутій зоні близька до трикутної.

7. Напруження в ненапруженій арматурі дорівнюють напруженням, що відповідають приросту деформацій навколишнього СФБ. Напруження в такій арматурі, яка розташована поблизу крайнього розтягнутого волокна (без урахування впливу усадки і повзучості) становлять $(2f_{cfu} / E_{cf}) E_s = 2\alpha f_{cfu}$.

8. Напруження в напруженій арматурі становлять $\sigma_{sp} + 2\alpha f_{cfu}$, тобто є сумою попереднього напруження (з урахуванням усіх втрат) і напруження, що відповідає приросту пружних деформацій навколишнього СФБ після погашення обтиску.

Експериментальні значення рівномірно-розподіленого навантаження, при яких виникали перші тріщини в дослідних плитах наведені в табл. 8.

Таблиця 8

Експериментальні і теоретичні значення тріщиностійкості дослідних плит серії I та II

Но- мер серії	Марка плити	Навантаження при утворенні тріщин q_{crc} кН/м ²		Момент тріщиноутворення, M_{crc} , кНм		
		однієї плити	середнє	експери- ментальний	теоретичний	
					по X	по Y
I	I-ПП-0.7/0.0-1	23,95	24,23	0,742	1,525	0,610
	I-ПП-0.7/0.0-2	25,51				
	I-ПП-0.7/0.3-1	53,75	53,13	1,627	1,838	1,553
	I-ПП-0.7/0.3-2	52,51				
	I-ПП-0.7/0.7-1	68,89	69,03	2,114	1,99	1,99
	I-ПП-0.7/0.7-2	69,17				
	I-ПП-У-1	20,09	20,18	0,618	0,578	0,578
	I-ПП-У-2	20,27				
II	II-ПП-0.7/0.0-1	24,53	23,93	0,733	1,279	0,647
	II-ПП-0.7/0.0-2	23,33				
	II-ПП-0.7/0.3-1	48,87	49,08	1,503	1,629	1,461
	II-ПП-0.7/0.3-2	49,29				
	II-ПП-0.7/0.7-1	63,26	63,15	1,934	1,766	1,766
	II-ПП-0.7/0.7-2	63,14				
	II-ПП-У-1	19,45	19,76	0,605	0,609	0,609
	II-ПП-У-2	20,13				

Аналізуючи експериментальні значення q_{crc} можна зробити висновок, що найбільша тріщиностійкість виявилась в двохосно попередньо-напружених плитах з однаковим рівнем обтиску у двох напрямках (плити I-ПП-0.7/0.7 та II-ПП-0.7/0.7). Дещо нижча несуча здатність в плитах з різним рівнем обтиску (плити I-ПП-0.7/0.3 та II-ПП-0.7/0.3), яка була на 29,9...28,7% меншою від плит I-ПП-0.7/0.7 та II-ПП-0.7/0.7. Ще нижчою виявилась тріщиностійкість одноосно напружених плит (I-ПП-

0.7/0.0 та II-ПП-0.7/0.0), яка була в 2,6...2,8 разів меншою від плит I-ПП-0.7/0.7 та II-ПП-0.7/0.7 та в 2,1...2,2 рази меншою від плит I-ПП-0.7/0.3 та II-ПП-0.7/0.3.

Найнижчою тріщиностійкість виявилась в плитах без попереднього напруження (I-ПП-У та II-ПП-У), яка була в 3,2...3,4 рази меншою від плит I-ПП-0.7/0.7 та II-ПП-0.7/0.7, в 2,5...2,6 рази меншою від плит I-ПП-0.7/0.3 та II-ПП-0.7/0.3 та на 20,1...21,1% меншою від плит I-ПП-0.7/0.0 та II-ПП-0.7/0.0.

Також встановлено, що тріщиностійкість плит I-ї серії була вищою від плит II-ї серії на 8,3...9,3%.

Таким чином, результати експериментальних досліджень свідчать, що попереднє напруження суттєво впливає на величину тріщиностійкості плит. Також, спостерігається зменшення тріщиностійкості при зростанні інтенсивності обтиску бетону попередньо-напруженою арматурою у напрямку осі У.

В таблиці 8 наведені експериментальні та теоретичні значення згинальних моментів, при яких виникали перші тріщини дослідних зразках. Аналіз теоретичних розрахунків плит з різними рівнями бокового обтиску показав незначну різницю між згинальними моментами вздовж осей Х та У. Так, в плиті марки I-ПП-0.7/0.3 вона становила 18,4%, а в плитах марки II-ПП-0.7/0.3 – 11,5%. В одноосно обтиснутих плитах різниця між значеннями моментами вздовж осей Х та У вона становить 2,5 рази в плитах марки I-ПП-0.7/0.0 та 1,98 рази - в плитах марки II-ПП-0.7/0.0.

Різниця значень експериментальних та теоретичних згинальних моментів тріщиноутворення становить 1,0...9,5%.

У п'ятому розділі наведені експериментально-теоретичні дослідження прогинів двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит при поперечних навантаженнях.

Для розрахунку прогинів дослідних зразків-плит використовуємо нелінійну розрахункову модель.

Згідно діючих ДСТУ

$$f_m = \int_0^l M_x \left(\frac{1}{r} \right)_x dx, \quad (36)$$

де M_x - згинальний момент у перерізі x від дії одиночної сили, прикладеної у перерізі x у напрямку шуканого переміщення;

$(1/r)_x$ - кривизна у перерізі, визначена при навантаженні, за якого визначається прогин

Для статично визначених елементів постійного перерізу, які працюють за балковою схемою, прогин допускається визначати за формулою ДСТУ

$$f = k_m \left(\frac{1}{r} \right) l^2 = k_m \cdot \aleph \cdot l^2, \quad (37)$$

де l - розрахунковий проліт;

k_m - коефіцієнт, що залежить від умов закріплення і схеми навантаження елемента (таблиця 5.5 ДСТУ).

Для шарнірного опирання та рівномірно-розподіленого навантаження коефіцієнт $k_m = 5/48$.

Значення кривизни \aleph беремо з розрахунку несучої здатності та тріщиностійкості дослідних зразків-плит.

Узагальнені графіки теоретичних прогинів дослідних плит I та II серії наведені на рис. 25 та 26. Аналіз даних графіків показав, що найбільші прогини виникають у плит без попереднього напруження марок I-ПП-У та II-ПП-У.

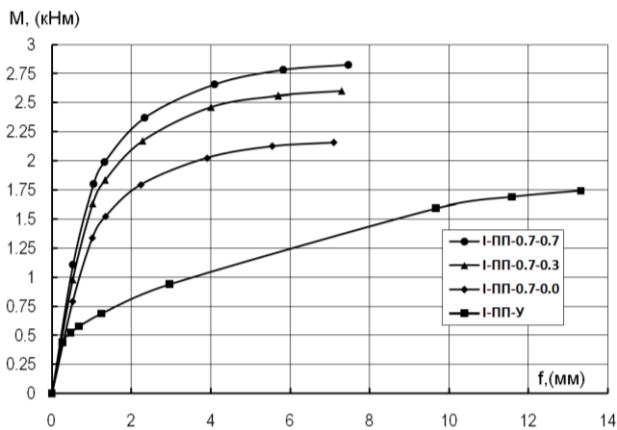


Рис. 25. Графік «момент-прогин» плит I серії

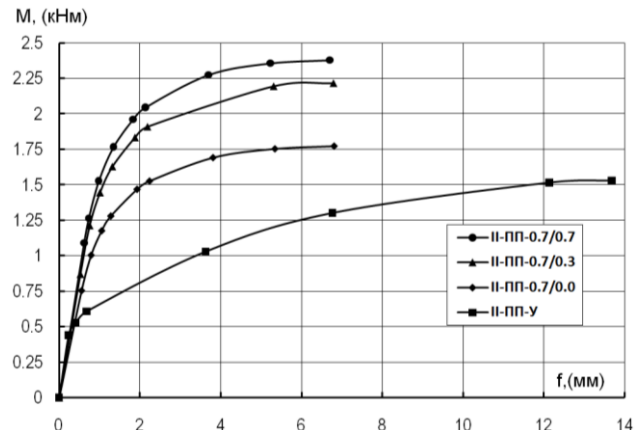


Рис. 26. Графік «момент-прогин» плит II серії

У шостому розділі запропонований загальний алгоритм розрахунку згинальних елементів прямокутного перерізу, армованого звичайною та попередньо-напруженою арматурою, а також сталюю фіброю.

Напружено-деформований стан прямокутного комбіновано-армованого перерізу наведено на рис. 27.

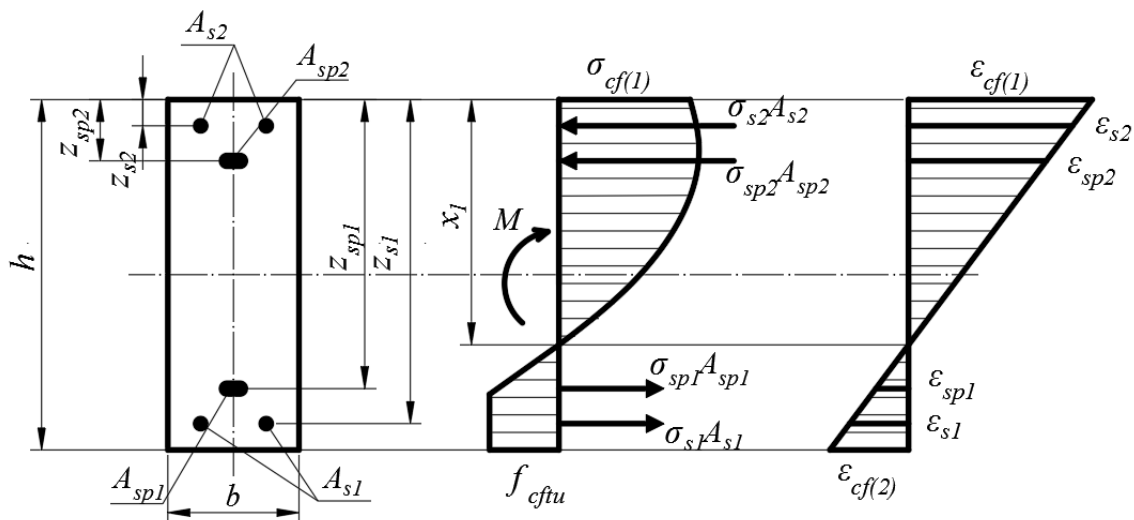


Рис. 27. Напружено-деформований стан прямокутного комбіновано-армованого перерізу

За критерій вичерпання несучої здатності по нормальному перерізу СФБ елемента приймається руйнування СФБ при досягненні фібровими деформацій граничних значень $\epsilon_{cfu} = -2f_{cfu} / E_{cf}$. Тоді значення граничного згинального моменту в напрямку однієї осей M_u для СФБ згинальних елементів прямокутного перерізу з попередньо-напруженою арматурою рекомендується визначати за формулами (рис. 19):

$$\frac{bf_{cf}k_c}{\aleph} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1} - \frac{3}{4} bf_{cft} (h-x_1) + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} = 0; \quad (38)$$

$$\frac{bf_{cf}k_c}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2} - \frac{11}{24} bf_{cft} (h-x_1)^2 + \sum_{i=1}^n \sigma_{si} A_{si} (x_1 - z_{si}) - M = 0. \quad (39)$$

В залежностях (38), (39) усі величини такі, як у формулах (15)...(20).

Представимо рівняння (38), (39) у вигляді

$$N_{cf} - N_{cft} + N_s = 0; \quad (40)$$

$$M_{cf} + M_{cft} + M_s = M, \quad (41)$$

де: N_{cf} , M_{cf} - зусилля в стиснутій зоні СФБ;

N_{cft} , M_{cft} - зусилля в розтягнутій зоні СФБ;

N_s , M_s - сумарні зусилля в арматурі.

Розпишемо значення внутрішніх зусиль

$$N_{cf} = \frac{bf_{cf}}{\aleph} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1}; \quad (42)$$

$$N_{cft} = \frac{3}{4} bf_{cft} (h-x_1); \quad (43)$$

$$N_s = \sigma_{s2} A_{s2} + \sigma_{sp2} A_{sp2} - \sigma_{s1} A_{s1} - \sigma_{sp1} A_{sp1}; \quad (44)$$

$$M_{cf} = \frac{bf_{cf}}{\aleph^2} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+2} \gamma^{k+2}; \quad (45)$$

$$M_{cft} = \frac{11}{24} bf_{cft} (h-x_1)^2; \quad (46)$$

$$M_s = A_{s1} E_{s1} \aleph (x_1 - z_{s1})^2 + A_{sp1} E_{sp1} (\aleph (x_1 - z_{sp1}) - \varepsilon_{p01}) (x_1 - z_{sp1}) + \\ + A_{s2} E_{s2} \aleph (x_1 - z_{s2})^2 + A_{sp2} E_{sp2} (\aleph (x_1 - z_{sp2}) - \varepsilon_{p02}) (x_1 - z_{sp2}), \quad (47)$$

де ε_{p0i} - відносні деформації, викликані попереднім напруженням арматури з урахуванням усіх втрат.

Напруження у звичайній та попередньо-напруженій арматурі:

$$\sigma_{si} = E_{si} \aleph (x_1 - z_{si}); \quad (48)$$

$$\sigma_{spi} = E_{spi} (\aleph (x_1 - z_{spi}) - \varepsilon_{p0i}). \quad (49)$$

Величину кривизни пропонується визначати за формулами

$$\aleph = \frac{-b_{\Sigma} + \sqrt{b_{\Sigma}^2 - 4a_{\Sigma}c_{\Sigma}}}{2a_{\Sigma}}, \quad (50)$$

$$\text{де: } a_{\Sigma} = A_{s1} E_{s1} z_{s1} + A_{s2} E_{s2} z_{s2} + A_{sp1} E_{sp1} z_{sp1} + A_{sp2} E_{sp2} z_{sp2}; \quad (51)$$

$$b_{\Sigma} = \frac{3}{4} bhf_{cft} - \varepsilon_{cf(1)} (A_{s1} E_{s1} + A_{s2} E_{s2} + A_{sp1} E_{sp1} + A_{sp2} E_{sp2}) + \\ + A_{sp1} E_{sp1} \varepsilon_{p01} + A_{sp2} E_{sp2} \varepsilon_{p02}; \quad (52)$$

$$c_{\Sigma} = -\frac{3}{4} b f_{cft} \varepsilon_{cf(1)} - b f_{cf} \varepsilon_{cf1} \sum_{k=1}^5 \frac{a_k}{k+1} \gamma^{k+1}. \quad (53)$$

Після визначення кривизни \aleph її значення підставляють у формули (45)... (47) для визначення моментів M_{cf} , M_{cft} та M_s . Після цього за формулою (41) визначаємо згинальний момент M , який відповідає кривизні \aleph . Розрахунок виконується покроково для кожного значення відносних деформацій в стиснутій зоні перерізу $\varepsilon_{c(1)}$, яке послідовно збільшується на величину $\Delta\varepsilon_{c(1)}$.

На кожному кроці розрахунку необхідно контролювати напруження в попередньо-напруженій арматурі, яка розташована в розтягнутій зоні перерізу. Для цього використовуємо діаграму « σ - ε » для напруженої сталі за ДБН (рис. 28).

При досягненні напружень значення $\sigma_{sp} \geq f_{pd}$ в наступних кроках напруження в попередньо-напруженій арматурі необхідно визначати за формулою

$$\sigma_{sp} = f_{pd} + \left(\frac{f_{pk}}{\gamma_s} - f_{pd} \right) \frac{\varepsilon_{sp} - \varepsilon_{p0}}{\varepsilon_{ud} - \varepsilon_{p0}}, \quad (54)$$

де: $f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}$; $\varepsilon_{p0} = \frac{f_{pd}}{E_p}$; $\varepsilon_{ud} = 0,9\varepsilon_{uk}$; $\varepsilon_{sp} = \aleph(x_l - z_{sp}) - 0,0021$.

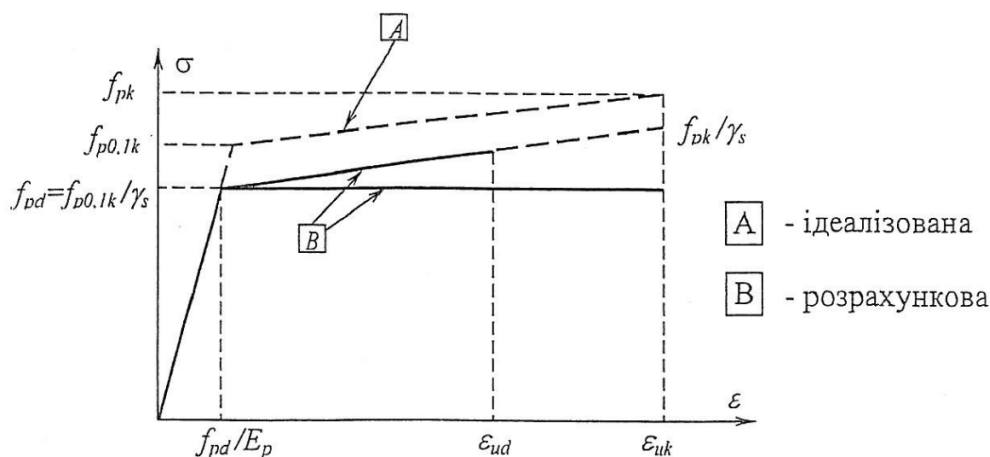


Рис. 28. Ідеалізована та розрахункова діаграма « σ - ε » для напруженої сталі

Для улаштування аеродромних покриттів та вертолітних площадок використовують збірні залізобетонні попередньо-напружені плити ПАГ-14, які відповідають діючим ДСТУ Б В.2.6-136:2010. Конструкції будинків і споруд. Плити залізобетонні попередньо напружені ПАГ-14 для аеродромного покриття. Плити мають розміри в плані 6,0×2,0 м та товщину 140 мм (рис. 29).

Плити виготовляють з бетону класу С20/25 та армують повздовжньою попередньо-напруженою арматурою 5Ø14Ат-V у двох рівнях та арматурними сітками С2 у двох рівнях з арматурою Ø5Вр-I з кроком 100 мм, розташованою в поперечному напрямку плити, та по 4Ø5Вр-I, розташованою в поздовжньому напрямку плити (рис. 29). В торцевих частинах влаштовані сітки С1 у двох рівнях з арматурою 4Ø8А400С, розташованою в поперечному напрямку плити, та 2Ø5Вр-I+2Ø8А400С, розташованою в поздовжньому напрямку плити.

У результаті порівняльного розрахунку встановлено, що несуча здатність плити ПАГ-14, у якій арматурні сітки були замінені сталюю фіброю, становила

$M_u=86,73$ кНм (рис. 39). Несуча здатність стандартної плити ПАГ-14 становила $M_u=71,49$ кНм, що менше на 21,3%.

Ефективність плити зі сталюю фіброю полягає в тому, що сталюа фібра майже повністю замінює арматурні сітки загальною вагою 72,0 кг. Також відсутні витрати на виготовлення цих сіток. Порівняльний розрахунок показав що є можливість зменшення кількості високоміцної попередньо-напруженої арматури до 10...15%.

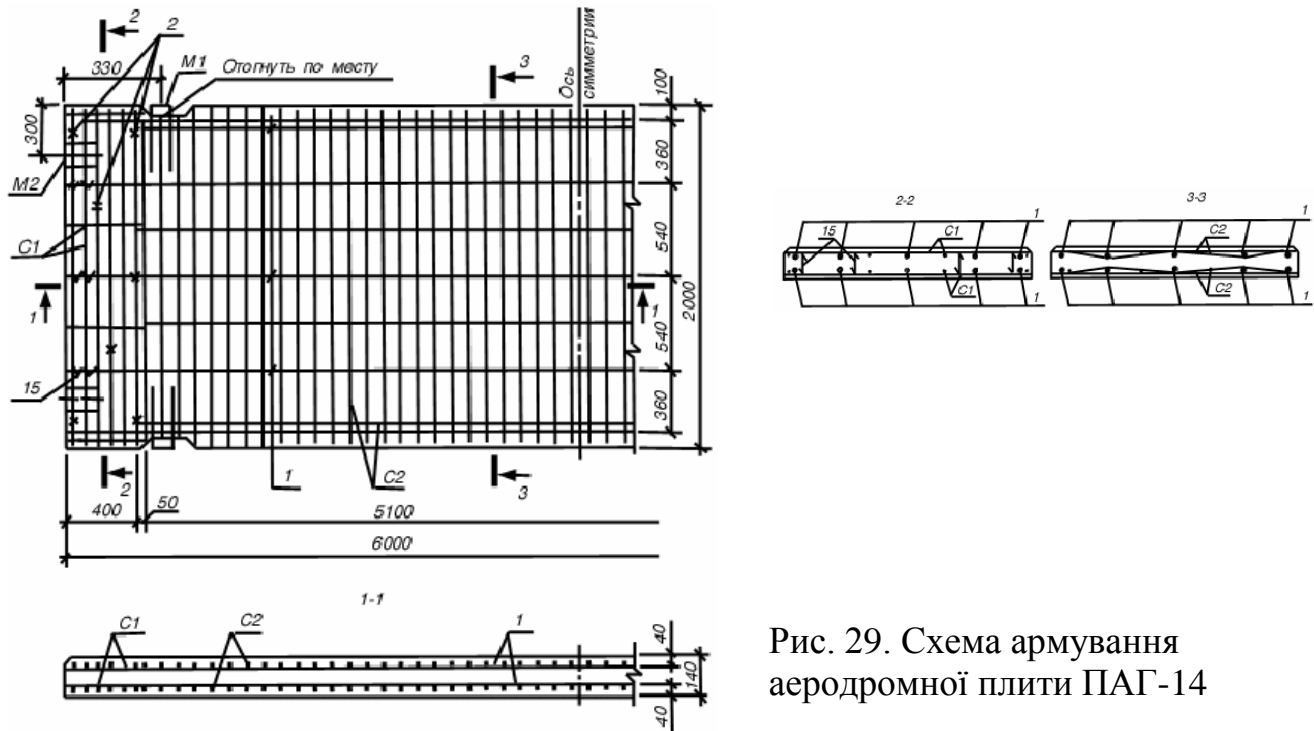


Рис. 29. Схема армування аеродромної плити ПАГ-14

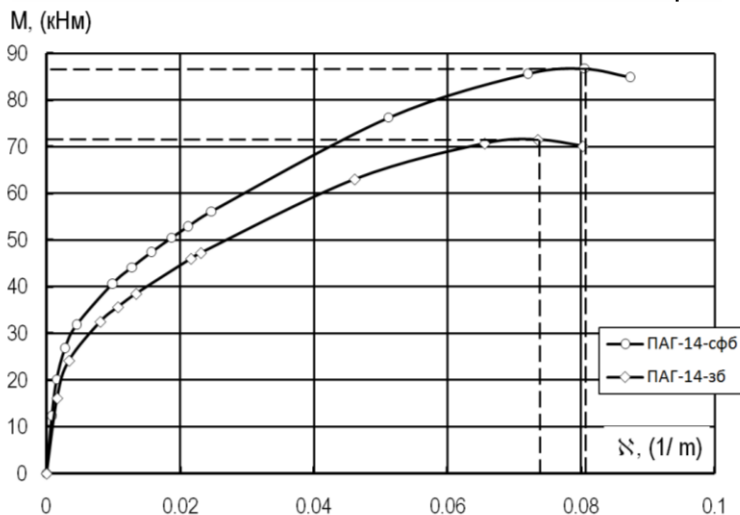


Рис. 30. Графіки «момент-кривизна» при розрахунку плити ПАГ-14 з металевою фіброю та стандартної плити

Завдяки хорошим властивостям сталеві фібробетону протидії стиранню тривалість експлуатації їх набагато більша від залізобетонних.

Для улаштування дорожніх покриттів використовують збірні залізобетонні попередньо-напружені плити марок П60.38, П60.35 та П60.30, які відповідають діючим ДСТУ Б В.2.6-120:2010. Конструкції будинків і споруд. Плити залізобетонні для покриття міських доріг. Плити марки П60.38 мають розміри в плані 6,0×3,75 м, марки П60.35 - 6,0×3,5 м, марки П60.30 - 6,0×3,0 м та товщину 140 мм (рис. 31).

Плити виготовляють з бетону класу С25/30 та армують попередньо-напруженою арматурою у двох напрямках (рис. 31). Плита марки П60.38 армується арматурою 24Ø10Ат-V, розташованою в поздовжньому напрямку плити у двох рівнях, та 18Ø12Ат-V, розташованою в поперечному напрямку плити по центру. Плита марки П60.35 армується арматурою 22Ø10Ат-V, розташованою в поздовжньому напрямку плити у двох рівнях, та 18Ø12Ат-V, розташованою в поперечному напрямку плити по центру. Плита марки П60.30 армується арматурою 20Ø10Ат-V, розташованою в поздовжньому напрямку плити у двох рівнях у двох рівнях, та 18Ø12Ат-V, розташованою в поперечному напрямку плити по центру.

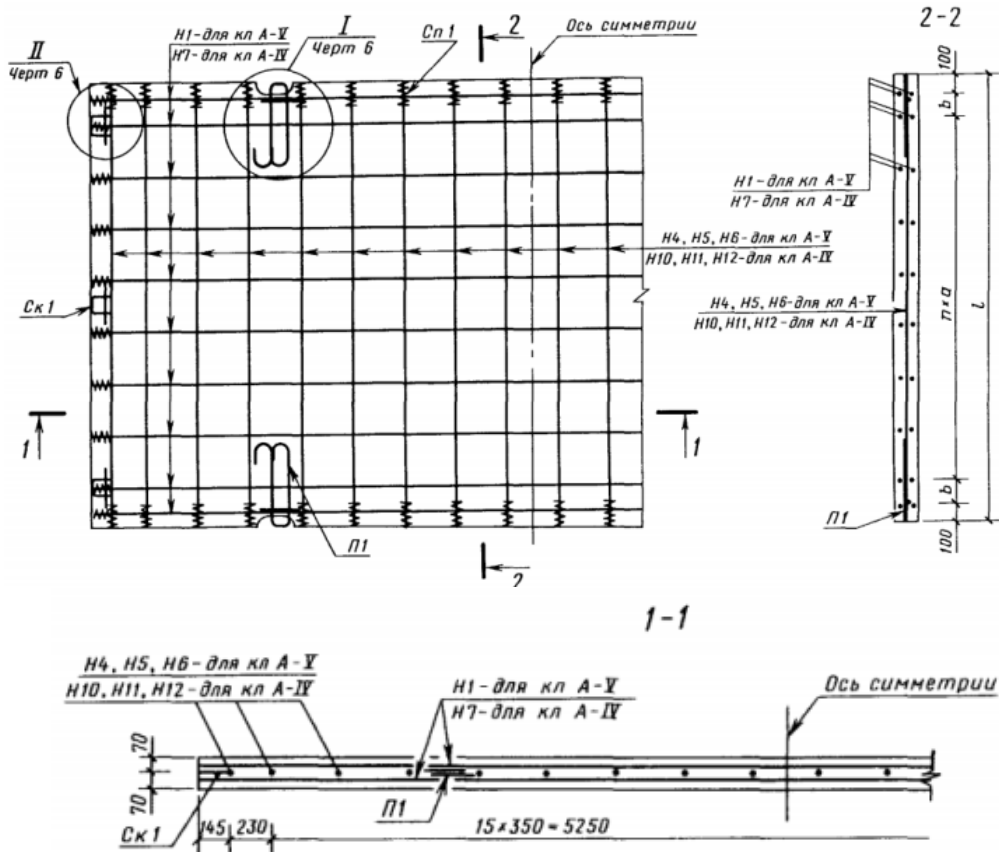


Рис. 31. Схема армування плит марок П60.38, П60.35 та П60.30

У результаті порівняльного розрахунку встановлено, що несуча здатність плити П60.38 з металевою фіброю, становила $M_u=180,3$ кНм, що більше за несучу здатність стандартної плити ($M_u=144,9$ кНм) на 24,4% (рис. 32).

Ефективність плити зі сталюю фіброю полягає в тому, що сталюа фібра дає можливість зменшення кількості високоміцної попередньо-напруженої арматури з 24Ø10Ат-V до 16Ø10Ат-V. При цьому несуча здатність плити зі сталюю фіброю набагато вища. Також зменшується кількість попередньо-напруженої арматури у поперечному напрямку на 15...20%.

Завдяки хорошим властивостям сталефіробетону протидії стиранню тривалість експлуатації їх набагато більша від залізобетонних.

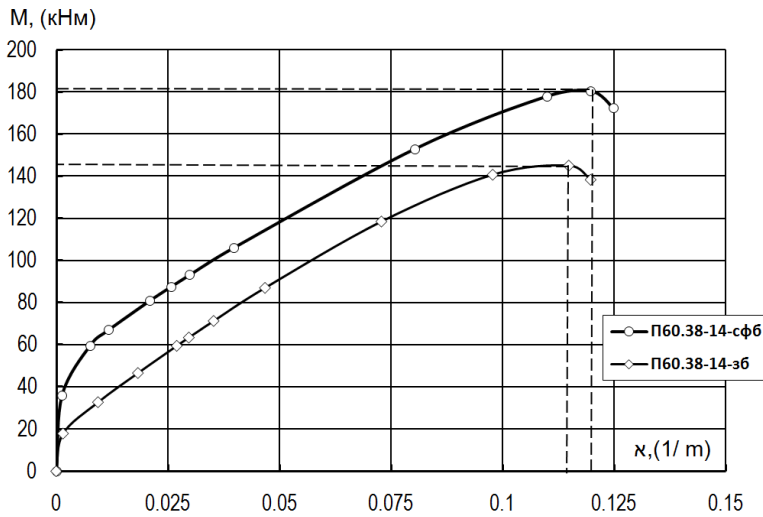


Рис. 32. Графіки «момент-кривизна» при розрахунку плити П60.38 з металевою фіброю та стандартної плити

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті досліджень, проведених у дисертації, вирішено важливу науково-технічну проблему розрахунку двохосно попередньо-напружених плитних сталевібробетонних елементів з урахуванням роботи сталевібробетону в розтягнутій зоні, з використанням повної діаграми «напруження-деформації» сталевібробетону в стиснутій зоні перерізу в умовах двохосного напружено-деформованого стану, що дозволяє зробити такі висновки:

1. На основі аналізу проведених патентних та інформаційно-методологічних досліджень вдосконалено існуючі і розроблено нові конструктивно-технологічні рішення двохосно попередньо-напружених плит, які мають широке використання в будівництві.
2. Проведений комплекс експериментальних досліджень двохосно попередньо-напружених плит з включенням до складу бетону сталевібри на дію поперечних навантажень. Були випробувані дві серії зразків з різними типами сталевібри. В дослідних плитах варіювався рівень двостороннього обтиску.
3. Розроблена та запропонована методика розрахунку несучої здатності та тріщиностійкості двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит на основі деформаційного методу, верифікація якої виконана на основі експериментальних досліджень. Запропоновані залежності для визначення кривизни згинального плитного елемента.
4. Виконаний комплекс експериментальних досліджень сталевібробетонних зразків при одноосному та двохосному тривалому стиску, який дав можливість отримати графіки повзучості сталевібробетону та вивчити закономірності їх зміни в залежності від рівня обтиску у двох напрямках.
5. Розроблена та запропонована методика розрахунку відносних деформацій повзучості сталевібробетону при одноосному та двохосному стиску з урахуванням нелінійної роботи сталевібробетону. При цьому використана модель ортотропного тіла з осями ортотропії, які співпадають з напрямком дії головних напружень. Запропоновані залежності для визначення міри

повзучості сталевібробетону та коефіцієнта поперечних деформацій у нелінійній постановці.

6. Запропонований критерій визначення межі переходу швидкоплинної повзучості сталевібробетону до тривалої повзучості, використовуючи запропоновані залежності для визначення швидкості та прискорення відносних деформацій повзучості в умовах одноосного та двохосного стиску.
7. Виконаний комплекс експериментальних досліджень втрат попереднього напруження в арматурі двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит дали можливість отримати закономірності зміни напружень в арматурі, викликані миттєвими деформаціями та деформаціями усадки та повзучості.
8. Розроблена та запропонована методика розрахунку втрат попереднього напруження в арматурі двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит, викликаних миттєвими деформаціями та деформаціями усадки та повзучості, верифікація якої виконана на основі експериментальних досліджень.
9. Запропонована методика розрахунку прогинів двохосно попередньо-напружених СФБ плит на основі деформаційного методу з використанням залежності «момент-кривизна» в умовах двохосного напружено-деформованого стану. Результати розрахунку дали хорошу збіжність з експериментальними даними.
10. Розроблена та запропонована загальна методика розрахунку несучої здатності комбіновано армованих згинальних елементів зі ненапруженою та попередньо-напруженою арматурою, розташованою у двох напрямках на основі деформаційного методу. Запропоновані залежності для визначення кривизни комбіновано армованих згинальних елементів.
11. На основі розробленої методики виконаний порівняльний розрахунок збірних залізобетонних одноосно попередньо-напружених плит аеродромних покриттів ПАГ-14 з включенням металевої фібри та стандартної плити, у результаті якого встановлено, що несуча здатність плити зі сталюю фіброю вища від стандартної на 21,3%.
12. На основі розробленої методики виконаний порівняльний розрахунок збірних залізобетонних плит двохосно попередньо-напружених дорожніх покриттів П60.38, П60.35, П60.30 з включенням металевої фібри та стандартних плит, у результаті якого встановлено, що несуча здатність плит зі сталюю фіброю вища від стандартних на 20...25%.
13. Ефективність плит зі сталюю фіброю полягає в тому, що сталюа фібра майже повністю замінює арматурні сітки. Також відсутні витрати на виготовлення цих сіток. Також є можливість зменшення кількості високоміцної попередньо-напруженої арматури до 10...15%. Завдяки хорошим властивостям сталевібробетону протидії стиранню тривалість експлуатації плит аеродромних та дорожніх покриттів набагато більша від стандартних залізобетонних.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз:

1. Panchenko O.V. (2017) Determination of the Durability of Ferroconcrete Bridge Beams Reinforced by Composite Strips / Panchenko O.V., Ivanytskyi Y.L., Kun P.S., Zhuravskiy O.D. // Materials Science. March 2018, Volume 53, Issue 5, pp. 660–665. (SCOPUS - <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0121-3>). *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.
2. Kozak O. Experimental research of the influence of curved reinforcement steel without adhesion to the concrete on the bearing capacity of inclined sections at post-tensioning / O.Kozak, O.Zhuravskiy // USEFUL online journal, vol. 2, no. 2, pp. 34–41, Jun. 2018. (Index Copernicus, Ulrichsweb, BASE - DOI: <https://doi.org/10.32557/useful-2-2-2018-0004>). *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.
3. Zhuravskiy O. Experimental and theoretical studies of biaxially prestressed steel-fiber-concrete slabs / O.Zhuravskiy, A.Gorobetc // USEFUL online journal, vol. 2, no. 3, pp. 10–14, Oct. 2018. (Index Copernicus, Ulrichsweb, BASE - DOI: <https://doi.org/10.32557/useful-2-3-2018-0003>). *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.
4. Zhuravskiy O. Calculation of flat reinforced concrete slabs strengthened by post-stressed rebars in two directions / O.Zhuravskiy, V.Tymoschuk // USEFUL online journal, vol. 2, no. 4, pp. 63–69, Oct. 2018. (Index Copernicus, Ulrichsweb, BASE - DOI: <https://doi.org/10.32557/useful-2-4-2018-0007>). *(Наведена методика розрахунку)*.
5. Kozak O. Effect of the pre-stressed reinforcement curvature on the bearing capacity of inclined sections of monolithic beams / O. Kozak, O. Zhuravskiy, M. Delyavskyy // Cite as: AIP Conference Proceedings 2077, 020027 (2019); (SCOPUS - <https://doi.org/10.1063/1.5091888>. Published Online: 21 February 2019). *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.
6. Smorkalov D. Experimental and theoretical studies of single and double-layer slabs supported on four sides / D. Smorkalov, O. Zhuravskiy, M. Delyavskyy // Cite as: AIP Conference Proceedings 2077, 020052 (2019). (SCOPUS - <https://doi.org/10.1063/1.5091913>. Published Online: 21 February 2019). *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.
7. Zhuravskiy O.D. Bearing capacity of steel-fiber-concrete slabs with biaxially prestressed reinforcement // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA, 2020. – Issue 105. – P. 292-301. (Web of Science - DOI: [10.32347/2410-2547.2020.105.292-301](https://doi.org/10.32347/2410-2547.2020.105.292-301)). *(Наведена методика розрахунку)*.

Статті у наукових фахових виданнях України:

8. Барашиков А. Дослідження міцності та тріщиностійкості двохосно попередньо-напружених плит / А.Барашиков, А.Журавский, Х.Фам // Вісник Львівського державного аграрного університету: Архітектура і сільськогосподарське будівництво №1. – Львів: Львів. держагроуніверситет, 2000, С. 64-68. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.
9. Барашиков А.Я. Прогибы двухосно преднапряженных плит при поперечном изгибе / Барашиков А.Я., Журавский А.Д., Фам Х.М. // Ресурсоекономні

матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип. 4. - Рівне, 2000, С. 111-115. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

10. Барашиков А.Я. Дослідження деформативності двовісно попередньо напружених плит при поперечному згині / Барашиков А.Я., Журавський О.Д. // Механіка та фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць. Випуск 4. / За заг. ред. Андрейківа О.Є., Лучко Й.Й. - Львів: Каменяр, 2000, С. 242-253. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

11. Барашиков А.Я. Експериментальні дослідження міцності та тріщиностійкості плит, підсилених сталевібробетоном / Барашиков А.Я., Журавський О.Д., Цибульник І.О. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип. 6. - Рівне, 2001, С. 255-258. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

12. Барашиков А.Я. Прочность и трещиностойкость двухосно преднапряженных плит при поперечном изгибе / А.Я.Барашиков, А.Д.Журавский, Фам Хоанг Минь Хуан // Науково-практичні проблеми моделювання та прогнозування надзвичайних ситуацій: Збірник наукових статей. Випуск 4. – К.: МНС України, 2001, С. 129-133. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

13. Журавський О.Д. Дослідження плит, підсилених сталевібробетоном / Журавський О.Д., Цибульник І.О. // Будівельні конструкції. Випуск 54. – Київ, 2001, С. 268-270. *(Розроблена постановка задачі, виконаний огляд існуючих методик та сформульовані загальні висновки)*.

14. Журавський О.Д. Методика та результати експериментальних досліджень двошарових плит / Журавський О.Д., Сморгалов Д.В. // Сталезалізобетонні конструкції. Дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: Збірник наукових статей. Випуск 5. – Кривий Ріг: КТУ, 2002, С. 144-147. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

15. Цибульник І.О. Експериментальні та теоретичні графіки прогинів плит, зміцнених шаром сталевібробетону / І.О.Цибульник, О.Д.Журавський // Механіка та фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць. Випуск 5. / За заг. ред. Андрейківа О.Є., Лучка Й.Й., Божидарника В.В. - Львів: Каменяр, 2002, С. 293-296. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

16. Журавський О.Д. Робота двохосно стиснутих бетонних плит при тривалих навантаженнях / Журавський О.Д., Колякова В.М. // Сталезалізобетонні конструкції. Дослідження, проектування, будівництво, експлуатація: Збірник наукових статей. Випуск 5. – Кривий Ріг: КТУ, 2002, С. 187-194. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

17. Цибульник І.О. Дослідження деформативності попередньо-напружених плит до та після підсилення сталевібробетоном / Цибульник І.О., Журавський О.Д. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип. 9. - Рівне, 2003, С. 343-347. *(Наведена методика розрахунку)*.

18. Барашиков А.Я. Експериментальні дослідження двошарових плит / Барашиков А.Я., Журавський О.Д., Сморгалов Д.В. // Міжвідомчий наук.-техн.

збірник наукових праць. Вип. 59: Київ, НДІБК, 2003. С.109-114. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

19. Барашиков А.Я. Дослідження попередньо-напружених плит до та після підсилення шаром сталевібробетону / Барашиков А.Я., Журавський О.Д., Цибульник І.О. // Будівельні конструкції. Вип. 60, Київ: НДІБК, 2004. С.551-558. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

20. Барашиков А.Я. Особливості розрахунку плит, підсилених шаром сталевібробетону / Барашиков А.Я., Журавський О.Д. // Механіка та фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць. Випуск 6. За заг. ред. Лучка Й.Й. - Львів: Каменяр, 2005. С. 416-425. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

21. Горобець А.М. Методика експериментальних досліджень повзучості сталевібробетону при одноосному і двоосному стиску / Горобець А.М., Журавський О.Д. // Механіка та фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць. Випуск 6. За заг. ред. Лучка Й.Й. - Львів: Каменяр, 2005, С. 305-310. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

22. Горобець А.М. Експериментальні дослідження напружено-деформованого стану сталевібробетону при одноосному і двоосному стиску / Горобець А.М., Журавський О.Д. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип.13. – Рівне, 2005. С.114-121. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

23. Горобець А.М. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния сталефибробетона при одноосном и двухосном сжатии / Горобець А.М., Журавський О.Д. // Вісник ДонДАБА. – Макіївка: ДонДАБА. – Вип. 2005-8(56). – 2005. –С. 137-141. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

24. Горобець А.М. Експериментально-теоретичні дослідження втрат попереднього напруження в сталевібробетонних конструкціях при одновісному та двовісному обтиску / А.М.Горобець, О.Д.Журавський // Теорія і практика будівництва: Вісник НУ «Львівська політехніка». № 600. – Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2007, С. 68-74. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

25. Горобець А.М. Дослідження втрат попереднього напруження в сталевібробетонних плитах при одноосному та двоосному обтиску / Горобець А.М., Журавський О.Д. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип. 16, частина 2. - Рівне, 2008, С. 123-128. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

26. Горобець А.М. Експериментальні дослідження міцності та деформативності сталевібробетонних двоосно обтиснутих плит при поперечному згині / Горобець А.М., Журавський О.Д. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип. 17. - Рівне, 2008, С. 139-144. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

27. Журавський О.Д. Робота монолітних залізобетонних плит з пост-напруженою арматурою / Журавський О.Д., Мельник І.В. // Теорія і практика

будівництва: Вісник НУ «Львівська політехніка». № 755. – Львів, 2013, С. 135-138. *(Наведена методика розрахунку).*

28. Журавський О.Д. Дослідження роботи попередньо-напружених сталевібробетонних плит при поперечному згині / Журавський О.Д., Горобець А.М. // Містобудування та територіальне планування: Науково-технічний збірник. Вип. 58. – Київ: КНУБА, 2015, С. 194-204. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку).*

29. Журавський О.Д. Моделювання роботи попередньо-напружених сталевібробетонних плит при поперечному згині / Журавський О.Д., Горобець А.М. // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. –К.: КНУБА, - Вип. 61, 2016, С. 209-215. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку).*

30. Горобець А.М. Міцність та тріщиностійкість двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит при поперечному згині / Горобець А.М., Журавський О.Д. // Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць. –К.: КНУБА, - Вип. 1., 2017, С. 181-186. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку).*

31. Тимошук В.А. Розрахунок плоских з/б плит, підсилених зовнішньою напруженою арматурою / Тимошук В.А., Журавський О.Д. // Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць. – К.: КНУБА, - Вип. 1, 2017, С. 193-198. *(Наведена методика розрахунку).*

32. Куцик О.В. Міцність і тріщиностійкість згинальних елементів з високоміцного бетону / Куцик О.В., Журавський О.Д. // Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць. – К.: КНУБА, - Вип. 1, 2017, С. 199-204. *(Розроблена постановка задачі, виконаний огляд існуючих методик та сформульовані загальні висновки).*

33. Панченко О.В. Визначення довговічності залізобетонних мостових балок, підсилених композитними стрічками / Панченко О.В., Іваницький Я.Л., Кунь П.С., Журавський О.Д. // Фізико-хімічна механіка матеріалів: Міжнародний науково-технічний журнал. – Львів, ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАНУ, -Том 53, № 5, 2017, С.73-77. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень).*

34. Журавський О. Розрахункова модель плоских залізобетонних плит, підсилених зовнішньою напруженою арматурою / О.Журавський, В.Тимошук // Архітектура і сільськогосподарське будівництво: Вісник Львівського національного аграрного університету. № 19. – Львів, 2018, С. 41-45. *(Розроблена постановка задачі, виконаний огляд існуючих методик та сформульовані загальні висновки).*

35. Журавський О.Д. Експериментальні дослідження багаторівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах / Журавський О.Д., Ромашко-Майструк О.В. // Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць. – К.: КНУБА, - Вип. 4, 2019, С. 28-38. *(Розроблена постановка задачі, виконаний огляд існуючих методик та сформульовані загальні висновки).*

36. Журавський О.Д. Дослідження плоскої залізобетонної плити підсиленої зовнішньою напруженою арматурою / Журавський О.Д., Тимошук В.А. // Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць. – К.: КНУБА, - Вип. 7, 2020, С. 4-11. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень).*

37. Zhuravskiy O. (2020). Method and example of calculation of combined

reinforced bending elements. Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering, 1(54), 40-46. Журавський О.Д. (2020). Методика та приклад розрахунку комбіновано армованих згинальних елементів. Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво, 1(54), 40-46. *(Наведена методика розрахунку)*.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

38. Журавский А.Д. Экспериментально-теоретические исследования коэффициента поперечных деформаций при кратковременном и длительном сжатии / А.Д. Журавский, Ю. Амаша // Тезисы докл. 54-й науч.-техн. конф. КИСИ. – Киев: КИСИ, 1993, С.136-137. *(Наведено розрахункові умови міцності деревини при складному напруженому стані та проведено чисельні дослідження)*.

39. Barashikov, A. Badania teoretyczne i doswiadczone plyt dwuosowo sprezonych / A.Barashikov, A.Zhuravsky // Problemy naukowo-badawcze budownictwa. - XXXIX konf.naukowa. Tom 3. - Krynica, Polska, 1993, S.13-21. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

40. Барашиков А.Я. Дослідження швидкоплинної повзучості бетону при одоосному та двоосному стиску / А.Я.Барашиков, О.Д.Журавський, Ю.Амаша // Проблеми теорії та практики будівництва. Збірник доп.наук.-техн.конф. Том 1. - Львів, 1994, С.17-21. *(Наведена методика розрахунку та проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

41. Барашиков А.Я. Экспериментальные и теоретические исследования деформаций быстронатекающей ползучести бетона при одноосном и двухосном сжатии / Я.Барашиков, А.Д.Журавский, Ю.Амаша // Problemy naukowo-badawcze budownictwa. - XL konf.naukowa. Tom 3. - Krynica, Polska, 1994, S.17-23. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

42. Barashikow A. Short-term and Long-term Deformation of Concrete under Two-axle Compression / A. Barashikow, A. Zhuravsky // ConChem International Exhibition & Conference. - Conference Proceedings: Brussels, Belgium, 1995, - P.477-481. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

43. Барашиков А.Я. Дослідження втрат попереднього напруження від швидкоплинної та довготривалої повзучості бетону в двохосно попередньо-напружених конструкціях / А.Я.Барашиков, О.Д.Журавський, С.А.Лисюк // Механіка руйнування та фізика будівельних матеріалів та конструкцій. -Матеріали II міжнародного симпозіуму: Львів-Дубляни, 1996, С.140-142. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

44. Барашиков А.Я. Вплив бокового обтиску на втрати попереднього напруження в арматурі від швидкоплинної та довготривалої повзучості бетону / А.Я.Барашиков, О.Д.Журавський, С.А.Лисюк // Науково-практичні проблеми сучасного залізобетону. - Збірник тез I всеукраїнської наук.-техн. конференції: Київ, 1996, С.47-49. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

45. Барашиков А.Я. Дослідження двоосно попередньо-напружених плит, опертих по контуру / А.Я.Барашиков, О.Д.Журавський, С.А.Лисюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. - Матеріали міжнародної наук.-техн.конф. Частина перша: Рівне, 1996, С.126. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

46. Barashikow A. Short-term and Long-term Deformation of Concrete under

Two-axle Compression / A. Barashikow, A. Zhuravsky // Analytical Models and New Concepts in Mechanics of Concrete Structures. - 2nd International Scientific Conference. – Lodz: Poland, 1996, - P.37-43. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку).*

47. Barashikow A. Concrete Dispersedly Reinforced by Fibres / A. Barashikow, A. Zhuravsky, H. Pham // ConChem International Exhibition & Conference. - Conference Proceedings: Dusseldorf, Germany, 1997, - P.139-144. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку).*

48. Barashikow A. Strength and Strain of Concrete under Repeated Static Loads / A. Barashikow, A. Zhuravsky // Innovation in Concrete Structures: Design and Construction. - Conference Proceedings: Dundee, Scotland, UK, 1999, P. 385-390. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку).*

49. Цибульник І.О. Експериментальне дослідження прогинів плит, підсилених сталевібробетоном / Цибульник І.О., Журавський О.Д., Барашиков А.Я. // VI Міжнар.наук.конф. "Актуальні проблеми будівництва та інженерії доквілля" Львів-Кошице-Жешув: Збірник матеріалів конф. – Ч.1 Будівництво. - Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка", 2001, С. 19-22. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень).*

50. Куцик О.В. Аналіз використання високоміцного бетону у сучасному будівництві / Куцик О.В., Журавський О.Д. // Науково-практична конференція «Будівлі спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції». КНУБА, Київ, 2-3 червня 2016 р. Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник, вип. 61. – К.: КНУБА, 2016, С.444-449. *(Розроблена постановка задачі, виконаний огляд існуючих методик та сформульовані загальні висновки).*

51. Журавський А.Д. Критерії міцності залізобетонних плоских елементів при спільній дії згинальних та крутних моментів, нормальних та дотичних сил / А.Д. Журавський // II Науково-практична конференція. Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції. – Київ: КНУБА, 2018. – с. 98-100. *(Розроблена постановка задачі, виконаний огляд існуючих методик та сформульовані загальні висновки).*

52. Журавський О. Міцність та тріщиностійкість двошарових плит, армованих металевою фіброю / О. Журавський, Д. Сморгалов, М. Марселіно // XX Міжнародний науково-практичний форум «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій». Львівський НАУ, Львів-Дубляни, 17-19 вересня 2019 р. – с. 35. *(Загальне компонування, редагування і написання тексту статті).*

53. Журавський А.Д. Прочность и трещиностойкость железобетонных балок из высокопрочного бетона / Журавський А.Д., Куцик Е.В. // Архитектурно-строительный комплекс: Электронный сборник статей II международной научной конференции проблемы, перспективы, инновации. Новополюцк, 28–29 нояб. 2019 г. Полоцкий государственный университет; под ред. Л.М.Парфеновой. – Новополюцк: Полоц. гос. ун-т, 2020. С. 93-98. *(Розроблена постановка задачі, виконаний огляд існуючих методик та сформульовані загальні висновки).*

У виданнях, які додатково відображають матеріали дисертації:

54. Барашиков А.Я. Экспериментальные и теоретические исследования

двухосно преднапряженных ортотропных плит / А.Я.Барашиков, Ю.Н.Убайдуллаев, А.Д.Журавский // Конструкции гражданских зданий: Сборник научных трудов. – К.: КиевЗНИИЭП. 1999, С. 85-92. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

55. Барашиков А.Я. Влияние повторных статических нагрузок на прочность и деформативность бетона / А.Я.Барашиков, А.Д.Журавский // Науково-практичні проблеми моделювання та прогнозування надзвичайних ситуацій. Збірник наукових статей. Випуск 2. – К.: МНС України, 1999, С. 152-156. *(Наведена методика розрахунку)*.

56. Барашиков А.Я. Дослідження прогинів залізобетонних плит з урахуванням одноосного та двоосного попереднього обтиску / А.Я.Барашиков, О.Д.Журавський // Бетон и железобетон в Украине: Научно-технический и производственный журнал. № 3. – Полтава, 2000, С. 2-8. *(Проведений аналіз експериментальних)*.

57. Мурашко Л.А. Експериментальні дослідження впливу криволінійної арматури без зчеплення з бетоном на несучу здатність похилих перерізів при натязі на бетон / Мурашко Л.А., Журавський О.Д., Козак О.В. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип. 28. - Рівне, 2014, С. 267-275. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

58. Козак О.В. Експериментально-теоретичні дослідження припорних ділянок монолітних залізобетонних балок з криволінійною попередньо-напруженою арматурою / Козак О.В., Журавський О.Д. // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, - Вип. 61, 2016, С. 392-401. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

59. Козак О.В. Міцність і тріщиностійкість припорних ділянок залізобетонних балок з криволінійною попередньо-напруженою арматурою / Козак О.В., Журавський О.Д. // Будівельні конструкції. Теорія і практика: Збірник наукових праць. – К.: КНУБА, - Вип. 1, 2017, С. 187-192. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень та наведена методика розрахунку)*.

60. Ромашко О.В. Узагальнена модель зчеплення арматури з бетоном / Ромашко О.В., Ромашко В.М. Журавський О.Д. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: Збірник наукових праць. Вип. 37. - Рівне, 2019, С. 214-221. *(Проведений аналіз експериментальних досліджень)*.

АНОТАЦІЯ

Журавський О.Д. Міцність, тріщиностійкість та деформації залізобетонних плит при складних навантаженнях. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» (19 – «Архітектура та будівництво»). - Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, 2021.

Основний зміст дисертації

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми розрахунку плитних комбіновано-армованих конструкцій зі сталюю фіброю та попередньо-напруженою арматурою у двох напрямках. Предметом досліджень є напружено-деформований стан двохосно попередньо-напружених сталефібробетонних (СФБ) плит при поперечних навантаженнях.

У першому розділі дисертації висвітлено сучасний стан проблеми урахування складного напружено-деформованого стану при розрахунку СФБ плит при поперечному згині. Даний аналіз досліджень попередньо-напружених плит. Проаналізовано методи розрахунку залізобетонних плит при спільній дії згинальних моментів та повздовжніх сил. На основі виконаного аналізу сформульована мета та задачі досліджень.

Другий розділ роботи присвячений експериментально-теоретичним дослідженням міцності та деформативності СФБ при стиску та розтягу. Запропоновано методика визначення параметрів діаграми « σ - ϵ » при стиску та розтягу СФБ. Також приведені методика та результати експериментальних досліджень усадки та повзучості СФБ при одноосному та двоосному стиску. Розроблена методика визначення відносних деформацій швидкоплинної та тривалої повзучості СФБ при одноосному та двоосному стиску. Запропонований критерій визначення межі переходу швидкоплинної повзучості СФБ в тривалу повзучість. Алгоритми розрахунків представлені у вигляді блок-схем, які були реалізовані в програмі Mathcad.

У третьому розділі досліджено напружено-деформований стан двоосно попередньо-напружених СФБ плит після передачі зусиль обтиску з арматури на бетон. Експериментально визначено втрати попереднього напруження в двоосно попередньо-напружених СФБ плитах, викликаних усадкою і повзучістю СФБ. Розроблена методика визначення втрат попереднього напруження, викликаних миттєвими деформаціями СФБ (в момент відпуску арматури з упорів на бетон), а також швидкоплинними та тривалими деформаціями повзучості СФБ. Алгоритми розрахунків представлені у вигляді блок-схем, які були реалізовані в програмі Mathcad. Отримані діаграми повзучості та втрат попереднього напруження в арматурі показали, що найменші втрати відбулись в двоосно обтиснутих плитах у порівнянні з одноосно обтиснутими плитами. Наведені дані напружень і деформацій в арматурі перед випробуваннями на поперечне навантаження. Виконаний порівняльний розрахунок втрат напружень за діючими нормами та за методикою автора.

У четвертому розділі досліджено несучу здатність та тріщиностійкість СФБ плит при дії рівномірно-розподіленого навантаження. Проаналізовано характер руйнування дослідних зразків визначено зусилля їхнього руйнування. Розроблена методика розрахунку несучої здатності та тріщиностійкість двоосно попередньо-напружених СФБ плит на основі деформаційного методу. Методика розрахунку виконана за допомогою удосконалених залежностей діючих норм. За критерій тріщиностійкості прийнято досягнення крайніми розтягнутими волокнами СФБ граничних деформацій розтягу, які дорівнюють $\epsilon_{cfu} = -2f_{cfu} / E_{cf}$. При цьому враховується повна діаграма СФБ при стиску, робота сталевібробетону в розтягнутій зоні. Також враховується вплив двоосного стиску бетону в стиснутій зоні з використанням відповідного коефіцієнта. Алгоритми розрахунків представлені у вигляді блок-схем, які були реалізовані в програмі Mathcad. Результати розрахунку дали хорошу збіжність з експериментальними даними. При аналізі досліджень несуча здатність та тріщиностійкість двоосно напружених СФБ плит виявилась найбільшою у порівнянні з одноосно напруженими плитами та

плитами зі звичайною ненапруженою арматурою.

У *п'ятому розділі* досліджено деформативність двохосно попередньо-напружених СФБ плит при поперечному згині. Проаналізовано існуючі методики розрахунку прогинів згинальних елементів без тріщин та з тріщинами згідно діючих норм та Eurocod. Запропонований алгоритм розрахунку кривизни та прогину СФБ плит при поперечному згині. Розрахунки виконують за алгоритмом визначення несучої здатності з фіксуванням величини кривизни на кожному кроці завантаження. Наведені результати експериментальних досліджень прогинів дослідних зразків, які показали хорошу збіжність з теоретичними розрахунками.

У *шостому розділі* запропонований загальний алгоритм розрахунку згинальних елементів прямокутного перерізу, армованого звичайною та попередньо-напруженою арматурою, а також сталюю фіброю. Методика розрахунку базується на деформаційній теорії розрахунку залізобетонних конструкцій з урахуванням повної діаграми « σ - ϵ » для бетону та сталевібробетону при стиску. Методика дає можливість розрахунку двохосно попередньо-напружених плит. При цьому враховується збільшення міцності бетону та сталевібробетону в умовах двохосного стиску. Виконані порівняльні розрахунки несучої здатності стандартної плити аеродромних покриттів ПАГ-14 та аналогічної плити, у якій арматурні сітки були замінені сталюю фіброю, а також порівняльні розрахунки несучої здатності стандартної дорожньої плити П60.38 та аналогічної плити. Ефективність плити зі сталюю фіброю полягає в тому, що сталеві фібра майже повністю замінює арматурні сітки. Також відсутні витрати на виготовлення цих сіток. Також зменшується кількість попередньо-напруженої арматури на 15...20%.

В роботі сформульована і розв'язана задача розрахунку несучої здатності, тріщиностійкості та прогинів двохосно попередньо-напружених сталевібробетонних плит при поперечних навантаженнях. Розроблена методика розрахунку таких конструкцій на основі деформаційного методу розрахунку. При цьому враховується повна діаграма СФБ при стиску, робота сталевібробетону в розтягнутій зоні. Також враховується вплив двохосного стиску бетону в стиснутій зоні.

Розглянута та вирішена задача визначення втрат попереднього напруження в двохосно попередньо-напружених СФБ плитах, викликаних усадкою і повзучістю СФБ.

Розглянута та вирішена задача визначення деформацій повзучості СФБ в умовах двохосного стиску та запропонована методика їх визначення.

Теоретична цінність роботи полягає у подальшому розвитку методик розрахунку несучої здатності, тріщиностійкості та прогинів комбіновано-армованих залізобетонних конструкцій зі сталюю фіброю та звичайною і попередньо-напруженою арматурою. Урахування тривалих факторів таких як усадка та повзучість СФБ при визначенні реальних напружень в арматурі.

Результати дисертаційної роботи використані при розробці проектів перекриттів та покриттів монолітно-каркасних будівель та плитних елементів інженерних споруд. Окремі результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес на кафедрі залізобетонних та кам'яних конструкцій Київського національного університету будівництва та архітектури у вигляді спеціалізованого

курсу лекцій, а також при виконанні магістерських робіт студентів спеціальності «Промислове та цивільне будівництво».

Ключові слова: несуча здатність, тріщиностійкість, прогини, сталевібробетон, згинальний момент, кривизна, попередньо напружена арматура, відносні деформації, напруження в арматурі, напруження в сталевібробетоні, двохосний стиск, повзучість, усадка, втрата попереднього напруження.

ABSTRACT

Zhuravskiy O.D. Strength, crack resistance and deformation of reinforced concrete slabs under complex loads. - On the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.23.01 «Building constructions, buildings and structures» (19 – «Architecture and construction»)
- Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2021.

The main content of the dissertation.

The dissertation is devoted to the solution of an important scientific and technical problem of calculation of plate combined-reinforced constructions with steel fiber and prestressed reinforcement in two directions. The subject of research is the stress-strain state of biaxially pre-stressed steel-fiber- concrete (SFC) slabs under transverse loads.

In **Chapter 1** of the dissertation highlights the current state of the problem of taking into account the complex stress-strain state when calculating the SFC of plates with transverse bending. This analysis of studies of prestressed slabs. Methods of calculation of reinforced concrete slabs at joint action of bending moments and longitudinal forces are analyzed. On the basis of the performed analysis the purpose and tasks of researches are formulated.

The **Chapter 2** is devoted to experimental and theoretical studies of the strength and deformability of the SFB under compression and tension. A method for determining the parameters of the diagram « σ - ε » during compression and tension of the SFC is proposed. Also the technique and results of experimental researches of shrinkage and creep of SFC at uniaxial and biaxial compression are resulted. A method for determining the relative deformations of transient and long-term creep of SFB under uniaxial and biaxial compression has been developed. The criterion for determining the boundary of the transition of transient creep SFC to long creep is proposed. Calculation algorithms are presented in the form of block diagrams, which were implemented in the program Mathcad.

In **Chapter 3**, the stress-strain state of biaxially prestressed SFB slabs after the transfer of compressive forces from reinforcement to concrete is investigated. Prestress losses in biaxially prestressed SFC plates caused by shrinkage and creep of SFC have been experimentally determined. A method for determining the prestress losses caused by instantaneous deformations of SFC (at the time of release of reinforcement from stops on concrete), as well as transient and long-term deformations of creep SFC. Calculation algorithms are presented in the form of block diagrams, which were implemented in the program Mathcad. The obtained diagrams of creep and prestressing losses in the reinforcement showed that the smallest losses occurred in biaxially compressed plates in comparison with uniaxially compressed plates. The data of stresses and strains in the reinforcement before the tests on the transverse load are given. Comparative calculations

of stress losses are performed according to the current norms and according to the author's method.

In **Chapter 4**, the bearing capacity and crack resistance of SFC plates under the action of a uniformly distributed load are investigated. The nature of the destruction of experimental samples is analyzed and the efforts of their destruction are determined. A method for calculating the bearing capacity and crack resistance of biaxially prestressed SFC plates based on the deformation method has been developed. The calculation method is performed using improved dependencies of current regulations. The criterion of crack resistance is the achievement of the ultimate stretched fibers of the SFB tensile tensile deformations, which are equal to $\varepsilon_{cfu} = -2f_{cfu} / E_{cf}$. This takes into account the complete diagram of the SFC under compression, the work of reinforced concrete in the stretched zone. The effect of biaxial compression of concrete in the compressed zone using the appropriate coefficient is also taken into account. Calculation algorithms are presented in the form of block diagrams, which were implemented in the program Mathcad. The results of the calculation gave a good agreement with the experimental data. In the analysis of research, the bearing capacity and crack resistance of biaxially stressed SFC plates was the largest in comparison with uniaxially stressed plates and plates with conventional unstressed reinforcement.

In **Chapter 5**, investigates the deformability of biaxially prestressed SFC plates during transverse bending. The existing methods of calculation of deflections of bending elements without cracks and with cracks according to the current norms and Eurocod are analyzed. An algorithm for calculating the curvature and deflection of SFC plates with transverse bending is proposed. The calculations are performed according to the algorithm for determining the bearing capacity with fixing the magnitude of the curvature at each step of loading. The results of experimental studies of deflections of prototypes, which showed good agreement with theoretical calculations, are presented.

In **Chapter 6**, proposes a general algorithm for calculating the bending elements of rectangular cross-section, reinforced with ordinary and pre-stressed reinforcement, as well as steel fiber. The calculation method is based on the deformation theory of calculation of reinforced concrete structures taking into account the complete diagram « σ - ε » for concrete and reinforced concrete under compression. The technique makes it possible to calculate biaxially prestressed plates. This takes into account the increase in strength of concrete and fiberglass in the conditions of biaxial compression. Comparative calculations of bearing capacity of the standard plate of aerodrome coatings PAG-14 and a similar plate in which the reinforcing mesh was replaced by steel fiber, as well as comparative calculations of the bearing capacity of the standard road plate P60.38 and a similar plate. The efficiency of a plate with steel fiber is that steel fiber almost completely replaces reinforcing mesh. There are also no costs for the manufacture of these grids. The number of prestressed fittings is also reduced by 15... 20%.

The problem of calculation of bearing capacity, crack resistance and deflections of biaxially prestressed reinforced concrete slabs at transverse loads is formulated and solved in the work. The technique of calculation of such designs on the basis of a deformation method of calculation is developed. This takes into account the complete diagram of the SFC under compression, the work of reinforced concrete in the stretched zone. The effect of biaxial compression of concrete in the compressed zone is also taken into account.

The problem of determination of prestress losses in biaxially prestressed SFB plates caused by shrinkage and creep of SFC is considered and solved.

The problem of determination of creep deformations of SFC in the conditions of biaxial compression is considered and solved and the technique of their definition is offered.

The theoretical value of the work lies in the further development of methods for calculating the load-bearing capacity, crack resistance and deflections of combined reinforced concrete structures with steel fiber and conventional and pre-stressed reinforcement. Taking into account long-term factors such as shrinkage and creep of the SFC when determining the actual stresses in the valve.

The results of the dissertation work were used in the development of projects of floors and coverings of monolithic frame buildings and slab elements of engineering structures. Some results of the dissertation are introduced into the educational process at the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures of the Kyiv National University of Construction and Architecture in the form of a specialized course of lectures, as well as master's theses of students majoring in «Industrial and Civil Engineering».

Keywords: load-bearing capacity, crack resistance, deflections, steel-fiber-concrete, bending moment, curvature, prestressed reinforcement, relative deformations, stress in reinforcement, stress in steel-fiber-concrete, biaxial compression, creep, shrinkage, prestress loss.

Підписано до друку 26.03.2021. Формат 60x84 1/16.
Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman.
Обл.-вид. арк. 1,7. Ум. друк. арк. 2,2.
Наклад 120 прим.

Надруковано: ТОВ “Видавництво “Ліра-К”,
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
суб’єктів видавничої справи ДК № 3981 від 15.02.2011.
03142, м. Київ, вул. В. Стуса, 22/1.
тел./факс (044) 247-93-37; (050) 462-95-48
Сайт: lira-k.com.ua, редакція: zv_lira@ukr.net