

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ІВАНИК ЮРІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 624.014+691.328

**МІЦНІСТЬ ТА ДЕФОРМАТИВНІСТЬ
КОМБІНОВАНИХ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ПОПЕРЕДНЬО НАПРУЖЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник : доктор технічних наук, професор
Демчина Богдан Григорович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
професор кафедри будівельних конструкцій та мостів

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор
Семко Олександр Володимирович,
Полтавський Національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка,
завідувач кафедри архітектури та міського
будівництва

кандидат технічних наук, доцент
Романюк Володимир Володимирович,
Національний університет водного господарства та
природокористування,
професор кафедри промислового, цивільного
будівництва та інженерних споруд

Захист відбудеться «19» квітня 2017 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, навчальний корпус ІІ, ауд. 212.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «15» березня 2017 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
к. т. н., доцент



Холод П.Ф.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні умови зведення будівель та споруд, які характеризуються впровадженням новітніх та ефективних конструкцій, невід’ємно пов’язані з проблемами розроблення методики дослідження й проектування цих конструкцій. До таких конструкцій належить комбіновані сталезалізобетонні шпренгельні системи. Вирішення питання розроблення методики дослідження і проектування комбінованих сталезалізобетонних шпренгельних попередньо напружених конструкцій за умови забезпечення високого рівня несучої здатності при низькій масі є актуальною проблемою.

Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає напряму науково-технічної політики держави в галузі оцінювання технічного стану будівель і споруд згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №409 від 5 травня 1997 р. “Про забезпечення надійності будівель, споруд та мереж”, плану науково-дослідних робіт кафедри будівельних конструкцій і мостів Національного університету «Львівська політехніка» “Дослідження міцності, деформативності і надійності звичайних та попередньо напружених залізобетонних конструкцій”, програмним рішенням I-V науково-технічних конференцій “Сталезалізобетонні конструкції: дослідження проектування, будівництво, експлуатація” (м. Кривий Ріг), а також в рамках госпдоговірної науково-дослідної роботи «Регулювання напружено-деформованого стану комбінованих металевих конструкцій» (номер держреєстрації № 0106U008821).

Мета роботи та завдання досліджень. Метою роботи є розроблення і реалізація на ЕОМ методики й алгоритму розрахунку міцності та деформативності комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій і експериментальне дослідження їх напружено-деформованого стану при дії статичного навантаження.

Досягнення поставленої мети здійснюється вирішенням таких завдань:

- на підставі існуючих способів та методик розрахунку сталезалізобетонних та комбінованих шпренгельних систем створити математичну модель розрахунку, алгоритм та програму визначення зусиль і вертикальних переміщень у просторових комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних системах;

- виконати математичний експеримент для дослідження міцності та деформативності комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій на дію симетричних та несиметричних навантажень та вибрати оптимальні параметри;

- виконати натурні експериментальні дослідження комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій для визначення міцності та деформативності дослідних зразків, отриманих та запроектованих в результаті математичного моделювання з метою підтвердження правильності вибраного алгоритму розрахунку;

- на основі аналізу теоретичних та експериментальних досліджень, а також економічної ефективності розробити рекомендації для розрахунку,

проектування та застосування комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій;

- результати досліджень впровадити у практику проектування і будівництва шляхом розробки практичних методів розрахунку комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій.

Об'єкт дослідження – комбіновані сталезалізобетонні попередньо напружені шпренгельні конструкції.

Предмет дослідження – міцність та деформативність комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій.

Методи дослідження включають підбір, вивчення й аналіз літературних джерел, класичні методи будівельної механіки, експериментальні випробовування дослідних зразків, теоретичні дослідження, порівняльний аналіз отриманих теоретичних і експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів:

- удосконалено математичну модель, методика, алгоритм і програмне забезпечення просторового розрахунку несучої здатності елементів комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних систем з використання ітераційного пошуку оптимальних параметрів напруженого деформованого стану елементів і геометричних форм конструкцій, в тому числі з врахуванням фізичної нелінійності;

- теоретично досліджено вплив зміни параметрів елементів комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних систем на напружено деформований стан елементів, міцність та деформативність конструкцій;

- запроєктовано, виготовлено та випробувано нові комбіновані сталезалізобетонні попередньо напружені шпренгельні конструкції на дію симетричних і несиметричних навантажень;

- проведено аналіз отриманих експериментальних даних і порівняння їх з теоретичними результатами розрахунку міцності й деформативності комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій за запропонованою методикою та подібними методами розрахунку;

- запропоновано практичні методи розрахунку міцності й деформативності комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій, які базуються на основних положеннях деформаційної моделі, окремих положеннях діючих вітчизняних і закордонних норм та «Eurocode-4» та впроваджено в реальному будівництві їх використання як несучих елементів перекриття громадських будівель.

Практичне значення роботи полягає в можливості використання розроблених комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій різної довжини, а також отриманих експериментальних і теоретичних даних, методики, алгоритму і програмного забезпечення просторового розрахунку міцності та деформативності у практиці проектування й навчальному процесі. Результати досліджень впроваджено при проектуванні конструктивних елементів перекриття громадських будівель, основними несучими системами яких були комбіновані сталезалізобетонні попередньо напружені шпренгельні конструкції.

Особистий внесок здобувача:

- проведений огляд та аналіз літературних джерел країн світу з досліджуваної проблематики;
- розроблені нові комбіновані сталезалізобетонні попередньо напружені шпренгельні конструкції;
- розроблена математична модель, методика, алгоритм і програмне забезпечення просторового розрахунку несучої здатності елементів комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних систем з використання ітераційного пошуку оптимальних параметрів напруженого деформованого стану елементів і геометричних форм конструкцій, в тому числі з врахуванням фізичної нелінійності;
- на підставі розроблених методики, алгоритму і програмного забезпечення теоретично досліджено вплив зміни параметрів елементів комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних систем на напружено деформований стан елементів, міцність та деформативність конструкцій;
- вперше експериментально досліджено напружено деформований стан, міцність і деформативність елементів комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій на дію симетричних і несиметричних навантажень;
- проведені теоретичні дослідження щодо визначення впливу величини попереднього натягу напруженої арматури, зміни положення нейтральної осі в балці жорсткості на напружено деформований стан елементів, міцність та деформативність конструкцій, а також розрахунку ширини полиці залізобетонної плити балки жорсткості в залежності від жорсткості конструкції та величини зовнішнього навантаження;
- проведено аналіз отриманих експериментальних даних і порівняння їх з теоретичними результатами розрахунку міцності й деформативності комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій за запропонованою методикою та подібними методами розрахунку;
- вперше на підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень досліджено постадійні показники міцності та деформативності балки жорсткості комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій;
- запропоновано практичні методи розрахунку міцності й деформативності комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій, які базуються на основних положеннях деформаційної моделі, окремих положеннях діючих вітчизняних і закордонних норм та «Eurocode-4», а також на наукових розробках автора;
- впроваджено в реальному будівництві комбіновані сталезалізобетонні попередньо напружені шпренгельні конструкції різних прольотів в якості несучих елементів перекриття громадських будівель.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на Міжнародній науково-технічній конференції «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій» (Львів-Дубляни, 2012 р.), на

X Міжнародній науково-технічній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація» (Полтава, 8-12 жовтня 2012р.), на III міжнародній науково-технічній конференції «Науково-прикладні аспекти автомобільної і транспортно-дорожньої галузей» (Луцьк, травень-червень 2014 р.), на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація» (Полтава, 27-30 жовтня 2014 р.), на 3-ій Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Одеса, 2016 р.), науково-практичній конференції «Будівлі та споруди спеціального призначення: сучасні матеріали та конструкції (Київ, 2016) та на студентських науково-технічних конференціях (НУ «Львівська політехніка», 2011 і 2012 р.р.).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковано у 5-ти статтях, у тому числі чотири із них у наукових фахових виданнях України та одна з них у виданні, яке включено до міжнародних наукометричних баз.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 169 найменувань, 3 додатків. Робота викладена на 200 сторінках, у тому числі містить 133 сторінки основного тексту, з них 16 повних сторінок з рисунками і таблицями, 19 сторінок списку використаних джерел та 32 сторінок додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, новизну та практичне значення дисертаційної роботи, зазначено необхідність теоретичних та експериментальних досліджень міцності та деформативності комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій.

В **першому розділі** розглянуто застосування комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій в роботі будівельних споруд і конструкцій, проведено огляд і аналіз існуючих методик розрахунку міцності і деформативності перерізів елементів комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій і сформульовані основні задачі дисертаційної роботи. В цьому ж розділі узагальнено результати теоретичних і експериментальних досліджень комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій.

Значний вклад в розвиток теорії розрахунку та проектування просторових комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій заклали: А.Я. Барашиков, Р. Бухвальтер, Д.А. Єрмоленко, М.П.Забродін, В.Г. Кваша, Р.І. Кінаш, В.О.Пермяков, О.В. Семко, Л.І. Стороженко, М.М. Стрелецький, В.М. Тимошенко, Е.Д. Чихладзе, А.Л. Шагін та ін. науковці. Розробці теорії розрахунку і експериментальним дослідженням конструкцій з листовим армуванням та профільованим настилом присвячені роботи В.М. Барабаша, В.В. Биби, З.Я.Бліхарського, Т.В.Бобала, А.І.Гавриляка, Б.Г.Демчини, І.М.Добрянського, Ф.Є.Клименка, А.П. Крамарчука та інш.

У розробку конструктивної форми, дослідження і впровадження комбінованих систем шпренгельного типу і способів їх попереднього напруження

великий внесок вклали Є.І.Беленя, В.М.Вахуркін, Ю.В.Гайдаров, М.В.Гоголь, Є.О. Гриневич, М.Ю. Избаша, Ю.О.Кушнір, А.В. Мазурак, В.В. Михайлов, В.О.Пермяков, В.М. Шимановський та інші. У створення та розвиток попередньо напруженого залізобетону великий внесок внесли Ю.Г.Аметов, В.В. Асанов, Є.М. Бабич, А.М.Бамбура, О.М.Богданов, Е.М.Гітман, Б.Г.Гнідець, Гриневич Є.О., В.С.Дорофеев, Ю.А.Клімов, А.В.Пельмутер, В.Ф. Пенц, С.Ф. Пічугін та інші.

На підставі аналізу існуючих теоретичних й експериментальних досліджень в цих напрямках сформульовані основні завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі шляхом вдосконалення методик розрахунку просторових перехресно-ребристих систем на прикладі залізобетонних мостів, а також металевих комбінованих шпренгельних систем та сталезалізобетонних шпренгельних конструкцій запропонована математична модель, алгоритм і програма розрахунку комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій (рис.1), в тому числі з врахуванням фізичної нелінійності, яка дозволяє знайти значення зусиль в елементах і вертикальні переміщення вузлів за граничними станами першої і другої груп.

Розроблена математична модель комбінованої конструкції задовільняє трьом групам умов:

- умовам рівноваги ($\sum X_{i,j}=0$; $\sum Z_{i,j}=0$; $\sum M_{i,j}=0$). В матричній формі рівняння статички представлені у вигляді:

$$/A / \{N, M\} = \{F, q\}, \quad (1)$$

- умовам сумісності деформацій, що аналітично пов'язують деформації стержнів і переміщення вузлів системи. Матричний вигляд рівнянь запишеться як:

$$\{\Delta\} = /A /^T \{u\}, \quad (2)$$

- фізичним умовам, які пов'язують зусилля і деформації. В матричній формі фізичні рівняння представлені у вигляді:

$$\{N, M\} = /K / \{\Delta\}. \quad (3)$$

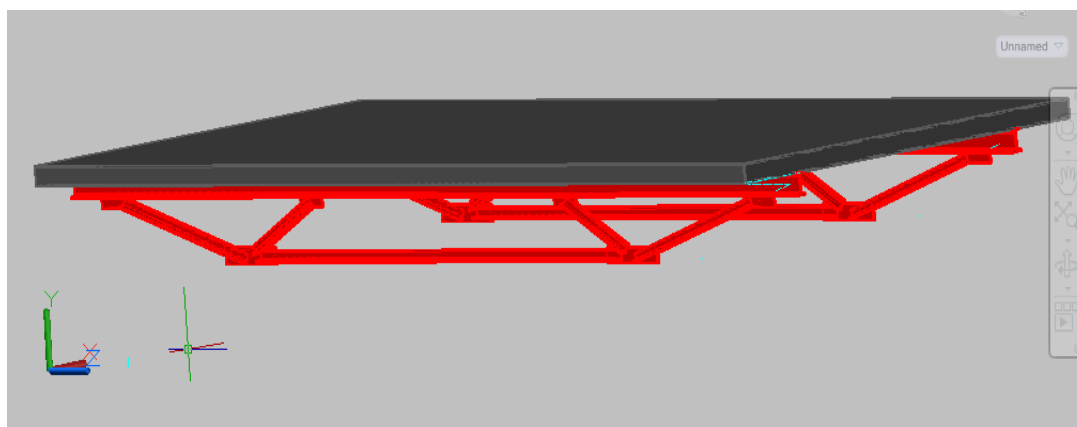


Рис. 1. Просторова комбінована сталезалізобетонна попередньо напружена шпренгельна конструкція

Розв'язок скінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь передбачає одержання розподілу згинальних моментів, поздовжніх сил, вертикальних переміщень і параметрів напружено-деформованого стану елементів просторової

конструкції від дії зовнішнього навантаження або просторової лінії впливу напружень й деформацій від дії рухомого одиничного навантаження.

Умовою розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь є: а) рівнонапружений стан елементів балки жорсткості статично невизначеної конструкції $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5$; б) величини отриманих напружень не перевищують розрахункового опору сталі $\sigma_i \leq R_y$; в) максимальний прогин конструкції не перевищує допустимих нормами прогинів $f_i \leq [f]$.

Шляхом розрахунку оптимальних параметрів статично невизначеної комбінованої металевої шпренгельної конструкції (МШК) при складному напружено-деформованому стані запроєктовано просторову комбіновану металеву шпренгельну конструкцію вагою 170.4 кг. Процентне відношення ваги балки жорсткості МШК до ваги конструкції в цілому становить 66, 3%.

Застосовуючи регулювання зусиль в її елементах за допомогою затяжки нижньої підвіски (рис.2) з врахуванням втрат попереднього напруження теоретично розраховано оптимальні параметри статично невизначеної попередньо напруженої комбінованої металевої шпренгельної конструкції (рис.3) загальною вагою 140.4 кг.

а)



б)



Рис. 2. Попередній натяг металевої шпренгельної конструкції на стадії виготовлення: а) – вузол шпренгельної затяжки; б) створення попереднього натягу

Проведені теоретичні дослідження з розрахунку оптимальних параметрів елементів комбінованої МШК показали, що використання зусилля натягу в затяжці зменшує масу конструкції на $\Delta m = (170.4 - 140.2) * 100\% / 170.4 = 17.72\%$.

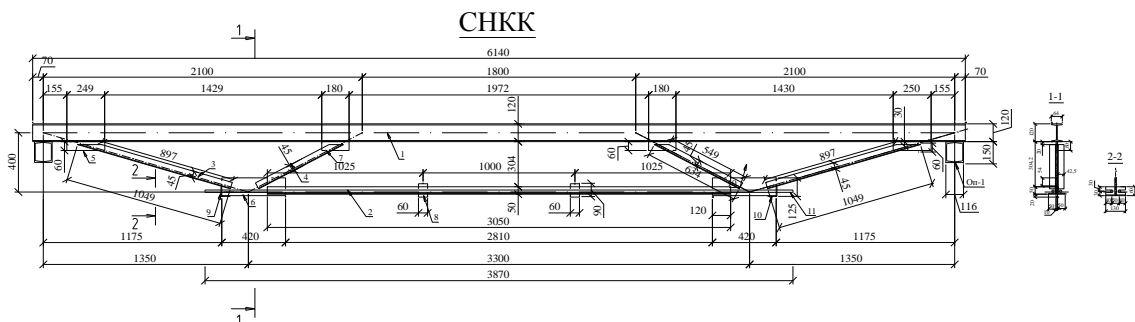


Рис. 3. Комбінована попередньо напружена металева шпренгельна конструкція (ПНШК), отримана згідно теоретичних досліджень на основі натягу в затяжці

На рис.4. показано графік зміни маси окремих елементів і металевої шпренгельної конструкції в цілому в залежності від величини прикладання зусилля натягу в затяжці. Процентне відношення ваги балки жорсткості попередньо напруженої МШК до ваги конструкції в цілому становить 50,36%.

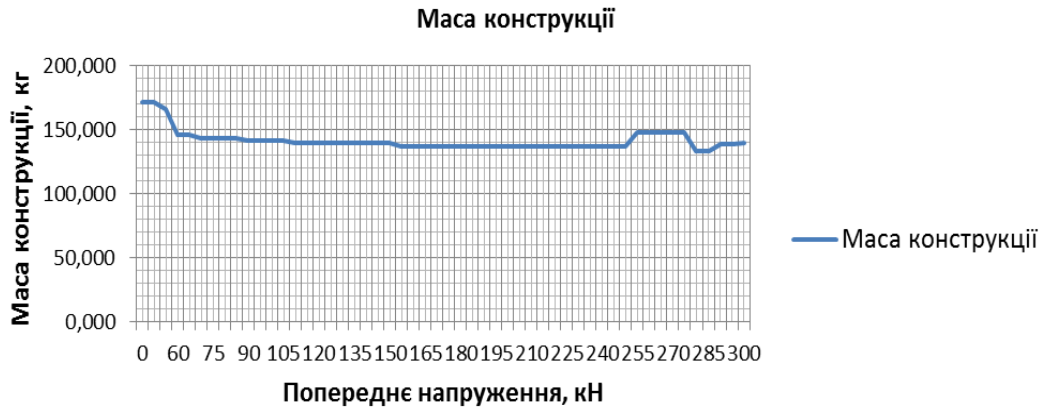


Рис. 4. Зміна маси статично невизначеної комбінованої металевої шпренгельної конструкції в залежності від величини натягу затяжки

Показано, що по довжині прольоту балки жорсткості комбінованої сталезалізобетонної ПНШК змінюються положення точки нульових моментів і величина ширини залізобетонної полицки в залежності від жорсткості конструкції і величини зовнішнього навантаження. Для знаходження ширини полицки b_{eff} залізобетонної плити сталезалізобетонної балки жорсткості прийнято еюра згинальних в металевій попередньо напруженій шпренгельній конструкції (рис.3) при завантаженні її постійним та корисним навантаженням

Комбінована сталезалізобетонна ПНШК представляє собою вигнутий сталезалізобетонний жорсткий диск з легкими елементами підвіски (рис.5).

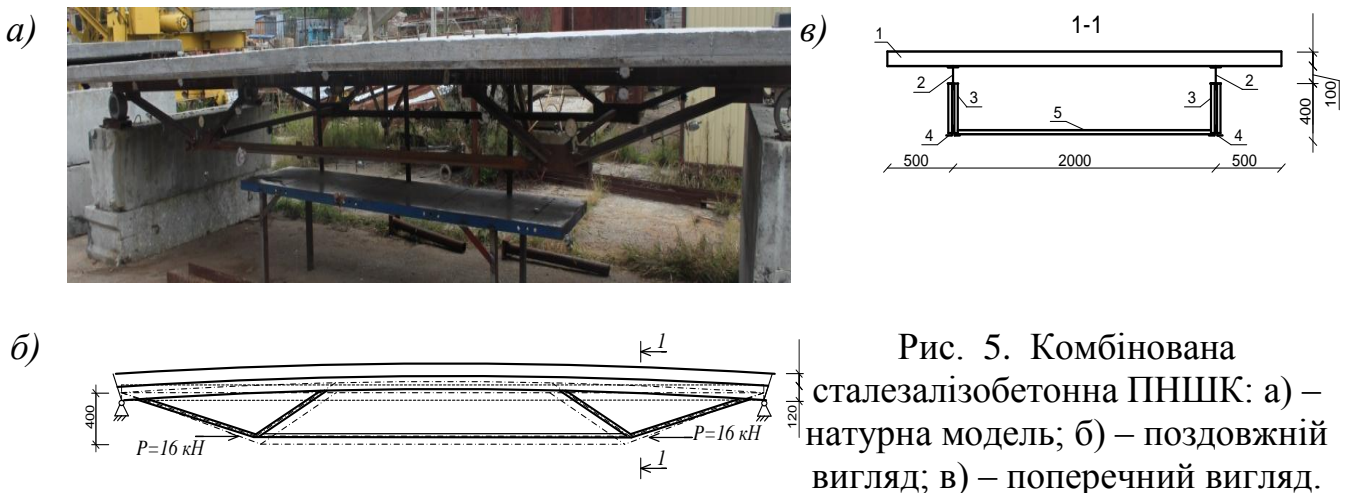


Рис. 5. Комбінована сталезалізобетонна ПНШК: а) – натурна модель; б) – поздовжній вигляд; в) – поперечний вигляд.

У третьому розділі запропонована методика розрахунку статично-невизначених комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій з врахуванням попереднього натягу затяжки.

Просторова розрахункова схема комбінованої сталезалізобетонної попередньо напруженої шпренгельної конструкції матиме вигляд, зображений на рис. 6.

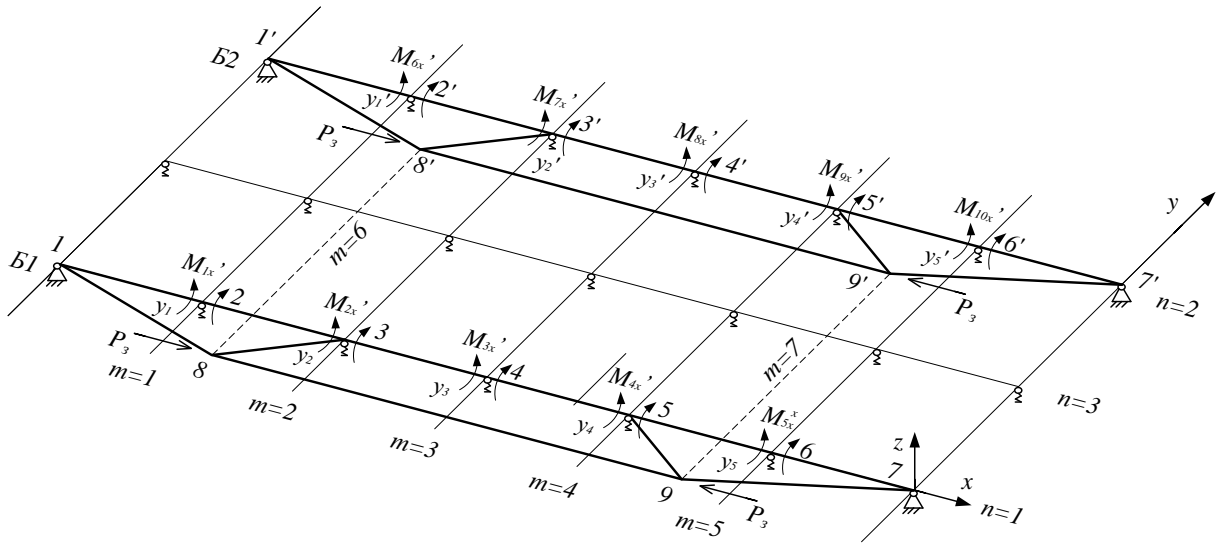


Рис. 6. Розрахункова схема просторової комбінованої сталезалізобетонної попередньо напруженої шконструкції.

Монолітний залізобетонний диск (1) об'єднав у сумісну просторову роботу попередньо напружені металеві балки жорсткості комбінованих конструкцій (2). В нижній частині елементи підвіски (3), (4) об'єднані між собою горизонтальними зв'язками (5).

При влаштуванні статично невизначеної комбінованої сталезалізобетонної попередньо напруженої шпренгельної конструкції проходить зміщення нейтральної осі балки жорсткості з причини зміни величини приведенного перерізу – від металеві балки жорсткості до сталезалізобетонної (рис.8).

Зміна жорсткісних параметрів балки $B(x)$ призводить до зміни геометричних розмірів статично невизначеної комбінованої сталезалізобетонної конструкції (рис.7) – збільшення крайніх прольотів, зменшенню середнього та збільшенню висоти конструкції.

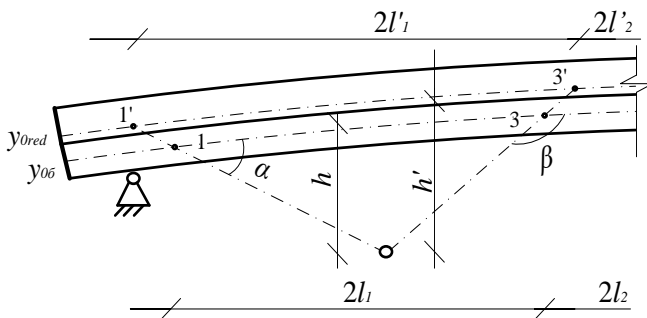


Рис. 7. Зміна геометричних розмірів ПНШК при переході з металеві балки жорсткості.

За основу приймемо перехресно-ребристу шпренгельну систему геометричних осей елементів, розділену на простіші – вузли і стрижні між ними, разом із зовнішніми навантаженнями і внутрішніми зусиллями, що діють в них. Розроблений інженерний розрахунок ПНШК показав більш коректні результати розрахунку в порівнянні з відомими методами будівельної механіки.

Розрахункова схема ПНШК створена шляхом введення уявних шарнірів по довжині поздовжніх і поперечних балок. Під навантаженням P_{ij} змінюється положення нейтральних осей $f_{ij} = f(x_i, y_i)$. Величина прогинів у вузлах по довжині

балок відповідно становить $f_{xi,j}$ або $f_{yj,i}$. На перетині балок у вузлах прогини рівні між собою $y_{xi,j} = f_{yj,i}$.

Для пружно-просідаючого вузла w_{ij} в напрямку осі OX з врахуванням сумісної дії згинальних моментів, поздовжніх, поперечних і обтискаючих сил рівняння має наступний вигляд:

$$\Delta_{xi-2,j} X_{xi-2,j} + \Delta_{xi-1,j} X_{xi-1,j} + \Delta_{xi,j} X_{xi,j} + \Delta_{xi+1,j} X_{xi+1,j} + \Delta_{xi+2,j} X_{xi+2,j} + \dots + \Delta_{ij} P = 0, \quad (4)$$

а в напрямку осі OY з врахуванням лише дії згинальних моментів і поперечних сил:

$$\Delta_{yj-2,i} X_{yj-2,i} + \Delta_{yj-1,i} X_{yj-1,i} + \Delta_{yj,i} X_{yj,i} + \Delta_{yj+1,i} X_{yj+1,i} + \Delta_{yj+2,i} X_{yj+2,i} + \dots + \Delta_{ji} P = 0. \quad (5)$$

Система рівнянь нерозривності деформацій (4), (5) для окремо взятих комбінованих сталезалізобетонних ПНШК матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \Delta_{1,1} X_1 + \Delta_{1,2} X_2 + \Delta_{1,3} X_3 + \Delta_{1,4} X_4 + \Delta_{1,5} X_5 + \Delta_{1,6} X_6 + \Delta_{1,7} X_7 - \frac{2f_1}{l_1} + \frac{f_2}{l_2} &= 0; \\ \Delta_{2,1} X_1 + \Delta_{2,2} X_2 + \Delta_{2,3} X_3 + \Delta_{2,4} X_4 + \Delta_{2,5} X_5 + \Delta_{2,6} X_6 + \Delta_{2,7} X_7 + \frac{f_1}{l_1} - \frac{f_2(l_1+l_2)}{l_1 * l_2} + \frac{f_3}{l_2} &= 0; \\ \dots & \\ \Delta_{6,1} X_1 + \Delta_{6,2} X_2 + \Delta_{6,3} X_3 + \Delta_{6,4} X_4 + \Delta_{6,5} X_5 + \Delta_{6,6} X_6 + \Delta_{6,7} X_7 + f_6 &= 0; \\ \dots & \\ \Delta_{7,1} X_1 + \Delta_{7,2} X_2 + \Delta_{7,3} X_3 + \Delta_{7,4} X_4 + \Delta_{7,5} X_5 + \Delta_{7,6} X_6 + \Delta_{7,7} X_7 + f_7 &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Аналогічно записується рівняння нерозривності деформацій для конструкцій іншого напрямку.

В рамках розробленого алгоритму ведеться пошук мінімуму цільової функції жорсткісних характеристик і зусиль в елементах просторової конструкції.

Жорсткість зведеного перерізу після появи тріщин в вузлах стержнів залізобетонної плити:

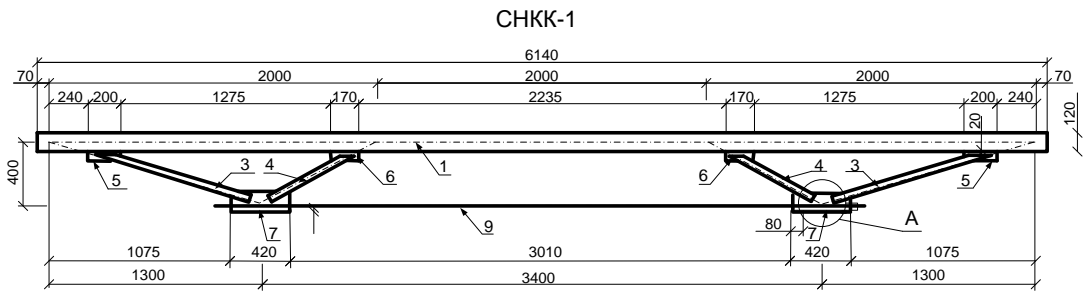
$$B(x_{xi,j}) = h_{0,xi,j} z_{xi,j} \left[\frac{\psi_{s_{xi,j}}}{E_{s_{xi,j}} A_{s_{xi,j}}} + \frac{\psi_{b_{xi,j}}}{(\varphi_{f_{xi,j}} + \xi_{xi,j}) \lambda_{b_{xi,j}} E_{b_{xi,j}} b_{xi,j} h_{0,xi,j}} \right] \quad (7)$$

$$B(y_{yj,i}) = h_{0,yj,i} z_{yj,i} \left[\frac{\psi_{s_{yj,i}}}{E_{s_{yj,i}} A_{s_{yj,i}}} + \frac{\psi_{b_{yj,i}}}{(\varphi_{f_{yj,i}} + \xi_{yj,i}) \lambda_{b_{yj,i}} E_{b_{yj,i}} b_{yj,i} h_{0,yj,i}} \right] \quad (8)$$

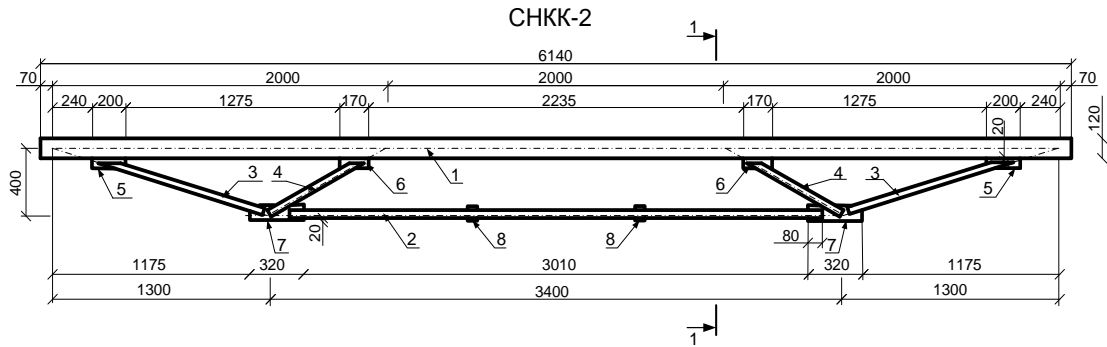
У четвертому розділі розроблена програма експериментальних досліджень, проведено випробування дослідних зразків та опрацьовано результати представлено застосування комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій при розробці проектів будівництва та реконструкції будівель та споруд.

Для виконання задач дисертаційного дослідження було виготовлено 3 натурних дослідних зразки. Загальна довжина металевої комбінованої шпренгельної конструкції (рис.8) становить 6,14 м (проліт 6,0 м), висота 0,475 м (в осях - 0,4 м). Верхній пояс металевої комбінованої статично невизначеної конструкції (17) запроєктований з прокатного двотавра №12 (поз.1) за ГОСТ 8239-89, затяжки (поз.2) - двох спарених рівнополічкових кутників 50x50x5 за ГОСТ 8509-86) і розкоси (поз.3, поз.4) - з двох спарених рівнополічкових кутників 40x40x4 за ГОСТ 8509-86) в межах прольоту. Об'єднувалися елементи фасонками (поз. 5, 6, 7) товщиною 10 мм.

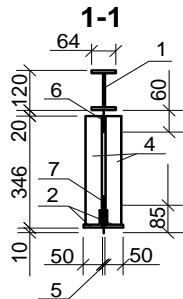
а)



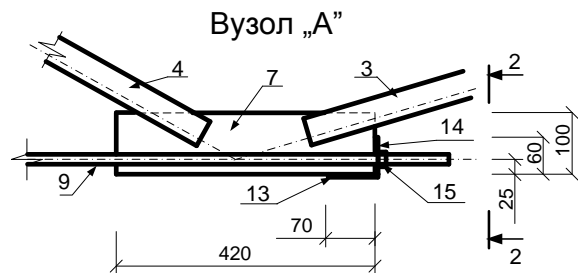
б)



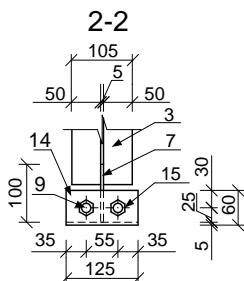
в)



г)



д)



е)

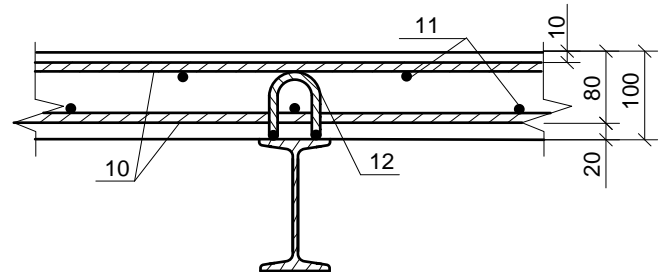


Рис. 8. Експериментальна статично невизначена комбінована металева шпренгельна конструкція з затяжкою: а) - МШК з арматурною затяжкою на початковій стадії виготовлення; б) - МШК з металевим шпренгелем на початковій стадії виготовлення; в) - розріз в середній частині прольоту конструкції; г), д) – нижній вузол підвіски з елементами натягу арматурних стержнів; е) – анкерування металевої і залізобетонної частин конструкції

На початковій стадії експерименту металева затяжка з двох спарених рівнополічкових кутників не приварювалася, а на її місце влаштовувались два паралельні тяжі з арматури $\varnothing 16$ А400С (поз. 9) з попередньо виготовленими на їх кінцях різьбами М14 (рис.8, г, д). По верхній полиці прокатних балок для забезпечення сумісної роботи металевих попередньо напружених шпренгельних конструкцій і залізобетонної монолітної плити влаштовані арматурні гнучкі похилі петлеві анкери (поз.12) (рис. 8, е). Вони були виготовлені з арматури $\varnothing 8$ і

Ø12 класу А400С. Згідно із розрахунком крок анкерів за зсувними зусиллями прийнято 500 мм.

Фізико-механічні характеристики дослідних конструкцій у момент випробувань визначались лінійною інтерполяцією їхніх значень, отриманих під час випробування контрольних кубиків і призм (рис. 9, рис.10).

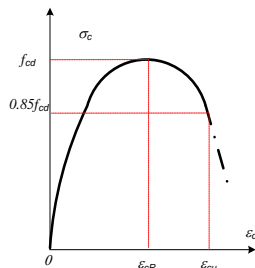


Рис. 9. Діаграма стиснення бетону $\sigma_c - \epsilon_c$

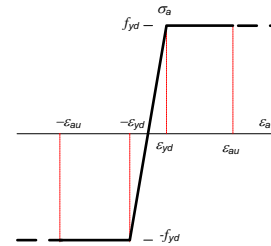


Рис. 10. Діаграма стиснення-розтяг для сталі ПНШК $\sigma_a - \epsilon_a$

Середні характеристики міцності бетону приводяться в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики бетонних зразків

Кубикова міцність $f_{cm, cube}, \text{МПа}$	Середня призмova міцність $f_{c, prism}, \text{МПа}$	Початковий модуль пружності $E_{cm}, 10^3, \text{МПа}$	Коефіцієнт Пуассона, ν
25,2	21,7	27,9	0,22

Основні фізико-механічні характеристики сталевих виробів наведені у табл. 2.

Таблиця 2.

Фізико-механічні характеристики сталевих елементів

Тип арматури	Фактична площа $A_{sp}, \text{см}^2$	Межа текучості $f_{yn}, \text{МПа}$	Тимчасовий опір $f_{un}, \text{МПа}$	Модуль пружності $E_s \cdot 10^5, \text{МПа}$	Абсолютне видовження $\epsilon_{s, u}, \%$
Ø 10	0,785	518	644	2,0	14
Ø 12	1,131	519	652	2,0	9
Ø 25	4,909	518	637	2,0	10
Двотавр №12	14,70	323	487	2,06	14,2
Кутник 45x45x5	4,29	267	494	2,06	18,3
Кутник 50x50x5	4,80	284	502	2,06	16,5

В програмі експериментальних досліджень основною метою ставилося:

1. Апробація розроблених методик розрахунку.
2. Визначення напружень в поперечних перерізах комбінованої сталезалізобетонної попередньо напруженої шпренгельної конструкції.
3. Визначення міцності та деформативності дослідної конструкції.
5. Аналіз результатів експерименту та співставлення їх із теоретичними даними.

В ході проведення експериментальних натурних випробувань вимірювали:

- поздовжні деформації як по металевій шпренгельній конструкції, так і по залізобетонній плиті;
- вертикальні переміщення, за якими визначали фактичний прогин.

Схеми розташування приладів зображені на рис. 11 та рис. 12.

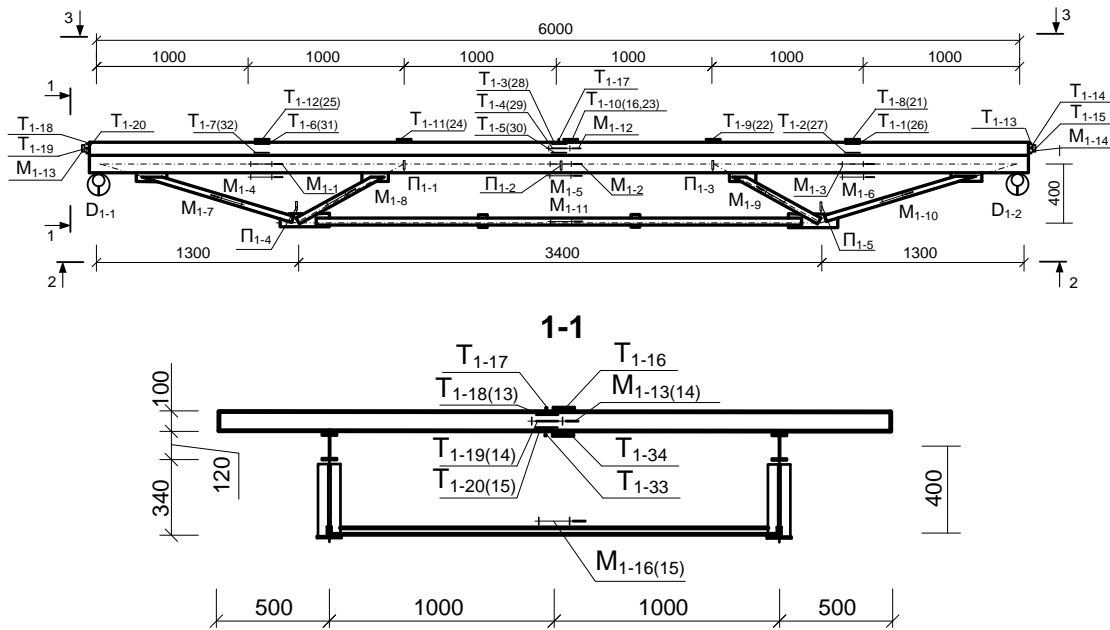


Рис. 11. Схема розміщення вимірювальних приладів в експериментальній комбінованій сталезалізобетонній попередньо напруженій шпренгельній конструкції

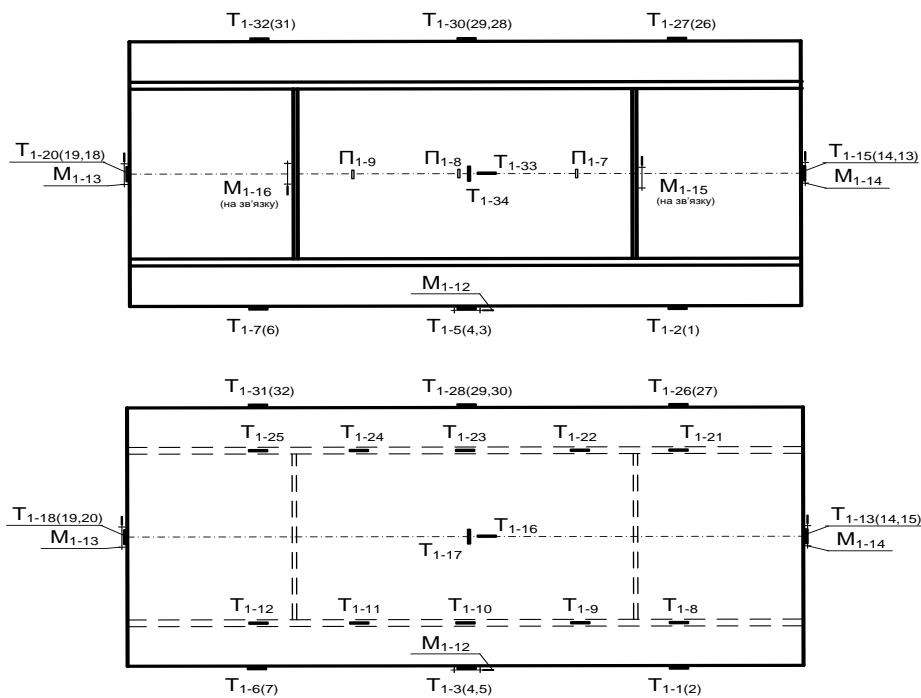


Рис. 12. Схема розміщення вимірювальних приладів на залізобетонній плиті в експериментальній комбінованій сталезалізобетонній попередньо напруженій шпренгельній конструкції

Згідно поставлених завдань навантаження на конструкцію здійснювалось як симетрично, так і не симетрично. В розрахунку прийнято рівномірно розподілене навантаження. Для отримання точних результатів завантаження експериментальних конструкцій здійснювалось мішками з піском, які були попередньо фасовані і зважені. Прикладалося навантаження до верху залізобетонної плити (рис. 13).



Рис. 13. Загальний вигляд навантаженого зразка ПНШК

За результатами експериментальних досліджень побудовано графіки залежності напружень в перерізах шпренгельної металеві конструкції (рис. 17) та відносних деформацій верхньої стиснутої зони бетону (рис. 14) від ступінчато прикладеного навантаження.

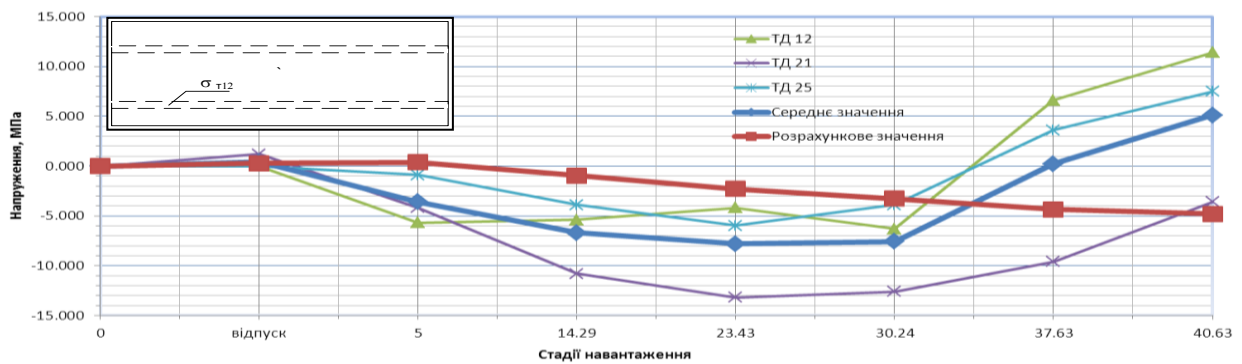


Рис. 14. Графік зміни напружень в залізобетонній плиті в середній частині першого проміжного прольоту від величини завантаження

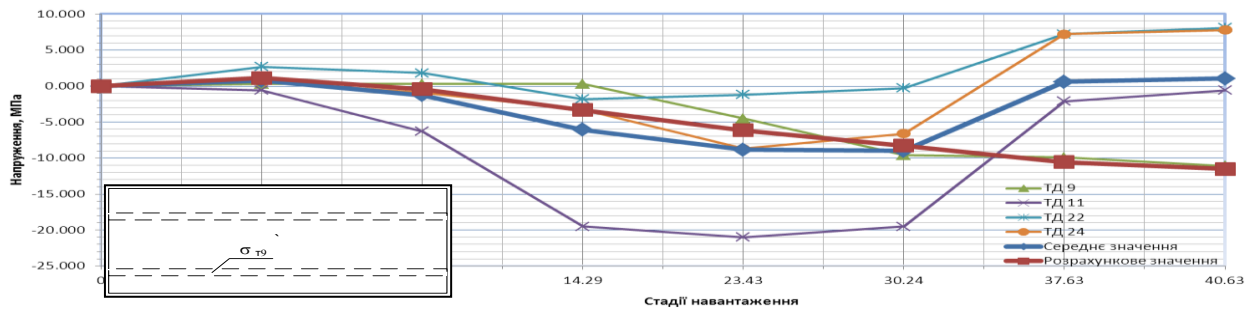


Рис. 15. Графік зміни напружень в залізобетонній плиті над пружною опорою

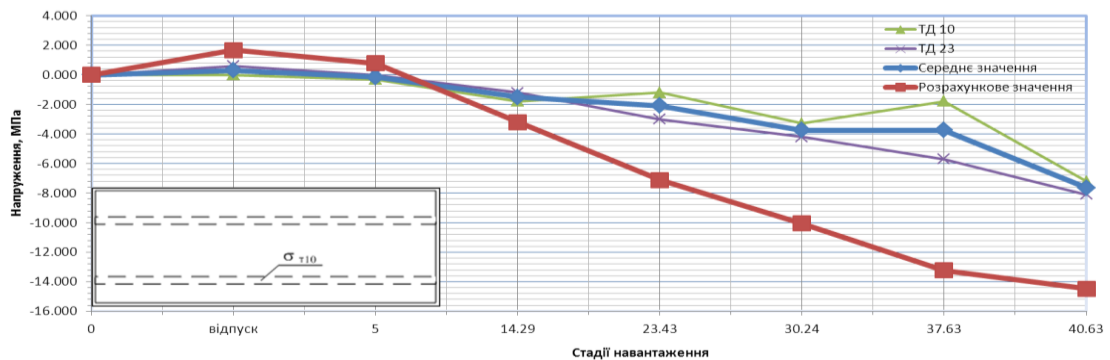


Рис. 16. Графік зміни напружень в залізобетонній плиті в середній частині від величини завантаження

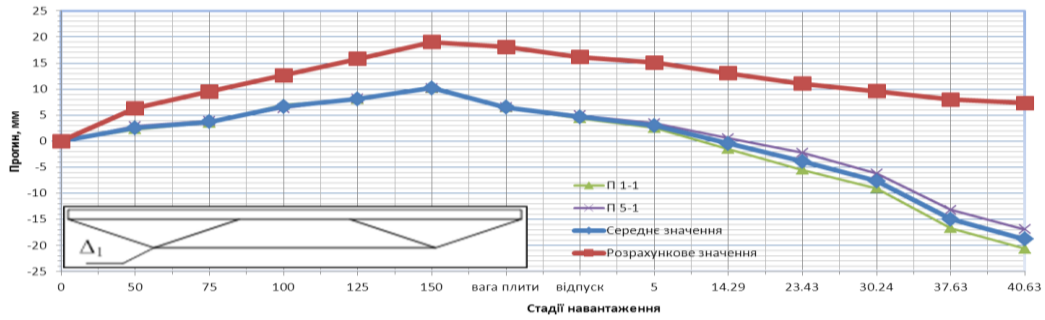


Рис. 17. Графік зміни прогинів нижнього вузла шпренгеля від величини

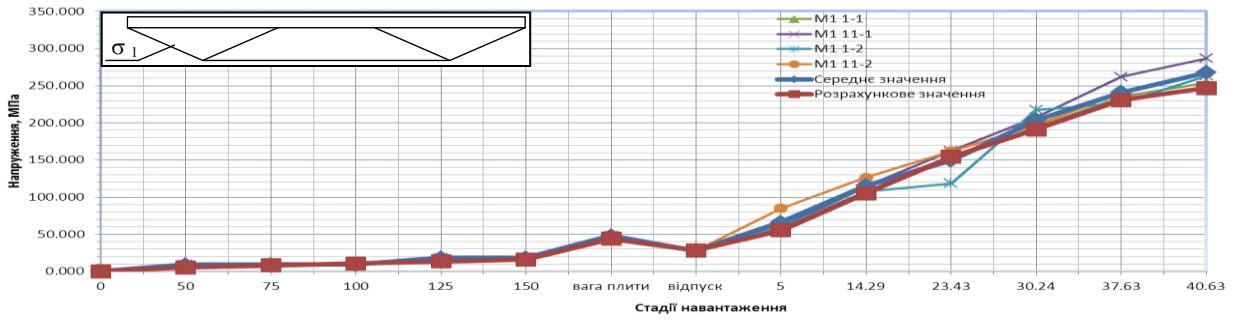


Рис. 18. Графік зміни напружень в крайніх підкосах від величини завантаження

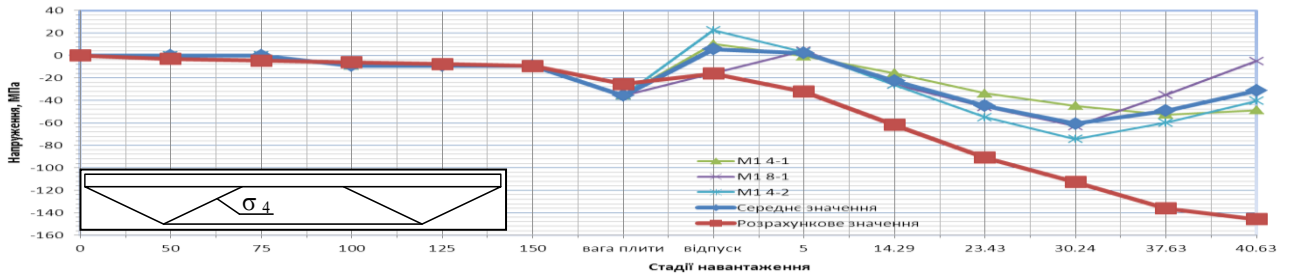


Рис. 19. Графік зміни напружень в середньому підкосі від величини завантаження

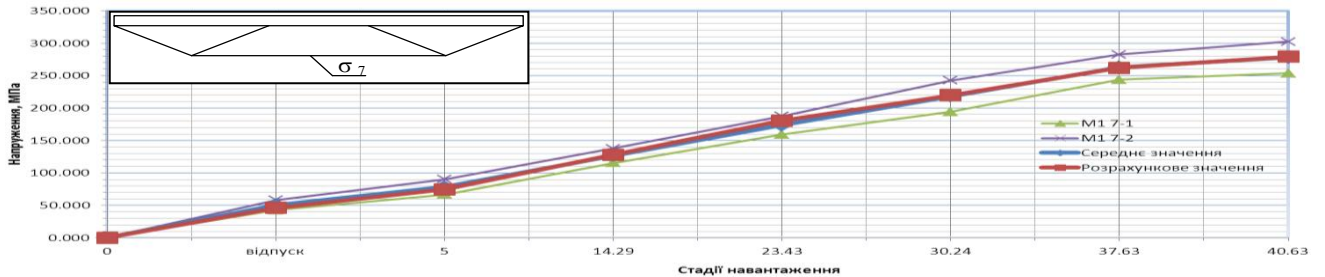


Рис. 20. Графік зміни напружень в затяжці шпренгеля від величини завантаження: 1 – експериментальна крива; 2 – теоретична крива, отримана згідно розробленої методики

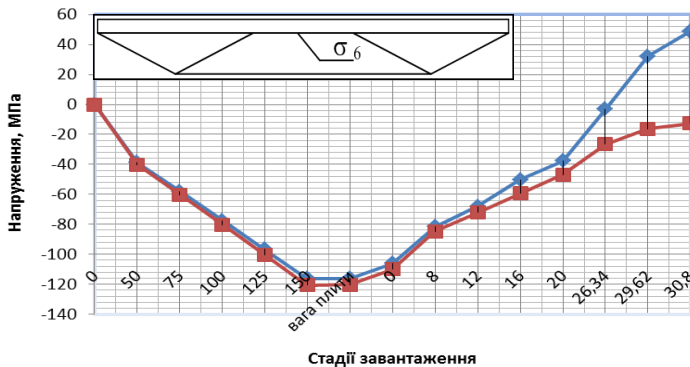


Рис. 21. Графік зміни напружень в середній частині металевого прокату балки жорсткості від величини завантаження: 1 – експериментальна крива; 2 – теоретична крива, отримана згідно розробленої методики; 3 – теоретична крива, отримана згідно розрахунку на ПК «Ліра»

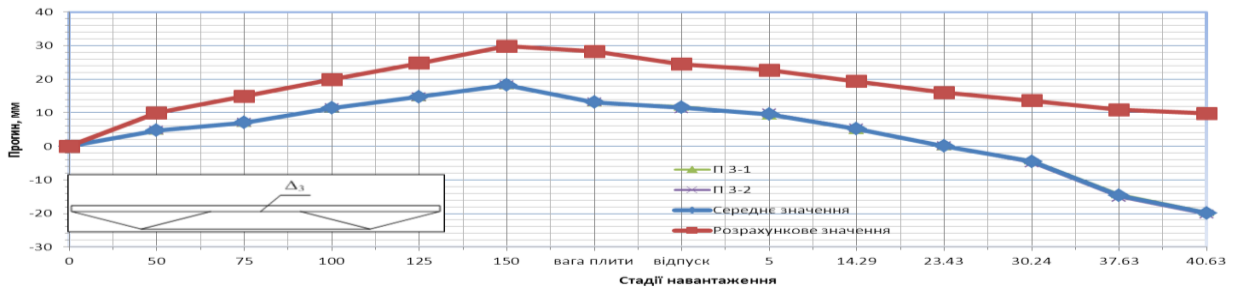


Рис. 22. Графік зміни прогинів середнього перерізу балки жорсткості від величини завантаження: 1 – експериментальна крива; 2 – теоретична крива

Разом з тим розроблена методика розрахунку має можливість врахування змінності як пружних властивостей елементів (модуля пружності бетону й арматури), так і жорсткісних характеристик. Тому збіжність результатів за розробленою методикою й експериментів в пружно пластичній стадії складає 92...96%.

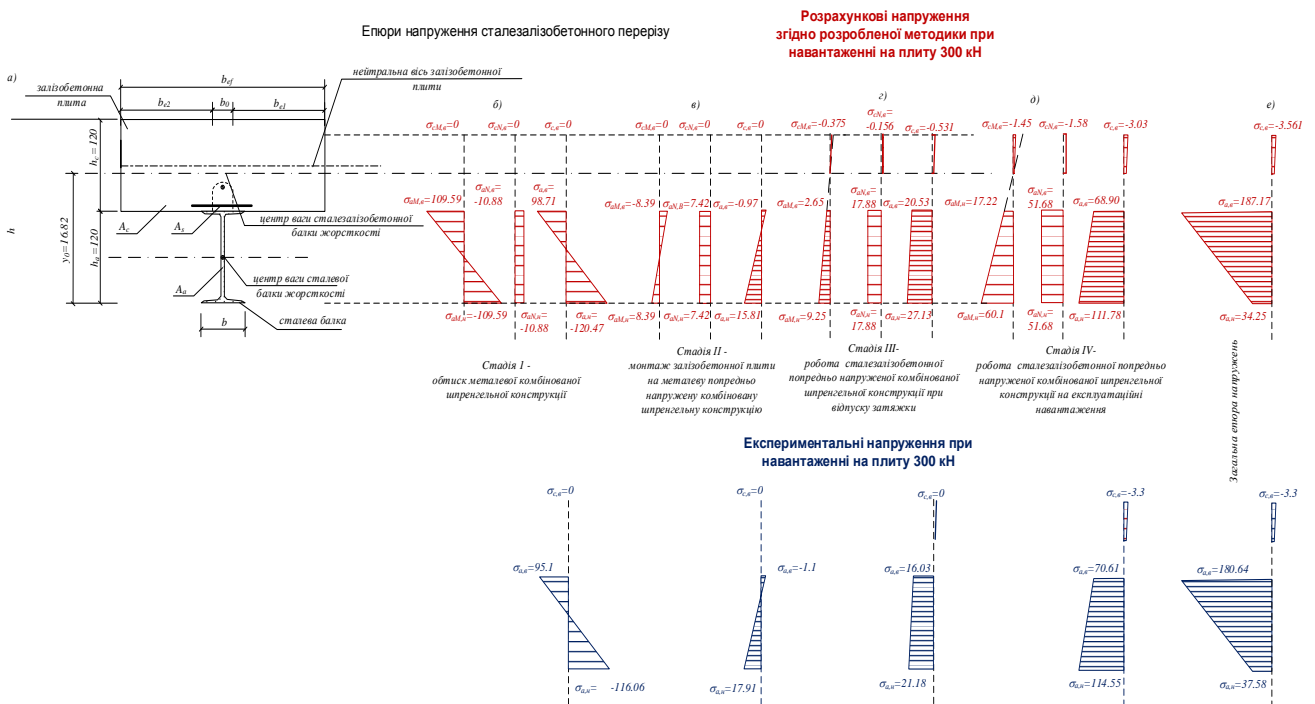


Рис. 23. Епюри напружень при різних стадіях навантаження балки жорсткості: а) розрахункова схема сталезалізобетонного перерізу; б) стадія I – обтиск металеві комбінованій шпренгельній конструкції; в) стадія II – монтаж залізобетонної плити на металеву попередньо напружену комбіновану шпренгельну конструкцію; г) стадія III – відпуск напруженої зтяжки в сталезалізобетонній попередньо напруженій комбінованій шпренгельній конструкції; д) стадія IV – робота сталезалізобетонної попередньо напруженої комбінованій шпренгельній конструкції на дію експлуатаційних навантажень; е) сумарна епюра напружень

На основі проведених експериментальних і числових досліджень, статично невизначені комбіновані сталезалізобетонні попередньо напружені шпренгельній конструкції використані на наступних об'єктах:

1) **перекрыття будівлі відпочинкового комплексу санаторію «Женева»** (м.Трускавець Львівської області, вул. Суховоля, 63) (рис.24). В ході виконання проекту будівництва прийнято було проведено порівняння щодо влаштування

перекрыть прольотом 10 і 18 м. Розглядалися варіанти з влаштування залізобетонного перекрыття як збірного, так і монолітного по металевих фермах, залізобетонних попередньо напружених балках і по металевих попередньо напружених комбінованих шпренгельних конструкціях.

Перевагами прийнятого рішення разом з економічним ефектом (табл. 3) є його легкість. З іншого боку в процесі монтажу ще до влаштування конструкції підлог мала маса перекрыття відчутним є вплив різного роду динамічних навантажень.



Рис. 24. Використання комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій при влаштуванні перекрыття за адресою: м. Трускавець, вул. Суховоля, 63: а) - влаштування попередньо напружених комбінованих металевих шпренгельних конструкцій (I-ий етап); б) - влаштування залізобетонної плити по попередньо напружених комбінованих металевих шпренгельних конструкцій (II-ий етап)

Таблиця 3

Економічний ефект застосування конструкцій

№	Тип конструкції	Вага конструкції, кг	Вартість конструкції, грн	Вартість монтажу, грн	Всього, грн	Економічний ефект, %
1	ПНШК	577.71	12710.00	2540.00	15250.00	57.76
2	МШК	756.85	16650.70	3330.14	19980.84	44.65
3	Сталезалізобетонна балка (2двотаври №45)	1694.00	30492.00	2000.00	32492.00	10.00
4	Металева ферма	1100.00	27500.00	2000.00	29500.00	18.28
5	Металева балка (2 двотаври №55)	1860.00	34100.00	2000.00	36100.00	0.00

2) **проміжне перкриття будівлі по вул. Б.Хмельницького, 176 в м. Львові.** Згідно завдання на проектування була необхідність влаштування додаткового перекрыття в існуючому колишньому виробничому корпусі корпусі (рис.25). Застосування сталезалізобетонного попередньо напруженого комбінованого шпренгельного перекрыття прольотом $L=12\text{м}$, в тому числі з одно- і двоконсольними виступами, дало змогу здешевити виконання робіт як з конструктивних рішень, так і при виконанні будівельно-монтажних робіт.

Економічний ефект застосування комбінованого сталезалізобетонного попередньо напруженого шпренгельного перекрыття в порівнянні з іншими варіантами, отриманих в ході виконання техніко-економічного обґрунтування, склав 3%...35.16% (табл. 4).



Рис. 25. Використання комбінованих сталезалізобетонних ПНШК на проміжному перекритті будівлі по вул. Б.Хмельницького, 176 в м. Львові

Таблиця 4

Економічний ефект застосування конструкцій

№	Тип конструкції	Вага конструкції, кг	Загальна вартість конструкції, грн	Економічний ефект, %
1	ПНШК	126	1733,76	35.16
2	МШК	188,5	2593,76	3.00
3	Сталезалізобетонна балка	193,4	1995,89	25.36
4	Металева балка	259,1	2673,91	0.00

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій вирішено науково-прикладне завдання з вдосконалення розрахунку та проведення експериментальних досліджень комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених конструкцій, що знайшло відображення в наступному:

1. В роботі розроблені нові комбіновані сталезалізобетонні попередньо напружені шпренгельні конструкції з регулюванням зусилля натягу затяжки нижньої підвіски.

2. Розроблена математична модель розрахунку комбінованої сталезалізобетонної попередньо напруженої шпренгельної конструкції, яка задовільняє умовам рівноваги, сумісності деформацій та фізичним умовам.

3. Запропонована методика, алгоритм і програмне забезпечення просторового розрахунку несучої здатності елементів комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних систем з використання ітераційного пошуку оптимальних параметрів напруженого деформованого стану елементів і геометричних форм конструкцій, в тому числі з врахуванням фізичної нелінійності.

4. На підставі розроблених методики, алгоритму і програмного забезпечення теоретично досліджено вплив зміни параметрів елементів комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних систем на напружено деформований стан елементів, міцність та деформативність конструкцій.

5. Проведено натурний експеримент комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій прогоном 6 м. Похибка отриманих результатів натурального випробування такої конструкції з результатами, які отримані в ході теоретичного розрахунку за розробленою в роботі методикою, алгоритмом і програмним забезпеченням, складає 2...8%.

6. Проведено аналіз отриманих експериментальних даних і порівняння їх з теоретичними результатами розрахунку міцності й деформативності комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій за запропонованою методикою та подібними методами розрахунку. При застосуванні попереднього натягу напруження по верхній грані полиці двотавра балки жорсткості на 23 % менші за допустимі значення, по нижній грані

полиці двотавра напруження становили $\sigma_{an,e}=37.58 \text{ МПа}$. На верхній грані залізобетонної плити напруження від дії згинального моменту складають $\sigma_{св}=3.03 \text{ МПа}$.

7. Експериментально встановлено, що при максимальних навантаженнях $q=16.76 \text{ кН/м}^2$ в перерізах плити виникають нормальні тріщини шириною розкриття $a_{сrc} = 0,42 \text{ мм}$, які мають тенденцію розвитку до торців плити.

8. Залізобетонна плита в сумісній роботі з металевою балкою жорсткості працює з консольними завісами $L_k=0.5 \text{ м}$. Прогин в середній частині залізобетонної плити становить $f=16.27 \text{ мм}$ і перевищує допустимі знання прогинів.

9. Економічний ефект за витратами матеріалів в порівнянні з іншими конструкціями складає 3%...57.76%, в тому числі зі сталезалізобетонною шпренгельною конструкцією - 9.8%.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО У ПРАЦЯХ:

Статті:

1. Іваник Ю.І. Статичний розрахунок рам з використанням пружних опор / Й.Й. Лучко, Ю.І. Іваник // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій: зб.наук. праць. – Львів: Каменярь, 2009. – № 11. – С. 67-81. (*Особистий внесок*: розроблено методику розрахунку конструкцій).

2. Іваник Ю.І. Міцність і деформативність сталезалізобетонної статично невизначеної комбінованої шпренгельної конструкції / Ю.І. Іваник, Ю.Ю. Вибранець // Архітектура і сільськогосподарське будівництво: Вісник Львівського Національного аграрного університету. – Львів, 2015 р. – № 16. – С. 88-99. (*Особистий внесок*: досліджено напружено-деформований стан комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій).

3. Іваник Ю.І. Розрахунок просторових попередньо напружених комбінованих сталезалізобетонних шпренгельних конструкцій / Б.Г. Демчина, Ю.Ю. Вибранець, Ю.І. Іваник // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб.науч.трудов. – Дніпропетровськ, 2015– № 82. – С. 77-84. (*Особистий внесок*: розроблено методику та алгоритм розрахунку комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій).

4. Іваник Ю.І. Дослідження напружено-деформованого стану сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій в умовах постадійної роботи / Б.Г. Демчина, Ю.І. Іваник // Містобудування та територіальне планування: Наук.-техн. збірник. – К., КНУБА, 2016. – №61– С. 50-61. (*Особистий внесок*: досліджено напружено-деформований стан експериментальних комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій).

5. Іваник Ю.І. Експериментальні дослідження міцності й деформативності сталезалізобетонної статично невизначеної комбінованої шпренгельної конструкції / Б.Г. Демчина, Ю.І. Іваник, Б.Л. Назаревич // Nowoczesne rozwiązania materiałowe i konstrukcyjne oraz problemy eksploatacyjne dotyczące budownictwa ogólnego i hydrotechnicznego: Monografia jubileuszowa. - Poznan, 2016.- р. 453-464. (*Особистий внесок*: досліджено особливості роботи, напружено-деформований стан та характер руйнування комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій).

АНОТАЦІЯ

Іваник Ю.І. Міцність і деформативність комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених конструкцій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.01 – будівельні конструкції, будівлі та споруди. Національний університет "Львівська політехніка" Міністерства освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню методики розрахунку, розробці програми та вивченню роботи комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних систем. Проведені експериментальні дослідження натурних зразків. Зазначено особливості роботи елементів на дію симетричного та несиметричного навантаження. Зафіксовано характер тріщиноутворення дослідних зразків, що показує процес їх руйнування. Збіжність теоретичних та експериментальних значень склала 83-96%.

Дослідження комбінованих сталезалізобетонних попередньо напружених шпренгельних конструкцій супроводжувалися проектуванням реальних конструкцій та впровадженням їх у будівництво. З використанням розроблених рекомендацій запроєктовано конструкції прольотом від 6, 10, 12 і 18 м, які застосовано для будівель громадського призначення, як при новому будівництві, так і при реконструкції.

Ключові слова: комбінована сталезалізобетонна попередньо напружена шпренгельна конструкція, металева комбінована шпренгельна конструкція, рівняння нерозривності деформації, міцність, деформативність.

АННОТАЦИЯ

Иваник Ю.И. Прочность и деформативность комбинированных сталежелезобетонных предварительно напряженных конструкций. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения. Национальный университет "Львовська політехніка" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена совершенствованию методики расчета, разработке программы и изучению работы комбинированных сталежелезобетонных предварительно напряженных шпренгельных систем.

Во введении обоснованы актуальность, новизна и практическое значение диссертационной работы, указана необходимость теоретических и экспериментальных исследований прочности и деформативности комбинированных сталежелезобетонных предварительно напряженных шпренгельных конструкций (ПНШК).

В первом разделе рассмотрено применение комбинированных сталежелезобетонных ПНШК в работе строительных сооружений и конструкций, проведен обзор и анализ существующих методик расчета прочности и деформативности сечений элементов и сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во втором разделе разработаны математическая модель, методика и алгоритм пространственного расчета прочности и деформативности элементов комбинированных сталежелезобетонных ПНШК.

В третьем разделе проведены теоретические расчеты разработанной конструкции с учетом симметричной и несимметричной нагрузок. На основании проведенных теоретических расчетов запроектированы натурные экспериментальные модели.

Четвертый раздел посвящен проведению и анализу экспериментальных исследований ПНШК пролетом 6 м при различных схемах нагрузок. Приведена характеристика материалов, из которых изготовлены опытные конструкции, схема экспериментальной установки и методика проведения испытаний. Исследование комбинированных сталежелезобетонных предварительно напряженных шпренгельных конструкций сопровождалось проектированием реальных конструкций и внедрением их в строительство. С использованием разработанных рекомендаций запроектировано конструкции пролетом 6, 10, 12 и 18 м, которые применены для зданий общественного назначения, как при новом строительстве, так и при реконструкции.

Практическое значение работы состоит в возможности использования разработанных комбинированных сталежелезобетонных предварительно напряженных шпренгельных конструкций различной длины, а также полученных экспериментальных и теоретических данных, методики, алгоритма и программного обеспечения пространственного расчета прочности и деформативности в практике проектирования и учебном процессе. Сходимость теоретических и экспериментальных значений составила 83-96%.

Ключевые слова: комбинированная сталежелезобетонная предварительно напряженная шпренгельная конструкция, металлическая комбинированная шпренгельная конструкция, уравнение неразрывности деформации, прочность, деформативность.

ABSTRACT

Ivanyk Y.I. The strength and deformability combined sustainable prestressed reinforced constructions. – On the rights of manuscript.

The dissertation for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.23.01 – constructions and buildings. Lviv Polytechnic National University Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The thesis is devoted to improving methods of calculation, program development and study of sustainable combined prestressed reinforced trussing systems. Experimental research specimens. These features elements of the action of symmetric and asymmetric loads. There cracking character prototypes that shows the process of fracture. The convergence of theoretical and experimental values was 83-96%.

The study combined sustainable prestressed reinforced trussing constructions accompanied by real designs the design and implementation of them in construction. Using the developed recommendations designed structures span of 6, 10, 12 and 18 of that applied to public buildings, as new construction and the renovation.

Keywords: combined sustainable concrete pre-strained trussing structure, combined metal trussing structure, continuity equation deformation, strength, deformability.