

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ**

ІГНАТИШИН МИКОЛА ІВАНОВИЧ

УДК 539.3:620.0.12

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-
ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ МОСТІВ**

Спеціальність 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль –2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Мукачівському державному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник -

доктор технічних наук, професор **Лучко Йосип Йосипович**, Львівська філія Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, професор кафедри рухомого складу та колії, м. Львів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Чаусов Микола Георгійович**, Національний університет біоресурсів і природокористування України, завідувач кафедри опору матеріалів та будівництва, м. Київ


доктор технічних наук, професор **Бабич Степан Юрійович**, Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України, провідний науковий співробітник, м. Київ

Захист дисертації відбудеться «__»_____ 2011 р. о __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К58.052.01 в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий «__»_____ 2011 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Шелестовський Б. Г.

Определено по результатам статических и динамических испытаний механические параметры железобетонной плиты проездной части моста: цилиндрическую жесткость, модуль упругости, эффективную толщину и т. п.

Ключевые слова: опора, балка, плита, трещина, коэффициент интенсивности напряжений, мост, армирование, метод конечных элементов.

SUMMARY

Ihnatyshyn M. Development of methods of calculation of stress and strain analysis and determination of the mechanical parameters of concrete structures of bridges. – Manuscript. Thesis for Ph.D. degree. Specialty 01.02.04 – Mechanics of deformable solids. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2011.

The thesis aimed at developing methods of calculation of stress and strain analysis and determination of the mechanical parameters of concrete structures of bridges. Based on scientific approach, methods of investigation of dynamic characteristics of mechanical parameters have been improved as well as improved elements of the concrete structures of bridges. Analytical methods and numerical solution of differential equations describing the basic elements of bridge structures such as: resistance, beam, plate have been reviewed critically and constructively. Differential equations of slab bridge deformation that have been developed are useful for field tests results processing.

Key words: bearing, beam, plate, dynamic coefficient of the bridge reinforcement, numerical methods, finite element method.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Автодорожні мости – це одна з найважливіших складових інфраструктури країни. Зростання інтенсивності руху, ваги транспортних засобів вимагає періодичної технічної діагностики та оцінки стану об'єктів магістралей. Особливо важлива така оцінка для мостів, які експлуатуються тривалий час, адже в цьому випадку визначення працездатності конструкції саме й полягає у виявленні змін локальних та інтегральних характеристик її елементів, розрахунку внутрішніх силових факторів, спричинених цими змінами, та врахуванні отриманої інформації при проектуванні нових мостів, реконструкції старих та прогнозуванні ресурсу споруди.

У створення теорії залізобетону, як важливого матеріалу в мостобудуванні, зробили великий внесок вітчизняні та зарубіжні вчені, такі як І. Н. Ахвердов, Є. М. Бабич, В. Н. Байков, А. М. Бамбура, А. А. Гвоздев, О. Б. Голишев, Й. Й. Лучко, Н. М. Мулин, А. А. Оатул, Б. Б. Ужполявичюс, М. М. Холмянський та ін. Однак завершеної теорії залізобетону на даний час немає.

Становлення сучасної механіки деформівного тіла та механіки руйнування відбувається під впливом вітчизняних наукових шкіл О. М. Гузя, В. В. Панасюка, В. Т. Троценка, П. В. Яснія та ін.

Дослідженнями стану мостів, проектуванням, реконструкцією, діагностикою та оцінкою ресурсу займаються Н. Г. Бондарь, Б. Г. Гнідець, В. Г. Кваша, П. М. Коваль, В. П. Кожушко, А. І. Лантух-Лященко, Й. Й. Лучко, О. С. Распов та ін. В Україні мостобудування передовсім пов'язане з іменем Є. О. Патона.

Дослідження конструктивних матеріалів і залізобетонних конструкцій методами механіки деформівного тіла та механіки руйнування розвито в працях І. Ю. Бабича, С. Ю. Бабича, В. С. Дорофєєва, Й. Й. Лучка, Є. М. Перпесипкіна, В. П. Силованюка, Г. Т. Сулима, Л. П. Трапезнікова, М. Г. Чаусова, П. В. Яснія та ін.

Математичним моделюванням та прикладним застосуванням математичного апарату для дослідження напружено-деформованого стану матеріалів та елементів конструкцій займаються А. Е. Андрейків, В. А. Кривень, В. В. Маринець, М. С. Михайлишин, О. Ф. Обшта, В. Ф. Чекурін та інші.

Проте сьогодні залишаються недостатньо дослідженими метод К-тарування балкових елементів, аналітичні методи розрахунку тріщиностійкості армованих балок таврового перерізу, способи оцінки точності числових методів визначення напружено-деформованого стану. У переважній більшості дослідження мостових конструкцій проводяться числовим методом, які не завжди дають зручні результати для інженерної практики і є принципово наближеними. У цьому зв'язку актуальним завданням є розв'язання чисельних та аналітичних

методів визначення інтегральних механічних параметрів залізобетонної плити проїзної частини моста та побудова відповідних інженерних формул. Потребують вивчення та вдосконалення способи з'єднання арматури, які суттєво впливають на зміну напружено-деформованого стану залізобетонних конструкцій мостів, що зазнають циклічні навантаження.

Отже, задачі і методи розрахунку напружено-деформованого стану та визначення механічних параметрів залізобетонних конструкцій мостів є актуальними та містять науковий і практичний інтерес.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає плану наукових досліджень Мукачівського державного університету та частково виконана в рамках плану науково-дослідних робіт Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України за такими програмами і темами: «Розробка методики прогнозування експлуатаційної надійності металевих елементів мостових конструкцій» (г/д 2982, держ-реєстраційний №0102U005796), «Оцінка залишкового ресурсу роботи мостових конструкцій при довготривалих навантаженнях» (ПНД-12/239, держ-реєстраційний №0102U002682), «Оптимізація складу бетону для виготовлення корозійностійких залізобетонних конструкцій мостів. Розробка методу оптимального з'єднання арматури» (НД-12/251, держ-реєстраційний №0102U002680).

Мета роботи. Розробити методику розрахунку напружено-деформованого стану елементів конструкції моста, зокрема мостової залізобетонної плити, її інтегральних механічних характеристик та вдосконалити спосіб армування елементів мостових конструкцій з метою оптимізації їх напружено-деформованого стану, підвищення несучої здатності та ресурсу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **науково-технічні завдання:**

- удосконалити методику розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень, дослідити динамічну поведінку залізобетонної плити проїзної частини моста;
- дослідити конструкцію й технологію з'єднання та армування стержневої арматури, удосконалити армування елементів мостових конструкцій;
- удосконалити розрахунок напружено-деформованого стану елементів мостових конструкцій числовими методами;
- дослідити напружено-деформований стан мостової балки із тріщиною;
- розрахувати напружено-деформований стан сталі-залізобетонного моста методом скінчених елементів;
- дослідити моделі напружено-деформованого стану вільно опертої мостової плити аналітичним методом за різних видів навантаження, розробити програми та рекомендації з розрахунку характеристик напружено-деформованого стану конструкцій мостів, зокрема, інтегральної циліндричної жорсткості, ефективної

Получено общую частотную функцию железобетонной плиты проездной части моста. Использовано частотную функцию в качестве связующего звена между результатами натуральных испытаний и ее механическими параметрами.

Предложено и запатентовано соединение арматуры втулкой обжатой профильным пуансоном. Такое соединение имеет большую надежность, стойкость к циклическим нагрузкам. Усовершенствованное армирование элементов железобетонных мостовых конструкций использовано при армировании мостовых переходов и путепроводов.

Усовершенствовано аналитические и числовые методы решений дифференциальных уравнений, которые описывают основные элементы мостовых конструкций: опоры, балку, плиту.

Теоретически исследовано численные решения уравнений деформации опоры и балки в полиномиальных и тригонометрических базисных функциях. Установлено, что невязка решений, полученных в разных базисах, зависит от способа закрепления краев и распределения нагрузки. Потеря устойчивости решений в разных базисах происходит при разных степенях разбития конструкции на конечные элементы. Для повышения надежности математического моделирования элементов мостовых конструкций предложено дублирование численных решений в базисах построенных в разных классах функций. Точность полученных решений в разных базисах предложено оценивать их невязкой.

Использовано аппарат обобщенных функций, элементов теории упругости и концепций механики хрупкого разрушения для развития методики нахождения напряженно-деформированного состоянию балки таврового профиля при наличии в ней дефекта типа трещины.

Смоделировано напряженно-деформированное состояние моста в виде плиты в форме параллелограмма. Построено ряд моделей от меньшей степени разбития на конечные элементы до большей, от модели не учитывающей балки до модели учитывающей их. Установлена достаточно приемлемая сходимость результата к оптимальному значению при росте степени разбивки на конечные элементы и учете балок жесткости.

Математическая модель ортотропной тонкой плиты, представленная соответствующим дифференциальным уравнением, является шире в познавательном плане, поскольку имеет как действительные, полезные из практической точки зрения, решения, так и комплексные, которые описывают ортотропную плиту с поперечным армированием, которое на практике не используется.

Получено полезные для обработки результатов натуральных испытаний аналитические соотношения и решения дифференциальных уравнений деформации железобетонной плиты проездной части моста.

твердого тіла. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, 2011 рік.

Дисертаційна робота спрямована на розробку методики розрахунку напружено-деформованого стану та визначення механічних параметрів залізобетонних конструкцій мостів.

На основі науково обґрунтованого підходу вдосконалено методи дослідження динамічних характеристик, визначення механічних параметрів та покращено елементи залізобетонних конструкцій мостів.

Розвинуто аналітичні та числові методи розв'язку диференціальних рівнянь, що описують основні елементи мостових конструкцій: опору, балку, плиту, на основі яких отримано аналітичні співвідношення для обробки результатів натурних випробувань та розв'язки диференціальних рівнянь деформації залізобетонної плити проїзної частини моста.

Визначено за результатами статичних і динамічних випробувань механічні параметри залізобетонної плити проїзної частини моста: циліндричну жорсткість, модуль пружності, ефективну товщину і т. п.

Отримано числові розв'язки диференціальних рівнянь деформації опори та балки в поліноміальному та тригонометричному базисах і запропоновано мірою точності числового розв'язку вважати нев'язку між розв'язками, що отримані в різних базисах.

Ключові слова: опора, балка, плита, тріщина, коефіцієнт інтенсивності напружень, міст, армування, метод скінченних елементів.

АННОТАЦИЯ

Игнатишин Н. И. Разработка методики расчета напряженно-деформированного состояния и определение механических параметров железобетонных конструкций мостов. – Рукопись. Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, г. Тернополь, 2011 год.

Диссертационная работа направлена на разработку методики расчета напряженно-деформированного состояния и определение механических параметров железобетонных конструкций мостов.

Усовершенствовано метод исследования динамических характеристик.

В результате исследования коэффициента интенсивности напряжения установлено, что собственные частоты колебаний образца зависят от отношения его длины и высоты, относительной глубины трещины, коэффициента Пуассона. Полученные формулы можно использовать для К-тарирования балочных образцов с трещиной не перпендикулярной поверхности образца.

товщини і густини, модуля пружності залізобетонної плити проїзної частини моста за результатами натурних випробувань.

Об'єкт дослідження: конструктивні елементи моста, зокрема проїзна частина сталевих-залізобетонних плит прогонової будови моста.

Предмет дослідження: моделі механіки деформівного тіла, що описують напружено-деформований стан моста під час статичних і динамічних випробувань та у процесі його експлуатації.

Методи дослідження. У теоретичних дослідженнях застосовані проєкційні та аналітичні методи механіки деформівного твердого тіла. В експериментальних дослідженнях – статичне і динамічне випробування мостів тривалої експлуатації, дослідження зразків матеріалів.

Достовірність теоретичних й експериментальних результатів, викладених у дисертації, підтверджена результатами експериментальних досліджень на лабораторних зразках та натурних конструкціях, статичних і динамічних випробуваннях мостів, а також порівнянням їх у ряді випадків із науковими літературними даними.

Інформаційною базою дослідження слугували наукові видання вітчизняних та зарубіжних учених, результати статичного й динамічного випробування мостів, математичні моделі механіки деформівного твердого тіла, а також державні нормативи і стандарти з питань мостобудування та їхнього випробування.

Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше, для довільного кута розміщення тріщини до поверхні залізобетонної конструкції, розроблено методику розрахунку коефіцієнта інтенсивності напружень;
- удосконалено армування залізобетонних мостових конструкцій за допомогою арматури, кінці якої з'єднані втулками, обтиснутими спеціальними профільними пуансонами;
- отримало подальший розвиток дослідження балки із тріщиною, одержано залежності, що визначають напружено-деформований стан балки таврового профілю;
- розвинуто метод скінченних елементів стосовно розрахунку вертикальних переміщень та силових факторів у сталевих-залізобетонному мості, представленому пластиною у вигляді паралелограма, підкріпленою стальними балками та ребрами жорсткості;
- вперше отримано у явному вигляді аналітичний розв'язок диференціального рівняння поперечного згину залізобетонної плити проїзної частини моста під дією локальних навантажень, досліджено динаміку поведінки вільно опертої плити, отримано співвідношення, що пов'язують результати статичних та динамічних випробувань із фізичними параметрами залізобетонної плити проїзної частини моста.

Практичне значення роботи:

- розроблено та впроваджено пакети прикладних програм для чисельного аналізу поперечного згину та розрахунку механічних параметрів плити прогонової будови моста і візуалізації отриманих результатів;
- обґрунтовано обчислювальні схеми дослідження деформування елементів мостових конструкцій, які суттєво покращують ефективність розрахунку і уможливають побудову простих формул для опису поведінки елементів мостових конструкцій під статичними і динамічними навантаженнями;
- застосовано на практиці отримані аналітичні співвідношення для К-тарування мостових залізобетонних балок;
- отримано співвідношення, що мають прикладне значення при розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонної балки з тріщиною;
- реалізовано у практиці мостобудування спосіб і пристрій з'єднання арматурних стержнів.

Результати роботи використані:

- у навчальному процесі Ужгородського національного університету при викладанні дисциплін «Будівельна механіка», «Залізобетонні конструкції», «Комп'ютерне проектування», «Опір матеріалів», «Прикладна механіка»;
- у навчальному процесі Мукачівського державного університету при викладанні дисципліни «Прикладна механіка»;
- при проведенні періодичних випробувань та випробувань на надійність бетонних і залізобетонних плит, для визначення їх механічних параметрів, зокрема модуля пружності, циліндричної жорсткості, згинальних та крутних моментів, зрізаючих сил, напружень на Мукачівському заводі залізобетонних виробів;
- львівською філією «Західдіпрошлях» при розрахунку напружено-деформованого стану та визначенні механічних параметрів залізобетонних плит мостів;
- при обробці результатів статичного випробування моста через р. Стара Ріка на автодорозі Мукачєво – Рахів – Івано-Франківськ – Рогатин (км 92+700 у Закарпатській області);
- при розробці нормативних документів, зокрема ТУ У В.26.6-00018112-257:2006 «З'єднання стержнів арматурних обтисненням гільзами», СОУ 45.2 – 10018112 – 016: 2007 «З'єднання арматурних стержнів обтисненням втулками», МР В.2.3-218-03534506-510:2006, методичні рекомендації «З'єднання арматурних стержнів обтисненням втулками»;
- при армуванні конструкцій мостових переходів, шляхопроводів, набивного стовпа на мостах використано запропоноване втулкове з'єднання.

Особистий внесок здобувача полягає в проведенні аналізу науково-технічної літератури [1, 18] за темою дисертації, постановці та вирішенні основних теоретичних, науково-технічних завдань дослідження. Автор отримав

Ігнатишин М. І. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. – О. : Одеська державна академія будівництва та архітектури, 2009. – Вип. 35. – с. 219-227.

11. Лучко Й. Й. Побудова чисельно-аналітичних схем розрахунку елементів будівельних конструкцій балкового типу / Лучко Й. Й., Іваник Є. Г., Ігнатишин М. І. // Теорія і практика розвитку АПК : зб. матеріалів міжнародного науково-практичного форуму. – Л. : Львівський державний аграрний університет, 2007. – с. 415- 424.

12. Лучко Й. Й. Поперечний згин вільно опертої ортотропної мостової плити під дією системи локальних навантажень / Лучко Й. Й., Ігнатишин М. І. Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наукових праць. – Л. : Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 2004. – Вип. 6. – с. 71-81.

13. Лучко Й. Й. Поперечний згин ортотропної залізобетонної плити / Лучко Й. Й., Ігнатишин М. І. // Вісник технічного університету Поділля : технічні науки. – Х.: Технологічний університет Поділля, 2002. – Вип. 5. – с.28-30.

14. Лучко Й. Й. Рекомендації з розрахунку характеристик напружено-деформованого стану конструкцій мостів / Лучко Й. Й., Ігнатишин М. І. – Львів : ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, 2010. – с. 1-24.

15. Лучко Й. Й. Розв'язання диференціального рівняння деформації тонкої плити та його прикладне застосування / Лучко Й. Й., Ігнатишин М. І. // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наук. праць. – Л. : Каменярь, 2008. – Вип. 10. – с. 95-102.

16. Лучко Й. Й. Числові та аналітичні методи розрахунку мостових конструкцій / Лучко Й. Й., Ігнатишин М. І. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – Д. : Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту, 2010. – Вип. 33. – с.161-166.

17. Патент України №63168 А : Спосіб з'єднання арматурних стержнів періодичного профілю та пристрій для його реалізації / Лучко Й. Й., Іваницький Я. Л., Штаюра С. Т., Ігнатишин М. І. // Бюл. №1 / опубл. 15.01.2004

18. Руйнування мостів тривалої експлуатації / [Лучко Й. Й., Стадник М. М., Хархаліс Р. М., Ігнатишин М. І., Ушак Т. Г.] // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : зб. наук. праць. – Л. : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2002. – Вип. 5. – с.525-533.

АНОТАЦІЯ

Ігнатишин М. І. Розробка методики розрахунку напружено-деформованого стану та визначення механічних параметрів залізобетонних конструкцій мостів. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – Механіка деформованого

2. Ігнатишин М. І. Аналітично-числовий метод розрахунку вільно опертих ортотропних плит для мостів у системі MATHCAD / Ігнатишин М. І. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : зб. наукових праць. – Л. : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2002. – Вип. 5. – с. 495-504.

3. Ігнатишин М. І. Визначення інтегральної циліндричної жорсткості моста за результатами статичних випробувань / Ігнатишин М. І., Лучко Й.Й. // Збірник наукових праць ДДНДІ ім. М. П. Шульгіна. – К. : Державний дорожній науково-дослідний інститут ім. М. П. Шульгіна, 2008. – с. 91-96.

4. Ігнатишин М. І. Сучасний стан проблеми з'єднання арматури періодичного профілю у залізобетонних конструкціях / Ігнатишин М. І., Гвоздюк М. М. // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наукових праць / за загальною редакцією професора Лучка Й. Й. ; НАН України ; Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка. – Л. : Каменярь, 2004. – Вип. 6. – с. 42-47.

5. Лучко Й. Й. Визначення власних частот коливань, ефективної товщини та модуля пружності залізобетонної плити при різних способах опирання / Лучко Й. Й., Ігнатишин М. І. // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наукових праць. – Л. : Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2009. – Вип. 11. – с. 81-90.

6. Лучко Й. Й. Визначення деформації балкових елементів аналітичними та числовими методами / Лучко Й. Й., Ігнатишин М. І. // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наукових праць. – Л. : НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, 2006. – Вип. 8. – с. 45-58.

7. Лучко Й. Й. Визначення динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень у балкових мостових конструкціях / Лучко Й. Й., Бойко В. М., Ігнатишин М. І. // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наук. праць / за заг. редакцією професора Лучка Й. Й. – Л. : Каменярь, 2003. – Вип. 5. – с.112-122.

8. Лучко Й. Й. Визначення напружено-деформованого стану мостової опори аналітичними та числовими методами / Лучко Й. Й., Іваник Є. Г., Ігнатишин М. І. // Діагностика, довговічність та реконструкція мостів і будівельних конструкцій : зб. наукових праць / за загальною редакцією професора Лучка Й.Й. – Л. : Каменярь, 2007. – Вип. 9. – с. 91-100.

9. Лучко Й. Й. Диференціальне рівняння деформації плити та його застосування / Лучко Й. Й., Ігнатишин М. І. // Вісник Тернопільського державного технічного університету : том 14. – Т. : Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя, 2009. – Вип. 2. – с. 22-30.

10. Лучко Й. Й. Методика розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонної балки таврового профілю з тріщиною / Лучко Й. Й., Іваник Є. Г.,

аналітичні співвідношення, що пов'язують результати статичних та динамічних випробувань мостової плити з її механічними параметрами та використав для аналізу натурних випробувань моста [2, 3, 5, 9, 12, 13, 14, 15]; науково обґрунтував чіткі рекомендації щодо оцінки точності та покращення чисельних методів на прикладі розв'язку диференціальних рівнянь деформації опори та балки в поліноміальних і тригонометричних базисах [6, 8, 11, 16,].

За безпосередньої участі автора отримано співвідношення для здійснення К-тарування мостових балкових зразків із довільним розміщенням тріщин [7], розрахунку напружено-деформованого стану залізобетонної балки з тріщиною [10]; здійснено оптимізаційний розрахунок залізобетонного моста методом скінченних елементів; розроблено спосіб і пристрій з'єднання арматурних стержнів та реалізовано у практиці мостобудування [4, 17].

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались на 5 наукових конференціях, симпозіумах і семінарах, у тому числі на Міжнародних симпозіумах «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій» (Луцьк – 2002 рік, Ужгород – 2005 рік, на Міжнародному науково-практичному форумі «Екологічні, економічні та технологічні аспекти використання земельних ресурсів» (Дубляни – 2007). Дисертаційна робота доповідалась в повному обсязі на наукових семінарах Мукачівського державного університету, Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, Львівського національного аграрного університету, Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу і отримала позитивну оцінку.

Публікації. Результати роботи викладені в 18 наукових працях, зокрема у 9-ти фахових наукових журналах і збірниках та у 5-х збірниках наукових праць та матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій (симпозіумів), а також в одному деклараційному патенті на винахід.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів і висновків, списку літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації – 196 сторінок машинопису (основний зміст 153 сторінки, 94 рисунки та 5 таблиць). У бібліографії зазначено 162 найменування літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, визначено його мету, основні завдання, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані їх апробації та впровадження, показано можливість теоретичного і практичного використання.

У першому розділі дисертаційної роботи проведено різнобічний аналіз стану мостів в Україні та дано їм загальну оцінку. Основна увага зосереджена на методах моделювання конструктивних елементів мостової споруди засобами

механіки деформівного тіла. Розглянуто аналітичні та числові методи розрахунку статичного і динамічного навантаження залізобетонних конструкцій моста. Проаналізовано конструкцію і технологію з'єднання арматури, що широко застосовується при виготовленні залізобетонних конструктивних елементів мостової споруди: опори, балки, плити.

На основі досліджень, аналізу літературних джерел зроблено висновки про необхідність подальшого розвитку та вдосконалення аналітичних, числових методів дослідження конструктивних елементів моста засобами механіки деформівного тіла; обґрунтовано необхідність вдосконалення технології армування основного матеріалу, що застосовується в мостобудуванні, – залізобетону.

У другому розділі розглянуто методи визначення та покращення параметрів характеристик матеріалів та конструкцій мостів.

У підрозділі 2.1 удосконалено метод К-тарування балкових зразків, ослаблених тріщиною, зокрема, розглянуто випадок, за якого тріщина виходить на поверхню зразка під кутом α (рис. 1) до неї.

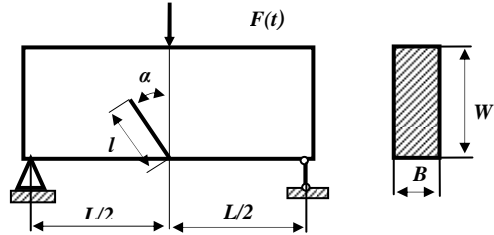


Рис. 1 Схема навантаження зразка.

Розв'язується квазістатична задача для балки з косою тріщиною, яка з основою балки утворює кут α . Вважається, що прикладене до верхньої основи балки навантаження змінюється з часом повільно настільки, що силами інерції можна знехтувати. Розв'язок задачі полягає у визначенні змінного у часі коефіцієнта інтенсивності напружень та його дослідження. Задача розв'язана методом суперпозиції: визначено поле напружень, спричинених прогином балки, і поле напружень тіла з тріщиною, на краях якої діють напруження, знайдені із розв'язку для суцільної балки. Загальний вигляд розбиття зразка на скінченні елементи показано на рис. 2.

При розбитті зразка на скінченні елементи використовувались восьми-вузлові елементи. В околі вершини тріщини використовувались вироджені до трикутних елементи. Отримано та використано на практиці співвідношення для К-тарування балкових зразків із тріщиною, яка не перпендикулярна до поверхні зразка.

У підрозділах 2.2 та 2.3 досліджено динамічну поведінку мостової плити. Отримано частотне рівняння $F(\alpha_i)=0$, корені якого пов'язують власну частоту коливань мостової плити з її фізичними характеристиками.

в'язків оцінена за різницею розв'язків, знайдених у різних базах. Розвинуто методуку знаходження напружено-деформованого стану балки таврового профілю за наявності в ній дефекту типу тріщини. При цьому ефективний результат здобуто за допомогою апарату узагальнених функцій, елементів теорії пружності та концепцій механіки крихкого руйнування. Отримані результати можуть використовуватись в інженерній практиці для знаходження ширини розкриття тріщини армованої балки.

3. Розроблено методуку наближеного аналізу балки з косою тріщиною, що базується на суперпозиції пружних полів суцільної балки та поля тіла з тріщиною. Зокрема встановлено, що найбільш небезпечна вертикальна орієнтація тріщини, для якої за усіх решти однакових умов коефіцієнт інтенсивності напружень $K_1 = K_1^0$ є максимальним. Для зосередженої сили сталої величини K_1 залежить від точки прикладання сили і при $\alpha = 90^\circ$ набуває найбільшого значення, коли сила діє у точці на продовженні тріщини. Якщо α менше за 60° коефіцієнт набуває максимального значення, коли з вершини тріщини точку прикладання сили видно під кутом близьким до прямого.

4. Запропоновано послідовність ієрархічних моделей НДС плити у формі паралелепіпеда, що використовують послідовно дрібніші схему скінченних елементів і уможливають урахування підкріплення плити балками жорсткості.

5. Досліджено НДС тонкої поздовжньо армованої плити з допомогою комплексного ряду Фур'є. Методом розвинення у ряди за гіперболічними та тригонометричними системами функцій отримано зручніші за результати чисельних методів, інженерні формули, що описують спричинений власною вагою прогин мостової плити, який використовується у стандартах країн ЄС і України. Зокрема для моста через ріку Стара Ріка: – визначена циліндрична жорсткість $D=3,777 \cdot 10^{10}$ Нм; – ефективна товщина плити, – $h = 1,239$ м.

6. Запропоновано і запатентовано втулкеве з'єднання арматури, шляхом обтискування профільним пуансоном, що дає значно надійніше зчеплення та вищу довговічність під втомним циклічним навантаженням. Воно знайшло практичне використання при армуванні конструкцій мостових переходів, шляхопроводів, набивного стовпа на мостах.

Список опублікованих автором праць за темою дисертації

1. Ігнатишин М. І. Аналіз чисельних методів розрахунку мостових конструкцій / Ігнатишин М. І. // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : збірник наукових праць. – Л. : НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка, 2005. – Вип. 6. – с. 659-668.

Математично змодельовано максимальне навантаження моста. На ньому умовно розміщено п'ять автомобілів загальною вагою 116 тонн ($2 \times 22 + 3 \times 24$).

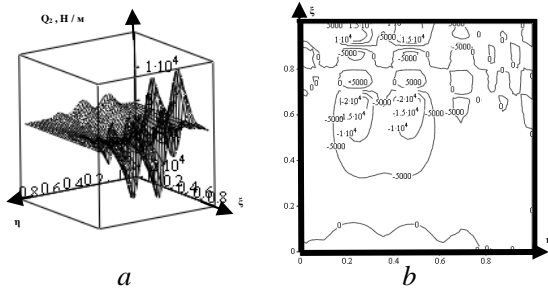


Рис. 12. Поперечна сила у площині $\xi = \text{const}$ (a - поверхневий графік, b - контурний графік).

тонної плити проїзної частини моста: $D = 3,777 \times 10^{10}$, $h = 1,239$ м. Отримано всі деформаційні та силові характеристики напружено-деформованого стану моста.

ВИСНОВКИ

На основі проведених експериментальних і теоретичних досліджень у дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача розробки інженерної методики розрахунку напружено-деформованого стану та визначення механічних параметрів залізобетонних конструкцій мостів. Основні наукові результати та висновки дисертації полягають у наступному.

1. Під час руйнування зразків вирішальне значення має ДКІН нормального відриву. Власні частоти не залежать від абсолютних розмірів зразка, а залежать від відношення довжини зразка до його висоти, відносної глибини тріщини та коефіцієнта Пуассона. Отримані в роботі формули можна використати для К-тарування балкових зразків із тріщиною, що не є перпендикулярною до поверхні зразка.

Отримано загальну частотну функцію, що описує поведінку під динамічним навантаженням залізобетонної плити проїзної частини моста, яка враховує її фізичні та механічні характеристики.

2. Запропоновано і обґрунтовано спосіб покращення збіжності методу скінченних елементів за рахунок дублювання розв'язків в базисах різних класів функцій. Стосовно дослідження НДС мостової опори та балки запропонований підхід приблизно на порядок підвищує точність наближених розв'язків. Безпосередньо перевіркою встановлено, що повторний чисельний аналіз задачі для нової базової системи функцій підвищує надійність результатів, дає змогу оптимізувати процедуру вибору вузлів дискретизації, зменшує обчислювальні затрати. Точність наближених роз-

зраховано максимальні значення питомого згинального моменту M_I , нормального напруження σ_I та координати максимуму цих силових факторів:

$M_I = 4,615 \times 10^5$ Н, $\sigma_I = 1,804$ МПа, $x = 11,3$ м, $y = 8,3$ м.

Розрахунки базуються на визначених вище інтегральних характеристиках залізобетонних

характеристиках залізобетонних конструкцій мостів. Основні наукові результати та висновки дисертації полягають у наступному.

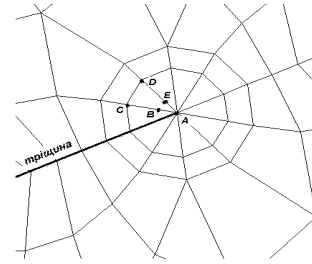


Рис. 2. Схема моделювання виродженими скінченними елементами біля вершини тріщини.

7

$$F(\alpha) = th \left(\sqrt{(\alpha b)^2 + \left(\frac{b}{a} n \pi\right)^2} \right) \times \sin \left(\sqrt{(\alpha b)^2 - \left(\frac{b}{a} n \pi\right)^2} \right) + \left[\frac{1}{ch \left[\sqrt{(\alpha b)^2 + \left(\frac{b}{a} n \pi\right)^2} \right]} - \cos \left[\sqrt{(\alpha b)^2 - \left(\frac{b}{a} n \pi\right)^2} \right] \right] = 0; \quad (3)$$

$$f = \frac{\alpha_i^2}{4\pi} h \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}}, \quad (4)$$

де ρ – густина плити, ν – коефіцієнт Пуассона, E – модуль пружності, h – товщина плити, α_i – корені рівняння, f – частота коливання плити, A_{ij} – числа, що визначаються крайовими умовами, a, b – розміри плити.

У підрозділі 2.4 запропоновано і досліджено втулкове з'єднання арматури.

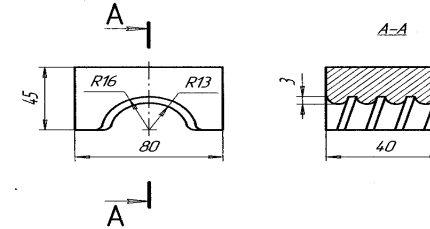


Рис. 3. Загальний вигляд профільного пуансона.

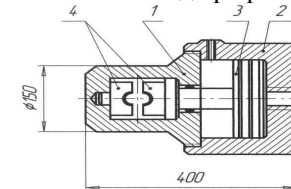


Рис. 4. Конструктивна схема силової головки гідравлічного преса: 1 – корпус, 2 – циліндр, 3 – поршень, 4 – профільні пуанسونи.

У третьому розділі розглянуто чисельні та аналітичні методи визначення напружено-деформованого стану елементів конструкцій мостів.

В основу запропонованого методу покладено з'єднання кінців арматури сталюю втулкою, яка обтискається на гідравлічному пресі спеціальними профільними пуансонами, що повторюють профіль поверхні арматури (рис. 3).

Здійснено армування аркового монолітного шляхопроводу на ділянці автомобільної дороги Чернівці – Герца (КПП).

Запропоновано армування несучих конструкцій мостових споруд, а також описано його застосування при армуванні мостових переходів.

У підрозділах 3.1 – 3.4 розглянуто аналітичні та чисельні методи розв'язку диференціальних рівнянь деформації мостової опори. Чисельні методи розв'язку реалізовано в різних класах базисних функцій.

Диференціальне рівняння деформації опори конусоподібної форми:

$$\frac{E}{H} \frac{d u}{d \eta} = \sigma(\eta) = -\frac{P}{F_1} \frac{1}{\left[1 + \left(\sqrt{F_2/F_1} - 1\right)\eta\right]}; \quad (5)$$

де $\eta = \frac{x}{H}$, H – висота конусоподібної опори, x – висота перерізу, $F_1, F_2, F(x)$ – площа перерізу (знизу, зверху, на рівні x), P – стискуюча сила.

Чисельні розрахунки виконано за таких вихідних даних: $H = 5$ м, $E = 1,764 \cdot 10^{10}$ Па, $F_1 = 5$ м², $F_2 = 0,5$ м², $P = 2 \cdot 10^6$ Н.

Аналітичний розв'язок диференціального рівняння (5), поздовжня деформація опори:

$$u(\eta) = \frac{PH}{EF_1 \left(\sqrt{\frac{F_2}{F_1}} - 1\right)} \left[\frac{1}{1 + \left(\sqrt{\frac{F_2}{F_1}} - 1\right)\eta} - 1 \right]. \quad (6)$$

Чисельний розв'язок у тригонометричному базисі:

$$u_1(\eta) = 10^{-3} \begin{pmatrix} -1,1 + \\ +1,3 \cos\left(\frac{\pi}{2}\eta\right) \end{pmatrix} + 10^{-4} \begin{pmatrix} 6,2 \sin\left(\frac{\pi}{2}\eta\right) - 1,5 \cos(\pi\eta) - \\ -3,0 \sin(\pi\eta) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Чисельний розв'язок у поліноміальному базисі:

$$u_2(\eta) = -1,525 \cdot 10^{-5} \eta - 5,860 \cdot 10^{-4} \eta^2 + 8,906 \cdot 10^{-4} \eta^3 - 6,435 \cdot 10^{-4} \eta^4. \quad (8)$$

Відхилення розв'язків $u(\eta)$, $u_1(\eta)$ та $u_2(\eta)$ у точці найбільшого переміщення ($\eta = 1$) не перевищує 0,03-0,4 %. Однак, слід зауважити, що вздовж опори відносна відмінність результатів:

$$\varepsilon(\eta)\% = 2 \frac{u_1(\eta) - u_2(\eta)}{u_1(\eta) + u_2(\eta)} \cdot 100\%, \quad (9)$$

отриманих у різних базисних функціях ($u_1(\eta)$ – деформація в тригонометричному базисі, $u_2(\eta)$ – деформація в поліноміальному базисі), має суттєву різницю ≈ 50 %, яку видно з графіка на рис. 5.

Форма кривої на рис. 5 вказує на те, що біля основи опори спостерігається значна розбіжність результатів, отриманих у різних базисах, яка веде до розбіжності силових факторів.

У підрозділі 3.5 здійснено порівняльний аналіз аналітичних та числових методів розв'язку диференціального рівняння балки.

Прогин однорідної балки довжини L дає розв'язок двохточкової крайової задачі:

Порівняння моделей представлення навантаження плити у відсотках.

Назва показника	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Похибка, %	
				Модель 1	Модель 2
Питомий згинальний момент M1(Н) у площині	1,705×10 ⁵	2,168×10 ⁵	2,322×10 ⁵	-26,57	-6,63
Напруження σ (Н/м ²)	0,768×10 ⁶	0,856×10 ⁶	0,91×10 ⁶	-15,6	-5,93
Координати максимуму, м	12,15	10,92	11,2	8,48	-2,5
	8,3	8,3	8,3	0	0
Питомий згинальний момент M2(Н) у площині	1,074×10 ⁴	1,332×10 ⁴	2,672×10 ⁴	-59,81	-50,15
Координати максимуму, м	12,15	9,41	6	102,5	56,83
	4,15	4,13	5,8	-28,45	-28,79
Питомий крутний момент Н(Н)	2,553×10 ⁴	5,854×10 ⁴	6,209×10 ⁴	-58,88	-5,72
Координати максимуму, м	24,3	0	0	-	-
	8,3	8,3	8,3	0	0
Питома поперечна сила Q1(Н/м)	2,148×10 ⁴	3,232×10 ⁴	3,233×10 ⁴	-93,36	-0,03
Координати максимуму, м	0	0	4,1	-100	-100
	4,15	6,79	5,9	-29,66	15,08
Питома поперечна сила Q2(Н/м)	2,605×10 ³	6,361×10 ³	2,234×10 ⁴	-88,34	-71,53
Координати максимуму, м	12,15	8,6	5,9	105,93	45,76
	0	0	5,5	-100	-100
Циліндрична жорсткість, D(Н/м)	3,048×10 ¹⁰	3,72×10 ¹⁰	3,777×10 ¹⁰	-19,3	-1,51
Ефективна товщина, h(м)	1,154	1,233	1,239	-6,86	-0,48

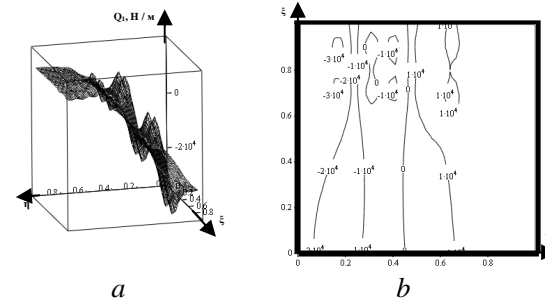


Рис. 11. Поперечна сила у площині $\eta = \text{const}$ (a - поверхневий графік, b - контурний графік).

всіх силових факторів, що діяли в залізобетонній плиті проїзної частини моста, зокрема поперечної сили (рис. 11).

На рис. 11, 12 зображено поверхневі та контурні графіки поперечної сили, де a – питома поперечна сила Q_1 (Q_2) у площині $\eta = \text{const}$ ($\xi = \text{const}$), поверхневий графік, b – питома поперечна сила Q_1 (Q_2) у площині $\eta = \text{const}$ ($\xi = \text{const}$), контурний графік, розмірність контурних ліній, Н/м. На рисунку чітко видно розміщення коліс.

Циліндрична жорсткість та ефективна товщина плити на момент випробування становили відповідно: $D = 3,777 \times 10^{10}$, $h = 1,239$. Зменшення циліндричної жорсткості та ефективної товщини в процесі експлуатації вказуватиме на утворення тріщин у залізобетонній конструкції мостової плити. Отримано графіки

ніж у два рази зменшує їх прогин. Потрібна мілкість розбиття визначена шляхом нечутливості кінцевого результату до подальшого подрібнення елементів.

У **підрозділі 4.2** досліджено деформацію ортотропної залізобетонної плити. Отримано рівняння прогинів плити, вільно опертої з протилежних боків та вільної з двох інших. При $E_1 > E_2$:

$$w(\eta, \xi) = \sin(m\pi\eta) \left[\begin{array}{l} A_m \operatorname{sh}(\lambda_1 m \xi) + B_m \operatorname{ch}(\lambda_2 m \xi) + \\ C_m \sin(\lambda_3 m \xi) + D_m \cos(\lambda_4 m \xi) + \varphi_1(\xi) \end{array} \right]. \quad (16)$$

При $E_1 < E_2$:

$$w(\eta, \xi) = \sin(m\pi\eta) \left[\begin{array}{l} e^{\operatorname{Re}(\lambda_1 m \xi)} (A_m \sin(\operatorname{Im}(\lambda_1) m \xi) + B_m \cos(\operatorname{Im}(\lambda_1) m \xi)) + \\ e^{\operatorname{Re}(\lambda_3 m \xi)} (C_m \sin(\operatorname{Im}(\lambda_3) m \xi) + D_m \cos(\operatorname{Im}(\lambda_3) m \xi)) + \varphi_2(\xi) \end{array} \right], \quad (17)$$

де E_1 – модуль пружності вздовж плити, E_2 – модуль пружності поперек плити, коефіцієнти A_m, B_m знаходяться з умов закріплення.

Розраховано циліндричні жорсткості моста через р. Стара Ріка на автодорозі Мукачєво – Івано-Франківськ – Рогатин у Закарпатській області: $D_{11} = 2,608 \times 10^{10}$ Нм; $D_{22} = 2,608 \times 10^9$ Нм; $D_{12} = 1,043 \times 10^9$ Нм; $D_{66} = 9,167 \times 10^9$ Нм. Прогин мостової споруди становив 0,41 мм.

У **підрозділі 4.2- 4.5** досліджено деформацію мостової плити за різного ступеня точності математичного моделювання дії навантаження на проїзну частину мосту. Для трьох випадків розподілу навантаження: рівномірне (модель 1), розподілене на прямокутну площадку (модель 2), розподілене на систему прямокутних площадок (коліс) автомобіля (модель 3) результати розрахунків наведені у таблиці 1.

За результатами статичних та динамічних випробувань за допомогою отриманих співвідношень для мостової плити через р. Стара Ріка розраховано:

– циліндричну жорсткість:

$$D = \frac{4}{\pi^3} \frac{b^2}{w(\eta_p; \xi_p)} \sum_{k=1}^K F_k \sum_{i=1}^N f(i; \nu; \eta_p; \xi_p; \eta_0; \xi_0; \Delta \eta_0; \Delta \xi_0; a; b) \quad (19)$$

– ефективну товщину:

$$h = \sqrt[3]{12(1-\nu^2) \frac{D}{E}}; \quad (20)$$

– власну частоту коливань:

$$f = \frac{\alpha^2}{4\pi} h \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}}; \quad (21)$$

– ефективний модуль пружності:

$$E = 48\pi^2 (1-\nu^2) \frac{\rho}{\alpha^4} \left(\frac{f}{h}\right)^2; \quad (22)$$

– ефективну густину:

$$\rho = \frac{E}{48\pi^2 (1-\nu^2)} \alpha^4 \left(\frac{h}{f}\right)^2. \quad (23)$$

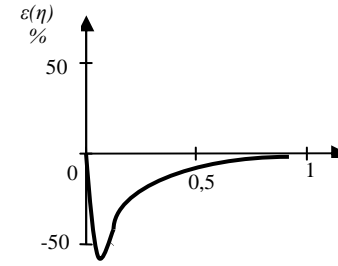


Рис. 5. Відносна відмінність результатів, отриманих у різних базисах.

де $P_3(x)$ – поліном, коефіцієнти якого визначаються із системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Прогин неоднорідної балки дає також розв'язок двохточкової крайової задачі, коефіцієнти диференціального рівняння якої є функціями від x . Її можна розв'язати методом скінченних елементів. При цьому можуть виникати обчислювальні труднощі, пов'язані з тим, що вказаний метод забезпечує тільки середньоквадратичну, а не рівномірну збіжність до точного розв'язку. Його застосування може супроводжуватися появою осциляцій, позбавлених фізичного змісту (рис. 6).

У роботі запропоновано метод уникнення небажаної поведінки наближених розв'язків відповідним вибором базової системи функцій. Дублювання розв'язку в різних класах базисних функцій покращує чисельний метод, робить його надійнішим.

Так, наприклад, графіки поперечних прогинів, отримані в поліноміальному і тригонометричному базисі, досить близькі вже за п'яти вузлів. Розрахунки вказують, що розбіжність отриманих функцій прогину, відносно максимального значення при п'яти вузлах, становить 13,2% (за 15-ти вузлів – 2×10^{-4} %).

Розбіжність силових факторів значно більша в різних базисах (рис. 7 а, б та рис. 7 а, б).

Зокрема, розбіжність графіків згинального моменту становить відповідно: при 5-ти вузлах – 120 %; при 15-ти вузлах – 0,04 %.

На рисунку 8 зображено згинальний момент у консольно защемленій балці при 15-ти вузлах розбиття балки на скінченні елементи.

У **підрозділі 3.6** запропоновано аналітичну методику розрахунку тріщиностійкості залізобетонних балок таврового січення та метод визначення напружень у даній конструкції балкового типу .

$$\frac{EJ}{L^4} u^{IV} = q \quad (10)$$

($u(0) = A, u'(0) = B, u(L) = C, u'(L) = D$)
де A, B, C, D – сталі, що виражають умови на кінцях балки.

$$q = q(x), x \in (0; L) \quad (11)$$

- навантаження прикладене до балки. Розв'язок задачі (10) дає формула:

$$u(x) = P_3(x) + \frac{EJ}{6L^4} \int_0^x (x-z)^3 q(z) dz \quad (12)$$

У результаті проведених досліджень приходимо до розрахункових формул для компонент тензора напружень у стінці:

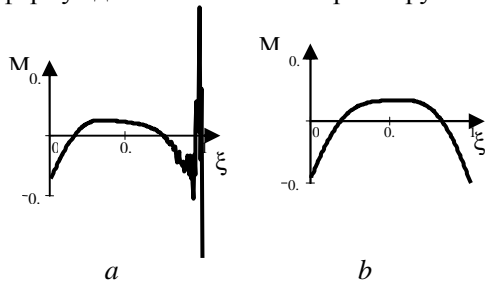


Рис. 6. Згинальний момент у консольно защемленій балці, розрахований чисельним методом із застосуванням 35-ти вузлів (а – в поліноміальному базисі втрачена стійкість розв’язку, b – тригонометричний базис, розв’язок стійкий).

$$\sigma_{cx} = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\begin{matrix} c_{2k} (2sh \alpha_k y + \alpha_k ych \alpha_k y) \\ + c_{3k} \alpha_k sh \alpha_k y + \\ + c_{4k} (2ch \alpha_k y + \alpha_k ysh \alpha_k y) \end{matrix} \right] \alpha_k \cos \alpha_k x; \quad (13)$$

$$\sigma_{cy} = - \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{matrix} c_{2k} ych \alpha_k y + \\ + c_{3k} sh \alpha_k y + \\ + c_{4k} ysh \alpha_k y \end{matrix} \right) \alpha_k^2 \cos \alpha_k x; \quad (14)$$

$$\tau_{cxy} = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\begin{matrix} c_{2k} ysha \alpha_k y + \\ + \frac{c_{2k}}{\alpha_k} ch \alpha_k y + \\ + c_{3k} ch \alpha_k y + \\ + c_{4k} ych \alpha_k y + \\ + \frac{c_{4k}}{\alpha_k} sh \alpha_k y \end{matrix} \right) \alpha_k^2 \sin \alpha_k x. \quad (15)$$

Невідомі коефіцієнти у формулах визначаються з групи основних граничних та додаткових умов.

У четвертому розділі здійснено розрахунок напружено-деформованого стану проїзної частини залізобетонної прогонової будови моста чисельним методом та побудовано відповідні аналітичні інженерні формули.

У підрозділі 4.1 досліджено розрахунок напружено-деформованого стану сталевих залізобетонного моста методом скінченних елементів. Аналізується напружено-деформівний стан багатопластової пластини. Пластина складається із n шарів трансверсально ізотропного матеріалу. Товщина кожного шару стала i рівна h_k ($k=1, \dots, n$). Площини ізотропії паралельні поверхням, шари нестисливі, для кожного з них закон

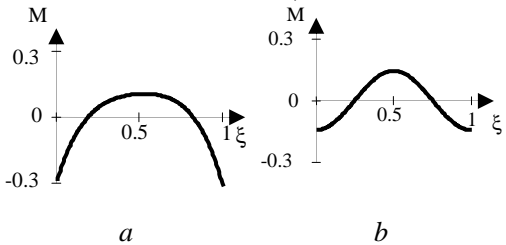


Рис. 7. Згинальний момент у консольно защемленій балці, розрахований чисельним методом із застосуванням 5-ти вузлів (а – поліноміальний базис, b – тригонометричний базис).

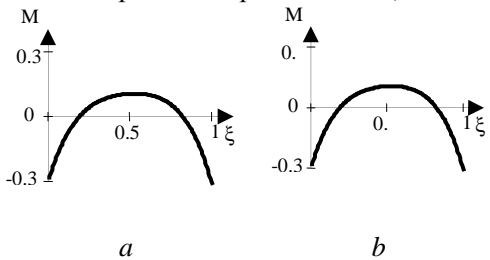


Рис. 8. Згинальний момент у консольно защемленій балці, розрахований чисельним методом із застосуванням 15-ти вузлів (а – поліноміальний базис, b – тригонометричний базис).

Гука є таким:

$$\sigma_x = \frac{E_k}{1-\mu_k^2} (\epsilon_x^k + \mu_k \epsilon_y^k), \quad \sigma_y = \frac{E_k}{1-\mu_k^2} (\epsilon_y^k + \mu_k \epsilon_x^k), \quad \tau_{xy} = \frac{E_k}{2(1+\mu_k)} \epsilon_{xy}^k, \\ \tau_{xz}^k = G_k \gamma_{xz}^k, \quad \tau_{yz}^k = G_k \gamma_{yz}^k,$$

де $E_k = E_k(z)$, $\mu_k = \mu_k(z)$, $G_k = G_k(z)$ - модуль пружності, коефіцієнт Пуассона і модуль зсуву. Розглядається випадок, для якого: 1) зовнішнє навантаження діє по нормалі до пластини; 2) шари працюють сумісно без відриву та проковзування; 3) нормальні переміщення незмінні вздовж товщини пластини: $w_k(x, y, z) = w(x, y)$; 4) тангенціальні переміщення серединної площини пакету є нехтовно малими: $u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = 0$. За вказаних умов відносно функції зсуву $\chi = \chi(x, y)$, котра підлягає визначенню разом із функцією $w(x, y)$, отримуємо:

$$u_k(x, y, z) = -z \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial \chi}{\partial x} \psi_k(z), \quad v_k(x, y, z) = -z \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial \chi}{\partial y} \psi_k(z).$$

За останніми співвідношеннями побудовано функціонал потенціальної енергії пластини і знайдено розв’язок задачі методом скінченних елементів.

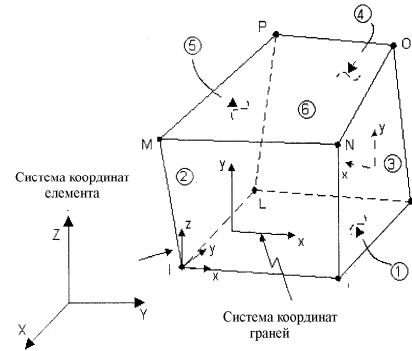


Рис. 9. Трьохмірний скінченний елемент.

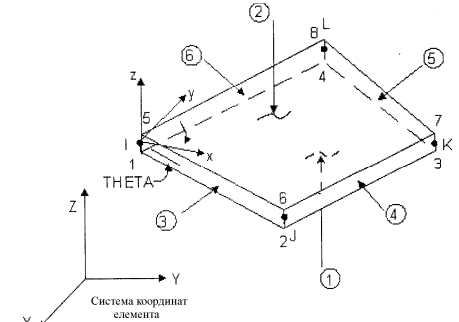


Рис. 10. Плоский скінченний елемент.

Під час практичної реалізації методу скінченних елементів використовувались два типи скінченних елементів. Цементобетонну й монолітну залізобетонну плити моделювали 3-вимірними скінченними елементами з вісьмома вузлами. Схематично цей елемент зображено на рисунку 9.

Вузли (рис. 9) позначені точками I, J, K, L, M, N, O, P. Загальна кількість степенів вільності елемента – 24.

Балки моделюються плоским елементами з чотирма ступенями вільності (рис. 10, точки I, J, K, L – вузли елемента).

Розглянуто шість випадків навантаження без врахування двотаврових балок та з їх врахуванням. Виявлено, що застосування двотаврових балок більш

Підписано до друку 14.10.2011. Папір офсетний
Формат 60×84/16. Друк офсетний. Ум. друк арк. 1.4
Обл.–вид. арк.. 0,99. Тираж 100 прим. Зам № 67.

Видавництво «Карпатська вежа», 89600, м. Мукачево, вул. Миру,10
Свідоцтво про державну реєстрацію видавців,
виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції. Серія Зт № 10

