

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ТАНЧЕНКО АНДРІЙ ЮРІЙОВИЧ



УДК 539.3

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ
ПРИ ЗМІНІ ТОВЩИНИ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Ткачук Микола Анатолійович,
Національний технічний університет
"Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри теорії і систем
автоматизованого проектування
механізмів і машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Гриньов Володимир Борисович,
Харківський національний університет
будівництва та архітектури,
завідувач кафедри будівельної механіки

доктор технічних наук, професор
Аврамов Костянтин Віталійович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного Національної
академії наук України,
провідний науковий співробітник
відділу нестационарних механічних процесів

Захист відбудеться " 27 " листопада 2013 р. о 16³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий " 17 " жовтня 2013 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.050.10



В.Г. Сукіасов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Для сучасного машинобудування однією із характерних тенденцій є намагання на етапі проектування та виготовлення забезпечити тривалий термін експлуатації унікальних машин. Подібні машини призначені для виконання своїх функцій у механічно та хімічно агресивних середовищах, при дії атмосферних осадів, вітрових, а також циклічних змінюваних навантаженнях. Структура конструкції більшості машин переважно складається з металевих трубо-часто-коробчастих тонкостінних елементів. Прикладами таких машин є крупнотонажні крани, екскаватори, відвалоутворювачі, перевантажувачі вугілля, руди та інших матеріалів, а також багато інших машин. Одна з головних проблем багаторічної безпечної та продуктивної їх експлуатації полягає в деградації властивостей силових елементів внаслідок механічного або хімічного зношування, в першу чергу – в результаті корозійного пошкодження поверхневих шарів. З огляду на тривалий термін експлуатації металоконструкцій (десятки років) чинник корозійного впливу враховується на етапі проектування, що дає можливість ефективно їх експлуатувати при стоншенні складових елементів до рівня 0,7 – 0,8 від номінальних товщин, тобто на 20-30%.

Проте, як показав аналіз публікацій, нормативних документів та матеріалів багатьох технічних оглядів, на даний час відсутні методики розрахунків даного типу машин при сукупній дії факторів нерівномірного стоншування та змінюваного напружено-деформованого стану (НДС) (як процесів у часі та просторі) силових елементів цих машин. У результаті виникає ситуація, коли на етапі проектування структура і параметри елементів створюваної машини визначаються виходячи із розрахунків або для початкового, або для рівномірно стоншеного до кінцевого граничного стану. При цьому ігнорують чинник нерівномірного стоншування протягом довготривалої експлуатації. А це може призвести до вичерпання конструкційної міцності елементів машини у деякому проміжному стані.

Таким чином, удосконалення методів визначення НДС тонкостінних елементів високонавантажених машин з урахуванням нерівномірного стоншування є актуальним і важливим науково-технічним завданням динаміки та міцності машин. Вирішення даної задачі визначило напрямок дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин НТУ «ХП» згідно з планом науково-дослідних робіт МОН України: «Шторм» (ДР № 0105U000004т), «Гром» (ДР № 0108U000017т), «Розробка теоретичних основ комп'ютерних кластерних технологій і унікального програмно-апаратного комплексу для дослідження складних та надскладних механічних систем» (ДР № 0107U006813), господарського договору «Розробка математичної, геометричної та скінченно-елементної моделі для дослідження динаміки і напружено-деформованого стану елементів вуглеперевантажувача» ВАТ «Головний спеціалізований конструкторсько-технологічний інститут» «ГСКТІ», (м. Маріуполь), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів, а також договорів про науково-технічне співробітництво НТУ «ХП» із ВАТ «ГСКТІ» (м. Маріуполь) та ВАТ «Азовмаш» (м. Маріуполь).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення методів аналізу конструкційної міцності тонкостінних елементів складних машинобудівних конструкцій з урахуванням нерівномірного стоншування внаслідок зношування протягом тривалого терміну експлуатації.

Для досягнення поставленої мети у роботі розв'язані наступні задачі:

- аналіз та узагальнення методів визначення напружено-деформованого стану машин з урахуванням стоншення елементів металоконструкцій;
- розробка комплексної математичної моделі напружено-деформованого стану тонкостінних елементів машин з урахуванням нерівномірного стоншування;
- розробка програмно-модельного комплексу для комп'ютерного аналізу НДС, що реалізує запропоновану математичну модель, та його апробація на тестових задачах;
- розв'язання прикладних задач аналізу конструкційної міцності тонкостінних елементів реальних машинобудівних конструкцій;
- оцінка достовірності отриманих числових результатів шляхом порівняння з експериментальними дослідженнями та впровадження результатів у виробництво.

Об'єкт дослідження – конструкційна міцність тонкостінних елементів машин при нерівномірному стоншуванні в процесі тривалої експлуатації.

Предмет дослідження – методи визначення напружено-деформованого стану при стоншуванні елементів машинобудівних конструкцій, а також залежності характеристик НДС від ступеня стоншування.

Методи дослідження. У роботі використовувалися методи теорії пружності, теорії коливань, метод скінчених елементів (МСЕ), методи електротензометрії та товщинометрії, теорія тривимірного геометричного параметричного твердотільного та поверхневого моделювання. Поєднуючи ці методи теорії, побудовано математичні, геометричні та скінченно-елементні моделі (СЕМ) для опису перерозподілу напружень у конструкції внаслідок стоншування, а також зміни спектру власних частот (ВЧ) коливань. Розробка геометричних та скінченно-елементних моделей досліджуваних машинобудівних конструкцій проводилася у спеціалізованих ліцензованих інженерних програмних комплексах Ansys та SolidWorks.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

- розроблено підхід до аналізу напружено-деформованого стану, який враховує вплив стоншування тонкостінних елементів машин шляхом збуренням СЕМ;
- удосконалено математичну модель НДС тонкостінних елементів машин зі змінюваною з часом областю, яку займає досліджуваний об'єкт: розв'язок подається у вигляді лінійної комбінації так званих «реперних» розв'язків, які відповідають гранично допустимим стоншенням окремих елементів. Чутливість конструкції до ступеня стоншення по кожному з параметрів визначається шляхом прямого скінченного збурення її СЕМ, на відміну від традиційних підходів теорії збурень (ТЗ), що оперує нескінченно малими змінними. Відгук по кожному параметру лінеаризується на основі початкового (номінального) та кінцевого (нормативно дозволеного) станів. Таким чином, проміжний (суттєво нерівномірний) стан знаходиться у вигляді лінійної комбінації початкового та набору «реперних» розв'язків;
- запропонована побудова параметричних скінченно-елементних моделей досліджуваних об'єктів для проведення розрахунку (а також постпроцесорної обробки) НДС тонкостінних елементів машинобудівних конструкцій (ТЕМК) при різних ступенях

їх стоншення шляхом лінійної комбінації так званих «реперних» розв'язків, а не на основі традиційного підходу багатоваріантних розрахунків;

– виявлено залежності динамічних та міцнісних характеристик від характеру та ступеня стоншування тонкостінних елементів машин; при розв'язанні тестових задач для стержнів, пластин та оболонок (у тому числі із застосуванням аналітичних моделей) підтверджено квазілінійний характер зміни компонент НДС та ВЧ від ступеня стоншення їх стінок;

– визначено можливості різноспрямованих тенденцій зміни переміщень та напружень (а також різних ВЧ) стержневих, пластинчастих та оболонкових елементів конструкцій при різних сценаріях стоншення їхніх поперечних перерізів;

– виявлено можливості оптимізації профілю перерізу за критерієм забезпечення рівнотовщинності або рівномірності через заданий термін експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудування полягає в:

– удосконаленні методики визначення НДС тонкостінних елементів машинобудівних конструкцій з урахуванням впливу нерівномірного стоншування, як основи подальшого проектування машин;

– за рахунок формування НДС як лінійної комбінації розв'язків, що відповідають стоншенням окремих елементів конструкції, досягається багатократна економія часу та обчислювальних ресурсів, на відміну від багатоваріантних розрахунків;

– запропоновані методи реалізовані у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу (СПМК) для розрахунку НДС при різних (істотно нерівномірних) законах стоншення елементів конструкцій;

– розроблено рекомендації з вибору раціональної структури та параметрів силових елементів крана-перевантажувача вантажопідйомністю 20 т, що забезпечують конструкційну міцність при різних розподілах стоншення з урахуванням 20%-го корозійного зношування стінок металоконструкції.

Результати роботи впроваджено у ВАТ «Азовмаш» та у науково-дослідницькій роботі НТУ «ХП».

Особистий внесок здобувача. Усі положення дисертації, винесені на захист, розроблені здобувачем самостійно. Серед них: аналіз та узагальнення розрахунково-експериментальних досліджень робочих навантажень, напружень і деформацій елементів машин при стоншуванні на прикладі металоконструкцій кранів-перевантажувачів; удосконалення існуючих підходів до дослідження класу тонкостінних конструкцій, що працюють тривалий термін в важких умовах експлуатації та характеризуються складним періодичним циклом навантаження; розробка удосконаленої математичної моделі НДС, яка враховує нерівномірність стоншення тонкостінних елементів конструкцій; розв'язання прикладних задач, в першу чергу для крана-перевантажувача: аналіз впливу варіювання структурою, геометрією, комплексом навантажень, товщинами елементів конструкції на НДС та ВЧ коливачь; розрахунково-експериментальне дослідження та оцінка точності результатів числового моделювання.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися на міжнародних конференціях: 13-й та 14-й «Фізичні та комп'ютерні технології», (м. Харків, 2007, 2008 рр.); XV-XX «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків 2007–2013 рр.); 8-му та

9-му симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2007, 2009 рр.); «Машинобудування та техносфера XXI століття», (м. Севастополь, 2007, 2011, рр.); пам'яті академіка В.І. Мосаковського «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій», (м. Дніпропетровськ, 2007 р.); 9-й конференції з САПР/PLM, (м. Москва, 2007 р.); молодих спеціалістів «Азовмаш» (м. Маріуполь, 2008, 2013 рр.); 1-й та 2-й «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (м. Львів, 2008, 2010 рр.); «Проблеми якості і довговічності зубчастих передач, редукторів, їх деталей та вузлів» (м. Севастополь, 2009, 2012 рр.), «Динаміка, надійність і довговічність механічних і біомеханічних систем» (м. Севастополь, 2011 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 25 наукових працях, з яких 14 статей у фахових виданнях України, 11 – у матеріалах науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Повний обсяг дисертації складає 209 сторінок, 125 рисунків по тексту, з них 52 рисунка на 26 окремих сторінках, 8 таблиць по тексту, з них 3 таблиці на 4 окремих сторінках, 226 найменувань використаних джерел на 19 сторінках, 2 додатки на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність та доцільність дисертаційної роботи, сформульовані мета, задачі досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, наукова новизна і практична значимість роботи.

У першому розділі проведено аналіз методів розрахунку НДС тонкостінних елементів машинобудівних конструкцій. Серед робіт, що присвячені аналізу числових методів розрахунку ТЕМК, основою є праці В.З. Власова, А.Л. Гольденвейзера, Е.І. Григолюка. Для визначення НДС складних тонкостінних елементів конструкцій найбільшими можливостями володіє метод скінченних елементів (МСЕ). Для аналізу чутливості ТЕМК широко використовуються методи теорії збурень. Обґрунтування структури і параметрів конструкцій проводиться на основі методів оптимізації, представлених у працях Ж.Л. Армана, М.В. Банічука, В.А. Бунакова, Я.І. Бурака, В.В. Васильєва, Є.Г. Голоскокова, В.Б. Гриньова, І.А. Карновського, Б.І. Кіндрацького, Ю.Р. Лепіка, В.П. Малкова, І.Ф. Образцова, Н. Ольхоффа, Я.Г. Пановко, Я.С. Підстригача, Л.С. Понтрягіна, Ю.М. Почтмана, В. Прагера, Г. Реклейтиса, Р.Б. Рикардса, М.І. Ройтмана, Ж. Сеа, Е.А. Сімсона, Г.А. Тетерса, В.А. Троїцького, А.Г. Угодчікова, А.П. Філіппова, Г.С. Шапіро, Л.І. Штейнвольфа та інших вчених. Аналіз методів розрахунку ТЕМК, умов експлуатації проведено на прикладі кранів-перевантажувачів; широкий огляд таких методів наведено у роботах Ю.Б. Гусєва. Відмічається, що для подібних конструкцій існують нормативні граничні ступені стоншування їх стінок (до 20-25%), проте існуючі методики розрахунку конструкційної міцності не враховують нерівномірного стоншування протягом всього терміну експлуатації. Таким чином, в ході проектних досліджень для забезпечення конструкційної міцності цих машин необхідно багатоваріантне дослідження НДС їх силових елементів з урахуванням зазначених вище чинників. Для оцінки довговічності конструкцій застосовуються різні підходи: методи кон-

тинуальної механіки пошкоджуваності, механіки руйнування, багатоциклової і малоциклової втоми та інші. Зокрема можна відзначити роботи таких вчених як А.Є. Андрейків, Р.А. Арутюнян, І.А. Біргер, М.І. Бобир, М.В. Бородій, Д.В. Бреславський, Д.М. Васильєв, А.Н. Гузь, Ю.І. Кадашевич, А.Г. Казанцев, Л.М. Качанов, Ю.Г. Коротких, А.А. Лебедєв, Ж. Леметр, Г.І. Львов, Н.А. Махутов, М.С. Можаровський, О.К. Морачковський, В.В. Москвітін, В.В. Новожилов, В.В. Панасюк, Ю.К. Петрен, Г.С. Писаренко, Ю.Н. Работнов, А.Н. Романов, С.В. Серенсен, В.А. Стрижало, Р.Г. Терехов, В.Т. Трощенко, Ю.Н. Шевченко, Р.М. Шнейдерович, Б.О. Яхно та інші. Окремої уваги заслуговують роботи, у яких розглядається взаємозв'язок НДС тонкостінних елементах конструкції з урахуванням стоншування внаслідок корозійних явищ. З цього напрямку можна відзначити роботи Проніної Ю.Г.

У той же час для багатьох відповідальних машинобудівних конструкцій, призначених для роботи протягом тривалого терміну експлуатації в агресивних середовищах і при важких навантаженнях, важливо не тільки і не стільки точно оцінити їх довговічність, а гарантовано її забезпечити. Таким чином, є необхідність удосконалення підходів, математичних моделей і створення СПМК для розв'язання задач аналізу НДС і спектру ВЧ коливань ТЕМК при зміні їх товщини на всіх етапах життєвого циклу. Приймається, що несучу здатність забезпечує частина перетину, яка є стоншеною, а матеріал поверхневих шарів розчиняється і видаляється. У такій постановці потрібна розробка методів оцінки впливу кількості матеріалу, що видаляється, на НДС досліджуваної конструкції.

У другому розділі проведено математичне моделювання НДС елементів тонкостінних конструкцій з урахуванням стоншування їх стінок. Пропонується врахувати специфічні властивості досліджуваних пластинчастих, стержневих та оболонкових об'єктів: тонкостінність, малий ступінь стоншення, можливість параметризації величини і положення діючих навантажень. Крім того, вважається справедливою гіпотеза про істотно нижчу швидкість процесу стоншення порівняно зі швидкістю решти процесів, а також про відсутність значних динамічних ефектів. Таким чином, дослідження просторових пластинчасто-оболонково-стержневих конструкцій зі змінюваною у просторі і часі товщиною (перетином), описується за допомогою ступеня стоншення α , що дорівнює відношенню зміни поточного розміру до вихідного.

На прикладі стержнів, оболонок та пластин поставлена у дисертації задача зводиться до інтегрування систем рівнянь (1).

для стержнів :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} [EF(x) \cdot u'(x)] + q_x = 0; \quad \frac{\partial}{\partial x} [GI_p(x) \cdot \gamma'(x)] + m_x = 0; \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI_z(x) \cdot v''(x)] = q_y; \quad \frac{\partial^2}{\partial x^2} [EI_y(x) \cdot w''(x)] = q_z. \end{aligned} \right.$$

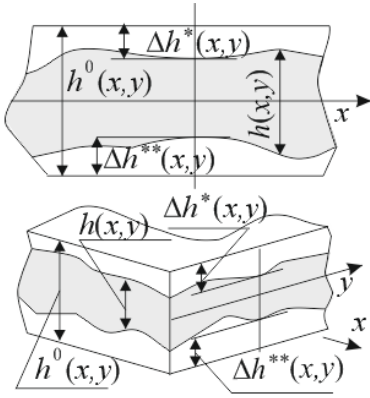
для пластин :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[D(x, y) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right] + 2 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \left[D(x, y) (1 - \nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \right] + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \left[D(x, y) \left(\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right] = q; \quad (1) \\ \left[(\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} \right) + \mu \Delta u \right] h(x, y) + F_x^{\sim} = 0; \quad \left[(\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \mu \Delta u \right] h(x, y) + F_y^{\sim} = 0. \end{aligned} \right.$$

де E, G, ν, λ, μ – модулі пружності I і II роду, коефіцієнт Пуассона і параметри Ляме матеріалу тонкостінного елемента; $h(x)$, $h(x, y)$ – розподіл товщини уздовж довжини або

площі тонкостінного елемента в певний момент часу; $F(x) \sim h$ – площа поперечного перерізу стержня (пропорційна товщині $h(x)$); $I_p(x), I_z(x), I_y(x) \sim h^3$ – моменти інерції поперечного перерізу стержня, а $D = Eh^3(x, y)/12(1 - \nu^2)$ – циліндрична жорсткість, розподілена по множині точок з координатами x, y ; $G = \mu = E/2(1 + \nu)$, $\lambda = E\nu/[2(1 + \nu)(1 - 2\nu)]$. Зміст інших позначень представлено на рис. 1. Граничні умови формулюються відповідно для кожної конкретної задачі.

На основі методу скінченних елементів розглядається запропонований удосконалений загальний підхід до розв'язання поставленої задачі.



$$\Delta h(x, y) = \Delta h^*(x, y) + \Delta h^{**}(x, y)$$

Рисунок 1 – Зміна поточної товщини $h(x, y)$ порівняно з

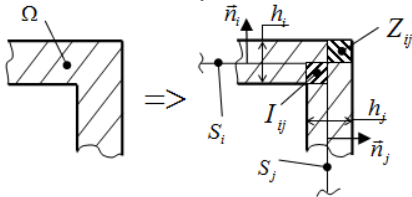


Рисунок 2 – Подання області Ω у вигляді об'єднання підобластей S_k х h_k

Тонкостінна (пластинчаста в даному випадку) конструкція займає в просторі область Ω (рис. 2), представлена у вигляді композицій тонкостінних поверхневих ділянок (листів) S_k , $k = 1, \dots, N$, на які в напрямку нормалей \vec{n}_k в одну (або в дві) сторону нарослено матеріал номінальної товщини h_k^0 . Надалі вводиться скінченно-елементна Shell-модель, у якій $S_k = \text{const}$, $k = 1, \dots, N$; $h_k = h_k(t)$ залежить від часу t . У результаті отримана система рівнянь відносно вузлових невідомих x

$$[K] \cdot \{x\} = \{f\}, \quad (2)$$

де $K = K(h(t))$ – змінювана при стоншуванні матриця жорсткості; $h(t) = \{h_1(t) \dots h_N(t)\}^T$ – масив поточних товщин (для кожної ділянки S_k); f – вектор зовнішніх навантажень, які зводяться до вузлів. Причому і матриця жорсткості, і масив правих частин у загальному випадку залежать параметрично від масиву вузлових (або елементних) ступенів стоншування.

Для розв'язання задачі потрібно: 1) встановити характер зміни елементів матриці жорсткості $K(t)$ при малій зміні h ; 2) визначити розв'язок x як функцію параметрів h ; 3) запропонувати алгоритм обчислення компонент НДС конструкції при довільних змінах ступеня стоншування її окремих елементів.

Процес стоншування у часі t має вигляд

$$h_k = h_k(0) - \Delta h_k(t) = h_k(0)(1 - \alpha_k), \quad (3)$$

де $\alpha_k = \Delta h_k(t)/h_k(0) \geq 0$ – відносне стоншення листа k , відповідне моменту часу t .

Тоді масив $\alpha(t) = \{\alpha_1 \dots \alpha_N\}^T$ задає ступінь стоншення всіх елементів конструкції. Особливістю відповідних тонкостінних конструкцій (типу силових елементів кранів, перевантажувачів, відвалоутворювачів, конвеєрів) є встановлювана нормативно гранична величина α^* , як правило $\alpha^* \ll 1$. У цьому випадку компоненти матриці жорсткості окремих елементів k_e , що відповідають згинній складовій і плоскому НДС, представимі у вигляді:

$$k_e^{(usz)} = h_e^3 \cdot k_e^{\wedge}, \quad k_e^{(пл)} = h_e \cdot k_e^{\sim}, \quad (4)$$

де k_e^\wedge, k_e^\sim – не залежні від α_e величини. Утримування тільки лінійних членів у (4) дає:

$$k_e^{(usz)} = k_e^\wedge \cdot h_{0e}^3 (1 - 3\alpha), \quad k_e^{(nn)} = k_e^\sim h_{0e} (1 - \alpha). \quad (5)$$

Відповідно, глобальна матриця жорсткості має вигляд

$$[K] \approx [K_0] - [K_0'(\alpha)], \quad (6)$$

де $K_0 = K_0(h(0))$ - матриця жорсткості конструкції в початковому стані; K_0' - матриця жорсткості, складена з комбінацій потроєних компонент «згинних» та одинарних – «плоских» компонент матриці жорсткості K_0 . Таким чином, $K_0 \neq K_0(\alpha)$, $K_0' = K_0'(\alpha)$. При цьому K_0' - симетрична матриця, елементи якої набагато менші компонент матриці K_0 і є їх лінійною комбінацією з коефіцієнтами $\alpha_k \ll 1$.

Розв'язок системи рівнянь (2) з урахуванням варіювання товщиною має вигляд

$$\{x\} = [K]^{-1} \cdot \{f\} = ([K_0] - [K_0'])^{-1} \cdot \{f\}. \quad (7)$$

Обернена матриця представляється у вигляді суми двох матриць:

$$([K_0] - [K_0'])^{-1} \approx [C] + [D]; \quad [C] = [K_0]^{-1}; \quad [D] = [K_0]^{-1} \cdot [K_0'] \cdot [K_0]^{-1}, \quad (8)$$

де C не залежить від параметра α , а D – залежить. Таким чином, розв'язок (7) представимий у вигляді

$$\{x(\alpha)\} = \{x(0)\} + ([K_0]^{-1} \cdot [K_0']) \cdot \{x(0)\} = ([E] + [K_0]^{-1} \cdot [K_0']) \cdot \{x(0)\}. \quad (9)$$

Цей запис аналогічний співвідношенням, одержуваним при розв'язанні задачі чутливості, однак у даному випадку явно визначені вирази для знаходження коефіцієнтів матриці $K_0^{-1} K_0'$, компоненти якої лінійно залежать від компонент вектора α . Таким чином, $x(\alpha)$ є лінійною формою параметрів α .

Для організації багатоваріантних досліджень НДС тонкостінних конструкцій з урахуванням стоншування стінок (тобто при різних наборах α) можна використовувати розв'язок (10), який є компонентним записом виразу (9):

$$x^{(p)} = x_0^{(p)} + \sum_{k=1}^N \rho_{kp} \alpha_k x_0^{(p)}, \quad \forall p, \quad (10)$$

де $\rho_{kp} \alpha_k$ – елементи матриці $K_0^{-1} K_0'$, p – загальна кількість варіантів розрахунків.

Оскільки дані співвідношення виведені із наближених виразів, то їх застосування обмежене малими α , але з ростом α_k точність хоч і погіршується, однак загальні тенденції зміни компонент розв'язку $x(\alpha)$ будуть задовільними. Тому, задавшись гранично допустимими дозволенними α^* (які встановлюються нормативами на експлуатацію), можна за точними розв'язками при заданні різних комбінацій $\alpha^\sim = \{0, \dots, \alpha^*, \dots, 0\}$ отримати співвідношення для визначення ρ_{kp}^\wedge (або чутливості $\Delta^{(p)}$):

$$\Delta^{(p)} = \{\Delta_1^{(p)}, \Delta_2^{(p)}, \dots, \Delta_{N_e}^{(p)}\}^T : \quad \sum_{k=1}^N \rho_{kp}^\wedge \alpha_k^\sim x_0^{(p)} = x_*^{(p)} - x_0^{(p)} = \alpha^* \cdot \Delta^{(p)}, \quad (11)$$

де $x_* = \{x_*^{(p)}\}$ - точні «реперні» розв'язки (2) при $\alpha = \alpha^\sim$. Таким чином, розв'язки $x(\alpha)$ визначаються як лінійна комбінація «номінального» та набору «реперних»

$$x_{(\alpha)}^{(i)} = x_0^{(i)} + \sum_k \Delta_i^k \alpha_k. \quad (12)$$

При цьому «реперні» розв'язки знаходяться методом прямого скінченного збурення СЕМ досліджуваної тонкостінної конструкції (тобто маємо точний розв'язок для граничного випадку по кожному з параметрів набору $\alpha \sim = \{0, \dots, \alpha^*, \dots, 0\}$), що є альтернативою методам ТЗ з обчисленням відповідних чутливостей за виразом (9).

Варіювання товщинами складових елементів конструкції впливає на матрицю жорсткості і на матрицю мас з різною інтенсивністю. Тому для власних частот ω_i маємо залежності $\omega_i(\alpha) = \omega_i(0) \cdot (1 - 1/2(\delta_K - \delta_M))$, $i = 1, 2, \dots$, де δ_K, δ_M – лінійні форми відносно параметрів α з коефіцієнтами, пропорційними елементам матриць жорсткості K та мас M .

У результаті отримані співвідношення для визначення розв'язку використані для різноманітних розрахунків НДС при різних поєднаннях стоншувань стінок, без необхідності розв'язання кожного разу повної системи рівнянь МСЕ (2) та без обчислення компонент матриці чутливості при використанні теорії збурень (9).

У розділі наведено розв'язання низки тестових задач про зв'язаний НДС та стоншування стінок ТЕМК. Так, прийнявши до розгляду модель Долинського

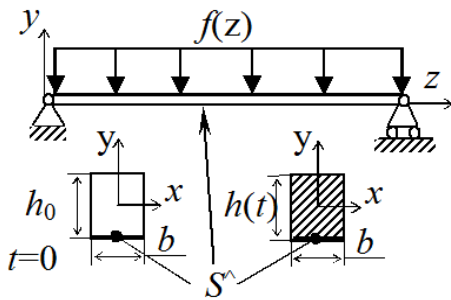


Рисунок 3 – Розрахункова схема стержня: під дією розподіленого поперечного навантаження: S^A - поверхня, що піддається корозії

$$dh/dt = -C_1 - C_2 \cdot \sigma_z(z, t), \quad (13)$$

де C_1, C_2 - деякі фізико-механічні характеристики процесу корозійного стоншення, що визначаються властивостями середовища і матеріалу, $\sigma = \sigma_z(z, t)$ - згинні напруження на нижній кородованій поверхні стержня, початкові умови: $h|_{t=0} = h_0$. Для задачі згину стержня (рис. 3) розподіл згинальних моментів M вздовж осі має вигляд

$$d^2M/dz^2 = f(z); M|_{z=0} = 0, M|_{z=l} = 0. \quad (14)$$

Максимальні згинні напруження (на поверхні S^A) –

$$\sigma(z, t) = M(z, t)/W, \quad (15)$$

де W - момент опору ($W = bh^2/6$). Тоді :

$$dh/dt = -C_1 - C_2 \cdot [6 \cdot M(z)/(b \cdot h^2)] = -C_1 - \hat{C}_2(z)/h^2(t), \quad \hat{C}_2 = C_2 \cdot 6 \cdot M(z)/b. \quad (16)$$

Для розв'язання (16) аналітично можна записати рівняння в оберненій формі

$$\dot{h} = 1/t' \Rightarrow t' = -1/(C_1 + C_2/h^2) = h^2/(C_1 h^2 + C_2), \quad (17)$$

а його розв'язок матиме вигляд

$$t(h) = -(h - h_0)/C_1 + 1/C_1 \sqrt{C_2/C_1} \left(\arctg(\sqrt{C_1/C_2} \cdot h) - \arctg(\sqrt{C_1/C_2} \cdot h_0) \right). \quad (18)$$

Тут $t(0) = T_{kr}$ - характерний критичний час, тобто час повного розчинення найбільш навантаженої ділянки.

Проаналізовано характерні навантаження стержня. У випадку рівномірно розподіленого навантаження ($q = const$)

$$d^2M/dz^2 = q \Rightarrow M(z) = q \cdot z(l - z)/2 \Rightarrow \sigma(z, t) = (3q \cdot z(l - z))/(b \cdot h^2(t)). \quad (19)$$

Тоді з урахуванням (19) закон стоншування можна записати у вигляді:

$$dh/dt = -C_1 - C_2 \cdot 3q \cdot z(l - z)/(b \cdot h^2) = -C_1 - \hat{C}_2(z)/h^2(t). \quad (20)$$

Задаючись конкретними значеннями (для модельної задачі) $C_1 = 1, C_2 = 1$, а також $l = 10, q = 1, b = 1, h_0 = 1$, отримано залежності напружень на нижній поверхні S^A , що змінюються в часі (рис. 4). На графіках рис. 4 час « t » та просторова координата « z » представлені в інтервалі $[0..T_{kr}]$ та $[0..l]$ відповідно (числами позначені номери точок дискретизації по « t » та по « z »).

Із урахуванням взаємопов'язаності процесів стоншення та НДС на основі розв'язків модельних задач для шарнірно опертого стержня про дію розподіленого, рухомого навантаження, синтезу раціонального розподілу матеріалу тощо, показано, що характер росту напружень і зменшення товщини стержня є процесом, на початковому етапі є майже лінійним, а далі різкопрогресуючим у часі та локалізованим в зонах високих напружень. Ці особливості враховані при програмно-модельній реалізації запропонованого підходу до аналізу і синтезу складних просторових тонкостінних конструкцій.

У третьому розділі представлено результати комп'ютерної реалізації створеного інструменту аналізу НДС дослідження машинобудівних конструкцій. Структура СПМК представлена на рис. 5. Запропоновано спосіб організації числових досліджень із залученням спеціалізованих програмно-модельних комплексів, об'єднуючих спеціальним чином підготовлені параметричні геометричні та скінченно-елементні моделі досліджуваних об'єктів, спеціалізовані програмні модулі, що здійснюють варіювання цих моделей, а також універсальні програмні комплекси-розв'язувачі (типу Ansys, Abaqus, Nastran) і додаткові програмні модулі для постпроцесінгу одержуваних результатів.

В аналітичній формі розглянуто декілька сценаріїв стоншення шарнірно опертого стержня складного поперечного перерізу (рис. 6-8). Тут і далі вводяться відносні величини $\lambda_w = w(\alpha)/w(0)$; $\lambda_\sigma = \sigma_{\max}(\alpha)/\sigma_{\max}(0)$; $\lambda_\omega = \omega(\alpha)/\omega(0)$; де w, σ, ω – прогини, напруження та ВЧ стержня відповідно.

Виявлено тенденції зміни НДС та ВЧ і форм коливань для ряду оболонково-стержневих конструкцій. Установлено, що при малому змінюванні товщин TEMK відбувається лінійна зміна компонент НДС та ВЧ коливань.

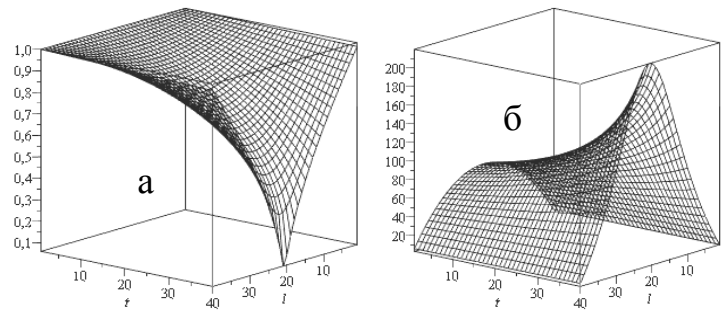


Рисунок 4 – Результати розрахунку товщини і напружень у стержні під дією розподіленого навантаження: а – зміна товщини, б – зміна згинних напружень

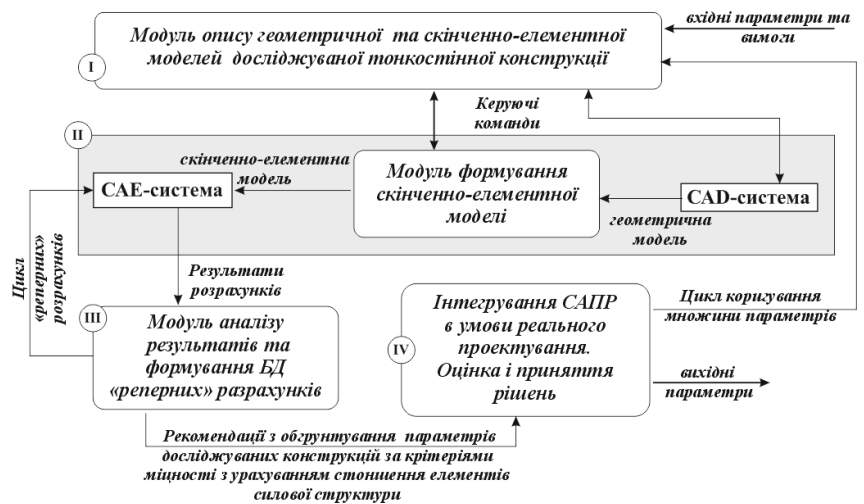


Рисунок 5 – Структура СПМК для аналізу НДС TEMK з урахуванням стоншення

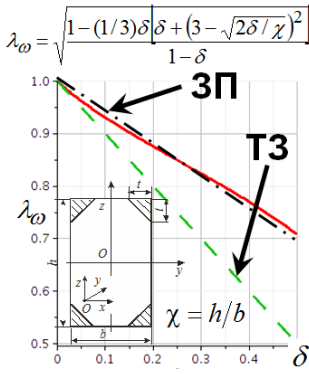


Рисунок 6 – Відносна зміна ВЧ в інтервалі $\delta \in [0; 0,5]$

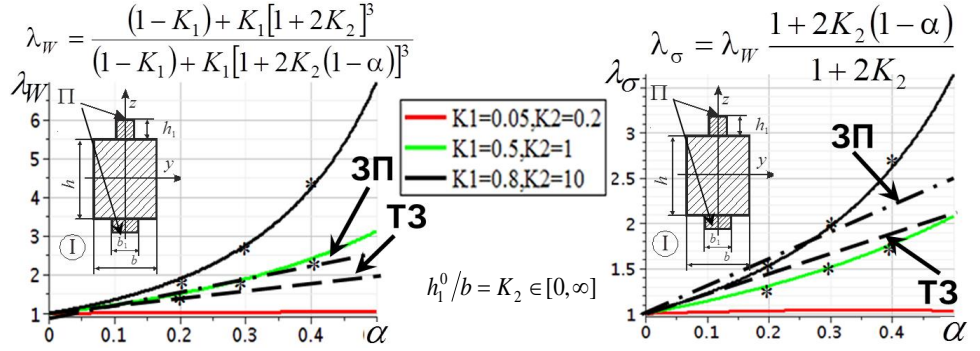


Рисунок 7 – Відносна зміна прогину λ_W (а) та напружень λ_σ (б) від параметра стоншування α при різних параметрах перетину (маркерами позначено розв'язки, отримані за допомогою МКЕ)

Процес стоншування описується або відношенням лінійних розмірів α , або площі δ . Видно, що лінеаризовані за теорією збурень (штрихова лінія, рис. 6) залежності дають значну похибку, в той час як апроксимація по запропонованому відходу (ЗП) по січній точці на кривій, яка відповідає максимально допустимому рівню стоншення (в даному випадку $\delta = 0,25$, на рисунку – штрих-пунктир), дає можливість скоротити похибку до 2%, причому вона мінімальна при $\delta \rightarrow 0$ та $\delta \rightarrow 0,25$ (тобто для номінального та максимально стоншеного поперечного перерізу).

З рис. 7 видно, що у всіх випадках «січні» (відповідають запропонованому у роботі підходу, на рисунках штрих-пунктир) набагато ближче до аналітично отриманої кривої, ніж «дотичні» (які відповідають ТЗ, на рис. – штрихова лінія).

Результати розрахунку величин шарнірно опертого стержня ромбовидного ($\alpha = t/a, \delta = 2t^2/a^2$) поперечного перерізу представлені на рис. 8. За аналогією з наведеними вище співвідношеннями для даного випадку отримано вирази

$$\lambda_w = 3 / (3 - \delta^2 - 2\delta(3 - 2\sqrt{\delta})^2); \lambda_\sigma = 3(1 - \sqrt{\delta}) / (3 - \delta^2 - 2\delta(3 - 2\sqrt{\delta})^2). \quad (21)$$

Відносна залежність прогину λ_w (рис. 8 а) схожа з аналогічними залежностями, а от залежність напружень λ_σ демонструє специфічну поведінку при малих $\delta (< 0,05)$.

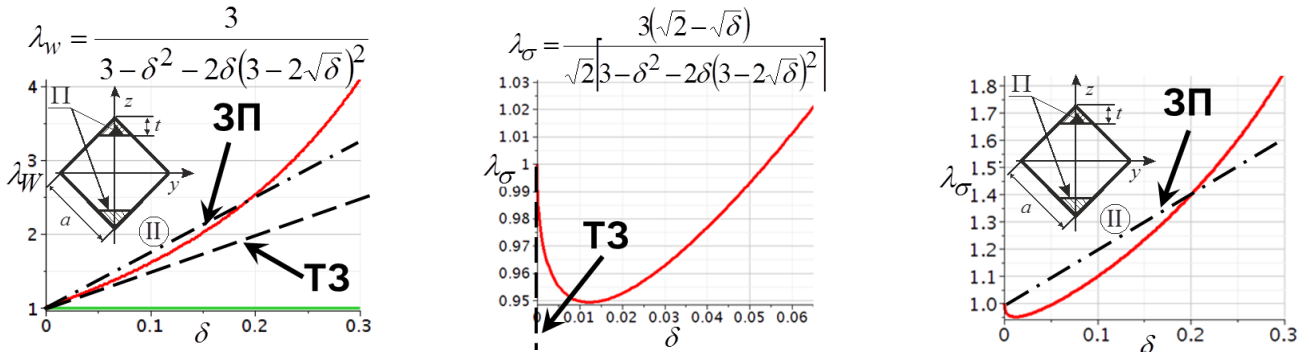


Рисунок 8 – Відносні залежності λ_w та λ_σ від параметру стоншування δ

Ця особливість полягає, по-перше, в наявності спадаючої ділянки $\lambda_\sigma(\delta)$ на інтервалі приблизно до $\delta \approx 0,012$, а по-друге, лінеаризована залежність має кореневу особливість похідної при $\delta \rightarrow 0$. Таким чином, лінеаризація по ТЗ в околиці нуля не є коректною. Це свідчить, що в деяких випадках застосування залежностей, отриманих на основі ТЗ, призводить не тільки до кількісних, але і до якісних невідповідностей одержуваних результатів.

Також досліджено більш складні оболонкові конструкції. На рис. 9 представ

лені дані для коробчастого шарнірно опертого стержня. Характерним є окремий випадок: зміна ВЧ коливань стержня при одночасному стоншенні короба з середини та зовні. Стоншення задається збільшенням/зменшенням параметрів h_1 та h_2 (рис. 10):

$$h_1 = h_1^0(1 + \psi); h_2 = h_2^0(1 - \varphi); h_1^0 / h_2^0 = K \in [0,1]. \quad (22)$$

Тоді зміна ВЧ описується виразом:

$$\lambda_\omega = \sqrt{\frac{[(1-K)(1-\varphi)^3 - K^3(1+\psi)^3]}{[(1-K^3)(1-\varphi - K(1+\psi))]}]. \quad (23)$$

Як видно з рисунку 10, в площині (φ, ψ) існують області збільшення параметра λ_ω (відповідають номеру 1), області зменшення (номер 2), а також «лінія стабільності» 3 на кордоні областей 1 та 2. Уздовж цієї лінії $\lambda_\omega = 1$, тобто при заданні такого спеціального сценарію стоншення ВЧ залишаються незмінними. Аналіз представлених результатів свідчить про можливість реалізації різноспрямованих змін спектру ВЧ коливань за рахунок вибору сценаріїв стоншування (в тому числі і стабілізації спектра).

Аналіз результатів розв'язання представлених тестових задач підтверджує можливість застосування запропонованого в роботі підходу до лінеаризації розв'язків задач визначення НДС і спектру ВЧ за ступенями стоншення тонкостінних елементів досліджуваних конструкцій. Крім того, продемонстрована у багатьох випадках більша (порівняно з залежностями на основі теорії збурень) точність апроксимації на інтервалі стоншення (до 20–30%). Таким чином, прогнозовані раніше тенденції та особливості отримали підтвердження на ряді частинних задач і об'єктів.

У четвертому розділі розроблений інструмент числових досліджень застосовано для розв'язання прикладних задач для реальних машинобудівних конструкцій. На прикладі дослідження НДС металоконструкції крана-перевантажувача ПМГ-20 проведено оперативне розв'язання задач визначення раціонального перерозподілу матеріалу між основною балкою перевантажувача ПМГ-20 та його шпренгельною системою (рис. 11), змінено структуру верхньої будови (рис. 12) та визначено її раціональні параметри.

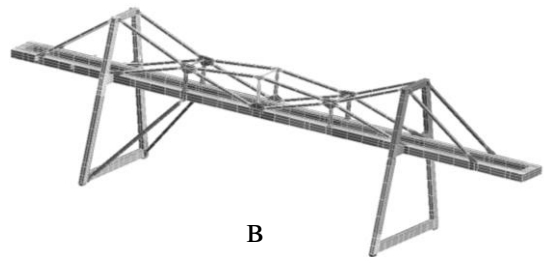
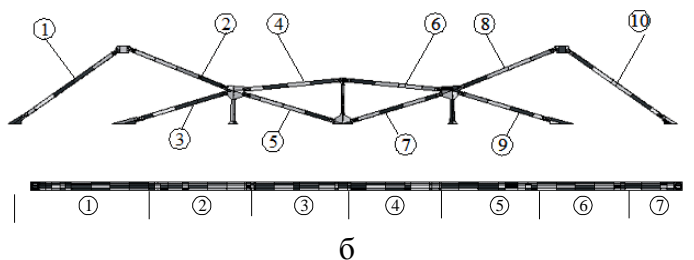


Рисунок 11 – Основні елементи силової структури перевантажувача ПМГ-20 з номерами структурних елементів: а – шпренгельна система (розкоси № 1-10), б – головна мостова балка (секції № 1-7), в – повна модель перевантажувача

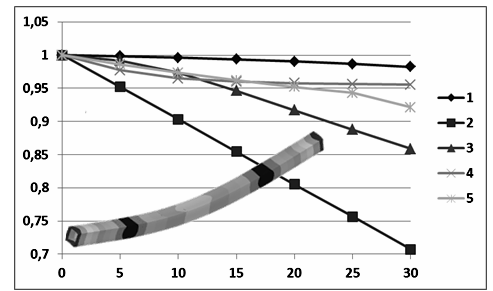


Рисунок 9 – Відносна зміна власних частот № 1-5 при стоншенні (%) стінок елементів стержня коробчастого перетину

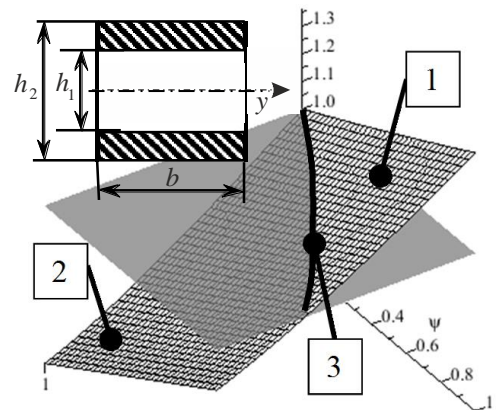


Рисунок 10 – Відносна зміна ВЧ λ_ω від ступеня стоншення φ, ψ

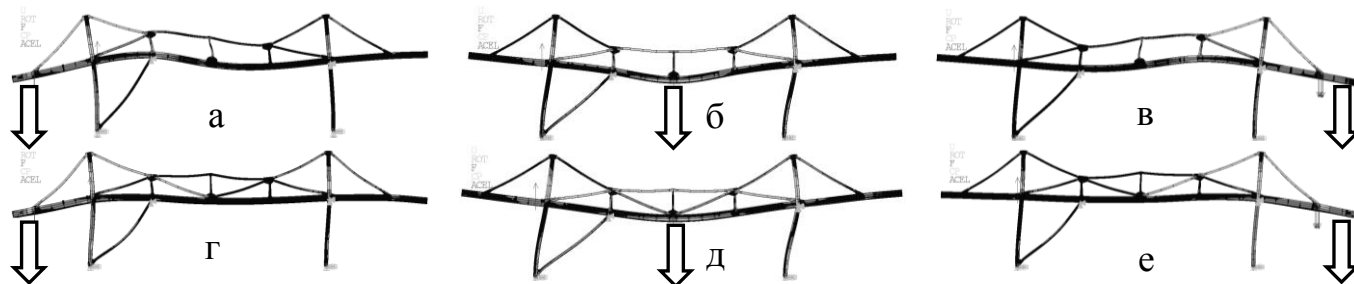


Рисунок 12 – Варіанти конструктивних рішень та відповідний НДС: а,б,в – варіант без серединних опорних розкосів (прототип), г,д,е – посилений варіант

Якщо позначити площу серединних поверхонь балки як S_M , а шпренгельної системи $S_{Ш}$, то позначаючи через $\alpha_M, \alpha_{Ш}$ ступені стоншування цих елементів відповідно, задача формулюється у вигляді лінеаризації еквівалентних напружень:

$$\sigma_V^{\exists} \rightarrow \min ; \alpha_M \cdot S_M + \alpha_{Ш} \cdot S_{Ш} = 0; \quad (24)$$

де V – об'єм (маса) верхньої будови (зберігається постійною за умов задачі), σ_V^{\exists} – максимальні еквівалентні напруження у конструкції.

Друге із наведених вище відношень пов'язує $\alpha_M, \alpha_{Ш}$, так що при цьому $\sigma_V^{\exists} = \sigma_V^{\exists}(\alpha)$. Тоді із умови лінеаризації напружень можна на етапі проектних досліджень раціонально перерозподілити матеріал (рис. 13). При цьому вдалося зменшити напруження на 20%. Після цього розв'язано задачу зменшення маси верхньої будови:

$$m = V(1 - \alpha) \rightarrow \min ; \sigma_V^{\exists} \leq [\sigma]; w^{\max} \leq [w], \quad (25)$$

де α – загальна інтенсивність зменшення товщини усіх стінок металоконструкції, $[\sigma]$ – допустимі напруження, $[w]$ – максимально допустимий прогин прольоту балки.

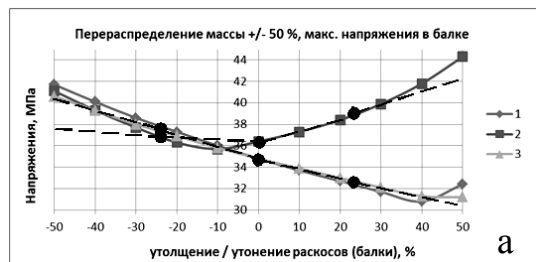


Рисунок 13 – Зміна максимальних напружень в балці (а) та в розкосах (б) при перерозподілі маси між шпренгельною системою та головною балкою для трьох характерних положень рейферного візка (дві консолі та середина прольоту)

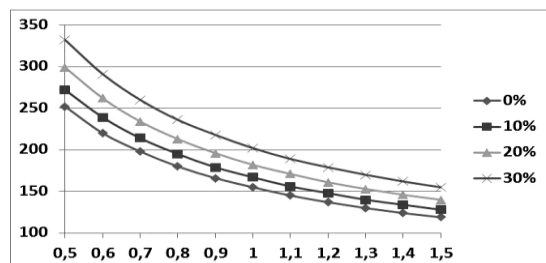


Рисунок 14 – Зміна максимальних напружень (МПа) при зниженні маси мостової балки та шпренгельної системи

Таким способом вдалося на 10% зменшити масу верхньої будови перевантажувача на етапі проектування (рис. 14).

Для вирішення зазначених задач використовувалися лінеаризовані залежності маси, напружень та прогинів від зміни товщини елементів ($\alpha, \alpha_M, \alpha_{Ш}$), це значно зекономило час та витрати обчислювальних ресурсів, оскільки кількість розрахунків зменшується на декілька порядків при використанні лінеаризації по «реперних» розв'язках, порівняно з багатоваріантними розрахунками.

Такий же підхід застосовано при визначенні впливу стоншування як окремих елементів, так і одночасно всієї конструкції (рис. 15) перевантажувача.

Подібні дослідження НДС та ВЧ коливань проведено і продемонстровано можливості лінеаризації результатів для автоцистерни аеродромного паливозаправника (рис. 16), вібромашини «грохот» (рис. 17), багатопільового тягача МТ-ЛБ (рис. 18).

Отримані при розв'язанні прикладних задач результати дають підстави для наступних висновків: запропоновані в розд. 2, 3 моделі продемонстрували свою застосовність, точність і ефективність не тільки для модельних задач, але і для реальних машинобудівних конструкцій.

У п'ятому розділі описані експериментальні дослідження і впровадження у виробництво. Для підтвердження тенденцій зміни компонент НДС та власних частот коливань тонкостінних елементів машинобудівних конструкцій, а також оцінки точності числових досліджень проведено їх порівняння з результатами експериментальних досліджень. Дослідження проведено на двох об'єктах: на макеті секції основної балки перевантажувача ПМГ-20 (рис. 20), а також в умовах реального виробництва – на перевантажувачах подібної ПМГ-20 конструкції. У ході проведення розрахунково-експериментальних досліджень виконано співставлення результатів числового моделювання (за допомогою МСЕ) і даних, отриманих експериментальним шляхом.

Вплив на макет здійснювався шляхом закріплення низки точкових мас, якими виступали вантажі з масами кожного $0.5 \div 2$ кг, розташовані в середніх частинах відсіків (рис. 19 а,б). Отримано розподіли амплітуд при частотах, що містяться в Фур'є-сигналі відгуку, який вдалося зареєструвати у результаті ударного збудження. Абсолютна та відносна відмінність результатів розрахунку і експерименту показані на рис. 20. Видно, що результати добре узгоджуються (похибка на рівні 10%).

Проведені лабораторні дослідження демонструють, що, як і прогнозувалося в ході чис-

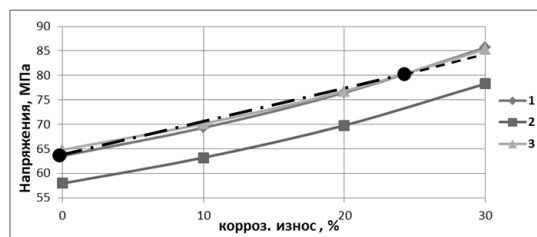


Рисунок 15 – Збільшення максимальних напружень в балці при одночасному стоншенні всіх елементів

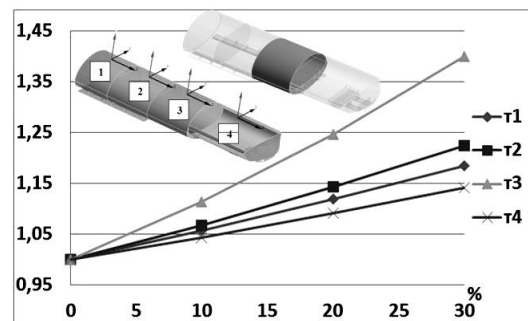


Рисунок 16 – Відносні зміни переміщень у напрямку вертикальної осі для чотирьох контрольних точок при стоншенні паливної цистерни

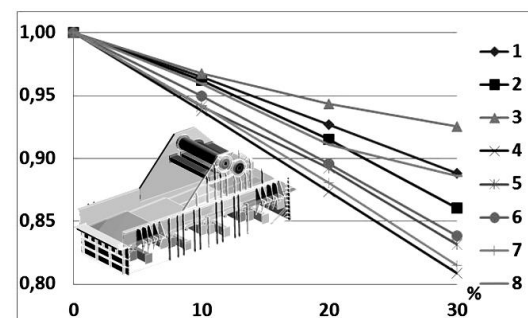


Рисунок 17 – Зміна власних частот (%) при стоншенні другої вибивної решітки конструкції вібромашини «грохот»

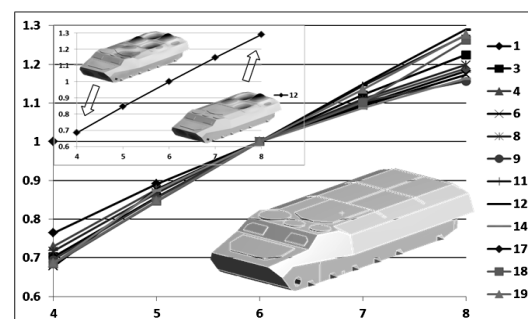


Рисунок 18 – Зміна окремих власних частот (%) корпусу МТ-ЛБ при зміні товщини листів, мм (порівняно з базовим, бмм)

лових досліджень, при малих збуреннях інерційно-жорсткісних властивостей ТЕМК зміна ВЧ приблизно прямо пропорційна збуренню, що вноситься (рис. 21).

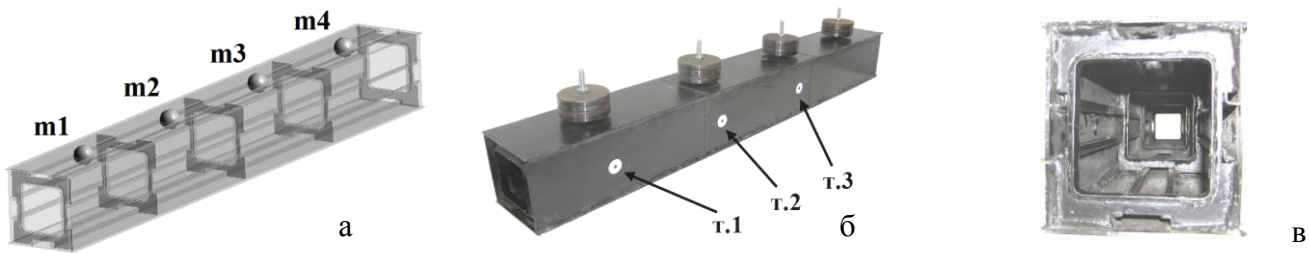


Рисунок 19 – Збурення, що вноситься в конструкцію шляхом розміщення додаткових мас: а – масові елементи в розрахунковій комп'ютерній моделі, б – вантажі, закріплені на макеті секції, в – внутрішня структура секції

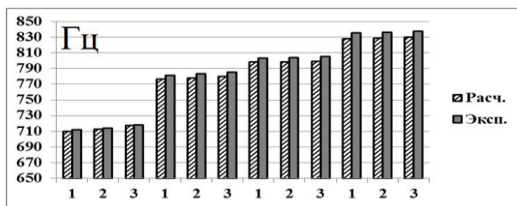


Рисунок 20 – Співставлення результатів числового і натурного експериментів

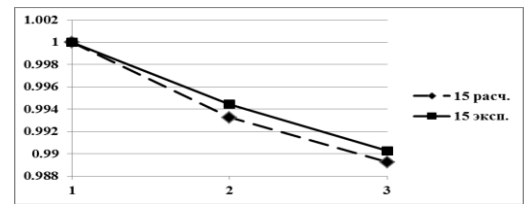


Рисунок 21 – Порівняння розрахункових і експериментальних змін ВЧ

Крім лабораторних вимірювань, також для оцінки точності проведених числових досліджень використано результати технічних обстежень машини-аналога фірми TAKRAF (рис. 22), в яких вимірювалися товщини листів конструкції методом ультразвукової товщинометрії, НДС – методом електротензометрії і стуктуроскопії.

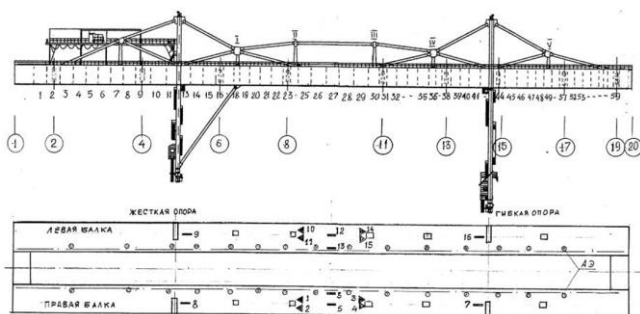


Рисунок 22 – Перевантажувач грейферний: розташування п'єзоперетворювачів АЕ та тензорезисторів на мостовій балці: 1...59 – номери відсіків; ● – п'єзоперетворювач АЕ; ▽ – тензорезистори; 1,2,...,20 – мостові балки між вісями; I – V – шпренгельні стойки

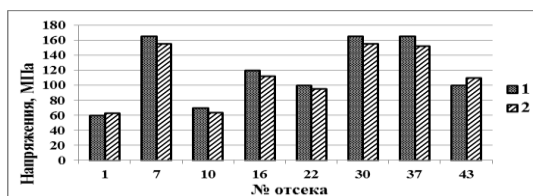


Рисунок 23 – Напруження в досліджуваних відсіках правої основної балки:

1 дані магнітного контролю, 2 - результати проведеного числового експерименту

Отримані дані (карта розподілу товщин) дають можливість для порівняння експериментально виміряних напружень з обчисленими за допомогою СЕМ, товщини окремих панелей у якій відповідають дійсним товщинам елементів конструкції реального перевантажувача, зафіксованих при вимірюваннях поточного його стану. Порівняльні результати розрахункового і експериментального дослідження представлені на рис. 23. Всі наведені результати відповідають випадку знаходження грейферного візка посередині прольоту моста.

Таким чином, узгодженість результатів числового моделювання з низкою експериментальних даних (похибка не перевищує 15%) свідчить про застосовність запропонованого в роботі підходу: відновлення шуканого розв'язку на підставі суперпозиції набору «реперних» розв'язків.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі запропоновано підхід до розв'язання задач аналізу конструкційної міцності тонкостінних елементів машинобудівних конструкцій шляхом подання компонент напружено-деформованого стану у вигляді лінеаризованих залежностей, одержуваних на основі прямого збурення їх скінченно-елементних моделей. Основні теоретичні та практичні результати роботи полягають в наступному.

1. Аналіз методів визначення чутливості компонент НДС із застосуванням апарату теорії збурень показав, що їх точність з ростом ступеня стоншування до малих, але скінченних значень суттєво знижується. Ця обставина формує задачу удосконалення цих методів, що сформувало задачі дисертаційних досліджень.

2. Для визначення залежностей компонент НДС від ступенів стоншування ТЕМК пропонується їх лінеаризація по цих ступенях, коефіцієнти якої обчислюються на основі аналізу результатів розрахунків так званих «реперних» варіантів, тобто відповідних гранично допустимим (нормативно установленим) стоншенням окремого елемента конструкції (або їх групи). Після цього розв'язок при будь-яких сценаріях стоншування отримується лінійною комбінацією «реперних». При цьому забезпечується точність даних виразів, причому при наближенні до граничних стоншень точність збільшується, а не падає, як у традиційних методиках аналізу чутливості.

3. На прикладі розв'язання тестових задач про пов'язані процеси стоншування та НДС тонкостінних конструкцій встановлено, що вони є взаємоприскорюваними прогресуючими в часі та переважно локалізованими в зонах високих напружень процесами. У той же час на початкових етапах спостерігається приблизно лінійна поведінка, що підтверджує можливість лінеаризації залежностей між компонентами НДС та ступенями стоншення тонкостінних конструкцій. Ця встановлена та підтверджена особливість була використана в роботі, що відрізняє запропонований підхід від традиційних.

4. Для окремих випадків стержнів, пластин та оболонок встановлено характер зміни компонент НДС та власних частот коливань при розвитку процесу стоншування. Показана можливість реалізації різноспрямованих тенденцій зміни переміщень та напружень, а також власних частот, відповідних різним формам коливань. Продемонстрована можливість лінеаризації залежностей компонент НДС від ступеня стоншення аж до 20-30% розмірів поперечного перерізу з допустимою похибкою на рівні 5%.

5. У ході розв'язання прикладних задач для забезпечення конструкційної міцності перевантажувача ПМГ-20 із застосуванням запропонованого підходу поставлені та розв'язані задачі обґрунтування раціональної структури верхньої будови, а також доцільність перерозподілу матеріалу з основної балки в шпренгельних систему. Обґрунтовано параметри металоконструкції, які забезпечують зниження маси верхньої будови на 10% та забезпечення заданого рівня напружень та переміщень при різних сценаріях стоншення до рівня 20% товщини стінок.

6. Експериментально на макетних та натурних зразках перевантажувачів підтверджена точність проведених числових розрахунків. Відмінність чисельно та експериментально отриманих результатів не перевищує 10-15%.

Використання результатів дисертаційної роботи дозволило скоротити термін проектування та знизити собівартість виготовлення перевантажувачів в умовах ВАТ «Азовмаш» (м. Маріуполь). Також результати впроваджено у науково-дослідний процес НТУ «ХП». Результати роботи можуть бути застосовані для широкого класу машинобудівних конструкцій.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Танченко А.Ю. Формирование конечно-элементной модели металлоконструкции углеперегрузателя / Ю.Б. Гусев, В.А. Шкода, А.Ю. Танченко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2007. – №23. – С. 33-39.
Здобувачем адаптовано узагальнений параметричний підхід для опису перевантажувача.
2. Танченко А.Ю. К вопросу определения жесткостных характеристик металлоконструкции углеперегрузателя / Ю.Б. Гусев, А.Ю. Танченко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2007. – №29. – С. 42-47.
Здобувачем досліджено жорсткість конструкції крана-перевантажувача у трьох напрямках на основі її скінченно-елементної моделі.
3. Танченко А.Ю. К вопросу моделирования напряженно-деформированного состояния металлоконструкции углеперегрузателя / Ю.Б. Гусев, А.В. Литвиненко, А.Ю. Танченко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2007. – №33. – С. 41–45.
Здобувачем промодельовано вплив різних факторів на напружено-деформований стан крана-перевантажувача та проведена оцінка впливу кожного з них на НДС.
4. Танченко А.Ю. К вопросу о техническом состоянии кранов-перегрузателей / Ю.Б. Гусев, А.Ю. Танченко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – №2. – С. 54-70.
Здобувачем узагальнено матеріали технічних оглядів конструкцій перевантажувачів.
5. Танченко А.Ю. К вопросу об оптимальном синтезе элементов мостовых перегружателей / Ю.Б. Гусев, А.Ю. Танченко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – №9. – С.43-66.
Здобувачем проаналізовано методику розрахунку конструкцій перевантажувачів та адаптовано для створення параметричних моделей.
6. Танченко А.Ю. Обеспечение технического уровня сложных пространственных конструкций на основе моделирования физико-механических процессов на примере обоснования параметров мостового перегружателя / Ю.Б. Гусев, А.Ю. Танченко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – №14. – С. 34-46.
Здобувачем здійснено розв'язання задачі визначення раціональної структури та параметрів верхньої будови перевантажувача з урахуванням нерівномірного стоншення.
7. Танченко А.Ю. К вопросу о классификации и методах расчета грейферных перегружателей мостового типа / Ю.Б. Гусев, Танченко А.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – №42. – С. 34-53.
Здобувачем проаналізовано параметри, за якими класифікують перевантажувачі.
8. Танченко А.Ю. Моделирование напряженно-деформированного состояния элементов высоконагруженных машин при действии комплекса динамических нагрузок / А.Ю. Танченко, Н.А. Ткачук // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №1. – С. 134-146.
Здобувачем на прикладі крана-перевантажувача проаналізовано напружено-деформований стан, який істотно змінюється внаслідок дії динамічних збурюючих сил.
9. Танченко А.Ю. Связанная задача о напряженно-деформированном состоянии и коррозионном утонении тонкостенных элементов конструкций / А.Ю. Танченко // Механіка та машинобудування. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – №1. – С. 55-60.
10. Танченко А.Ю. Обгрунтування параметрів високонавантажених машин на основі моделювання напружено-деформованого стану з урахуванням деградації властивостей основних елементів / Ю.Б. Гусев, А.Ю. Танченко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – №19. – С. 62-79.
Здобувачем реалізовано спеціалізований програмно-модельний комплекс для обгрунтування параметрів машинобудівних конструкцій із урахуванням стоншування.
11. Танченко А.Ю. Связанная задача утонения и напряженно-деформированного состояния шарнирно опертого стержня / А.Ю. Танченко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – № 38. – С. 140-151.
Розглянуто підхід до розв'язання зв'язаної задачі про НДС та корозійне стоншування.
12. Танченко А.Ю. Напряженно-деформированное состояние пространственных тонкостенных конструкций с учетом утонения стенок несущих элементов / А.Ю. Танченко, Н.А. Тка-

чук, Ю.Б. Гусев // Вісник СевНТУ : Механіка, енергетика, екологія. – Севастополь : СевНТУ. – 2011. – Вип. 120. – С.35-40.

Здобувачем запропонований новий підхід на основі лінеаризації розв'язку при малих змінах товщини елементів, що складають конструкцію.

13. Танченко А.Ю. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций с учетом утонения стенок / А.Ю. Танченко, А.Н. Ткачук, Ю.Б. Гусев // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2011. – №22. – С. 103-108.

Здобувачем викладено метод, який дозволяє розглядати стоншення елементів як збурення скінченно-елементної моделі.

14. Танченко А.Ю. Анализ чувствительности прочностных и динамических характеристик машиностроительных конструкций на основе прямого возмущения конечно-элементных моделей / Н.А. Ткачук, А.Ю. Танченко, А.Н. Ткачук, П.В. Чурбанов, И.Я. Храмцова, О.А. Ищенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ". – 2012. – №22. – С. 147-169.

Здобувачем запропоновані методи прямого збурення скінченно-елементних моделей машинобудівних конструкцій для аналізу чутливості їх характеристик до зміни геометричної форми, розмірів та параметрів товщин.

15. Танченко А.Ю. Проектування великогабаритних просторових конструкцій: проблеми динаміки, міцності, спрацювання / Ю.Б. Гусев, А.Ю. Танченко, Є. Орлов // 8-й Міжнар. симпозиум укр. інж.-механіків у Львові: тези доп. міжнар. симпозиуму 23-25 травня 2007 р. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2007. – С. 81-82.

Здобувачу належить опис проблем, що виникають на етапі багатоваріантних досліджень.

16. Танченко А.Ю. Параметричні розрахункові моделі вуглеперевантажувачів як основа параметричного аналізу та синтезу / Ю.Б. Гусев, А.Ю. Танченко, Р.В. Береговий // «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій» : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. 17-19 жовтня 2007р. – Дніпропетровськ : ДНУ, 2007р. – С. 384-385.

Здобувачем створено параметричну модель конструкції крана-перевантажувача.

17. Танченко А.Ю. Параметричні моделі для визначення напружено-деформованого стану елементів важконавантажених машин / А.В. Грабовський, А.Ю. Танченко, Ю.Б. Гусев // «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. 22-24 жовтня 2008 р. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2008. – С. 96-97.

Здобувачем розроблено моделі для проведення досліджень НДС перевантажувачів.

18. Танченко А.Ю. Дослідження різноманітних моделей накопичення пошкоджуваності на прикладі секції мостового крана-перевантажувача / А.Ю. Танченко // «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. 20-22 травня 2009 р. – Харків : НТУ "ХПІ", 2009. – С. 241.

19. Танченко А. Моделирование динамики та напружено-деформованого стану високонавантажених машин / А. Грабовський, Т. Поліщук, А. Танченко // 9-й Міжнар. симпозиум укр. інж.-механіків у Львові : тези доп. міжнар. Симпозиуму 20-22 травня 2009 р. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2009. – С. 160.

Здобувачу належить адаптація підходу моделювання змінюваного НДС перевантажувача.

20. Танченко А.Ю. Моделирование динамических процессов у машинах з урахуванням стоншування стінок / А.Ю. Танченко, І. І. Курпіль, Ю.Б. Гусев // «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. 12-14 травня 2010 р. – Харків : НТУ "ХПІ", 2010. – С. 249.

Здобувачем створено алгоритм оперативних багатоваріантних розрахунків НДС.

21. Танченко А.Ю. Математичне та числове моделювання динамічних процесів у машинах з урахуванням стоншування стінок / А.Ю. Танченко, Ю.Б. Гусев, М.А. Ткачук // «Университетская наука-2010» : тези доп. МНТК 19-21 травня 2010 р. – Маріуполь : ПГТУ, 2010. – т.1 – С. 322-323.

Здобувачем доведено необхідність урахування проміжного стану стоншення елементів конструкції на етапі проектних робіт.

22. Танченко А.Ю. Розрахункове забезпечення ресурсу великогабаритних машинобудівних конструкцій / А.Ю. Танченко, Ю.Б. Гусев, Ю.В. Костенко // «Теорія та практика раціональ-

ного проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» : тези доп. МНТК 11-13 листопада 2010 р. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2010. – С. 105-106.

Здобувачем сформовано проблему забезпечення гарантованої працездатності в межах ресурсу машинобудівної конструкції, що експлуатується у важких умовах виробництва.

23. Танченко А.Ю. Методи прогнозування ресурсу високонавантажених тонкостінних елементів машин з урахуванням стоншування / Ю.Б. Гусев, А.Ю. Танченко // 10-й Міжнар. симпозиум укр. інж.-механіків у Львові : тези доп. міжнар. симпозиуму 25-27 травня 2011 р. – Львів : КІНПАТРИ ЛТД, 2011. – С. 34-35.

Здобувачем описано НДС при суттєво нерівномірному стоншенні металоконструкції.

24. Танченко А.Ю. Зв'язана задача стоншування і напружено-деформованого стану елементів машинобудівних конструкцій / А.Ю. Танченко // «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. 01-03 червня 2011 р. – Харків : НТУ "ХПІ", 2011. – С. 195.

25. Танченко А.Ю. Метод прямого возмущения конечно-элементных моделей в задаче анализа чувствительности НДС машиностроительных конструкций с утонением стенок / А.Ю. Танченко, И.Я. Храмова, А.А. Зарубина, Ю.Б. Гусев, А.Н. Ткачук // «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф. 15-17 травня 2012 р. – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – С. 216.

Здобувачем викладено метод лінеаризації поверхні відклику системи на основі розгляду процесу істотно нерівномірного стоншення як оптимізаційної задачі.

АНОТАЦІЇ

Танченко А.Ю. Методи розрахунку напружено-деформованого стану тонкостінних конструкцій при зміні товщини в процесі експлуатації. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Міністерство освіти і науки України, Харків, 2013.

У роботі поставлена та розв'язана задача забезпечення конструкційної міцності тонкостінних елементів машинобудівних конструкцій з урахуванням зміни товщини в процесі експлуатації, зокрема, викликаной впливом корозійного зношування.

Задача поставлена у вигляді визначення чутливості тонкостінної конструкції до зміни початкових товщин її елементів.

Запропонований у роботі підхід, передбачає обчислення чутливостей компонент НДС та ВЧ коливань користуючись не самим математичним апаратом теорії збурень, а використовуючи скінченно-різницеві співвідношення. При цьому чутливість визначається за допомогою залучення т.з. «реперних» розв'язків, які відповідають гранично допустимим стоншуванням окремих елементів конструкції. У результаті лінеаризовані співвідношення для визначення ВЧ коливань та компонент НДС розповсюджуються не тільки на нескінченно малі варіації товщин окремих елементів, але й на малі, але скінченні їх величини. Оскільки для гранично допустимих стоншувань розв'язання задач аналізу здійснюється за допомогою прямого збурення скінченно-елементних їхніх моделей, то завдяки цьому точність побудованих лінеаризованих залежностей не зменшується, а зростає при наближенні елементів конструкції до гранично допустимих стоншувань.

Для низки машинобудівних конструкцій розв'язано задачі обґрунтування раціональних конструктивних схем і проектних параметрів. Зокрема, за рахунок пере-

розподілу матеріалу в елементах верхньої будови досягнуто зменшення маси проектного перевантажувача, підвищено його навантажувальну здатність та термін служби. Аналогічні дослідження проведені також для інших конструкцій.

Ключові слова: напружено-деформований стан, тонкостінні конструкції, корозійне стоншування, чутливість, збурення, метод скінченних елементів.

Танченко А.Ю. Методы расчета напряженно-деформированного состояния тонкостенных конструкций при изменении толщины в процессе эксплуатации. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2013.

В работе поставлена и решена задача обеспечения конструкционной прочности тонкостенных элементов машиностроительных конструкций с учетом изменения толщины в процессе эксплуатации, в частности, вызванной воздействием коррозионного износа. Задача поставлена в виде определения чувствительности тонкостенной конструкции к изменению первоначальной толщины ее элементов. С привлечением аппарата теории возмущений установлены линейные тенденции изменения компонент напряженно-деформированного состояния (НДС), а также изменения собственных частот (СЧ) колебаний при малом варьировании толщинами элементов конструкции.

В работе предложен подход, предусматривающий вычисления чувствительностей компонент НДС и СЧ колебаний пользуясь не самым математическим аппаратом теории возмущений, а используя конечно-разностные соотношения – при этом чувствительность определяется посредством привлечения т.н. «реперных» решений, которые соответствуют предельно допустимым утонениям отдельных элементов конструкции. В результате линеаризованные соотношения для определения СЧ колебаний и компонент НДС распространяются не только на бесконечно малые вариации толщин отдельных элементов, но и на малые, но конечные их величины. Поскольку для предельно допустимых (по нормативным документам) утонений решение задачи анализа осуществляется с помощью прямого возмущения конечно-элементных моделей, то благодаря этому точность построенных линеаризованных зависимостей не уменьшается, а возрастает при приближении толщин элементов конструкции к предельно допустимым значениям.

На примере связанной задачи об определении НДС шарнирно опертого стержня прямоугольного сечения, у которого коррозионной утонение происходит по нижней растянутой грани, установлен примерно линейный характер зависимости напряжений от утонения на начальных этапах связанного процесса.

С учетом существенно различных масштабов длительности процессов коррозионного износа, эксплуатации проектируемых машин, а также единичного рабочего цикла, был разработан новый подход к задачам определения чувствительности компонент НДС и ВЧ колебаний элементов тонкостенных конструкций, который реализован в виде специализированных программно-модельных комплексов. С применением этих комплексов проведено решение ряда тестовых и прикладных задач для стержней, пластин, оболочек, а также сложных пространственных конструкций.

Для ряда машиностроительных конструкций решены задачи обоснования рациональных конструктивных схем и проектных параметров. В частности, за счет перераспределения материала из основной мостовой балки перегружателя в элементы его шпренгельной системы достигнуто уменьшение массы верхнего строения проектируемого перегружателя, повышена несущая способность и срок службы.

В работе описан ряд результатов экспериментальных исследований: макета секции основной балки перегружателя ПМГ-20, натурной конструкции перегружателя-аналога фирмы TAKRAFT. С использованием методов тензометрии, толщинометрии, структуроскопии, акселерометрии были определены компоненты НДС исследуемых конструкций и их СЧ при изменении массово-жесткостных характеристик. Сопоставление с результатами вычислений выявило удовлетворительную точность полученных численных решений и применимость предложенного в работе подхода.

Диссертационные разработки могут быть использованы для расчетов широкого класса тонкостенных конструкций с учетом изменения толщины элементов при эксплуатации

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, тонкостенные конструкции, коррозийное утонение, чувствительность, возмущение, метод конечных элементов.

Tanchenko A.Y. Structural analysis of thin-walled engineering structures taking into account thickness change during service. - The manuscript.

The dissertation is presented for scientific degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines. – National technical university “Kharkov Polytechnic Institute”, Ministry of education and science of Ukraine, Kharkov, 2013.

The problem for ensuring the structural strength of thin-walled engineering structures components taking into account thickness change during service was solved. Thickness change could be caused by corrosion, in particular.

The problem was posed in the form of sensitivity determination for the thin-walled structures elements thickness change. It is done with the help of the theory of perturbations, which is used for stress-strain state components and natural frequencies linear trends determination with the small variation of the thickness of the structure.

In the given work approach is proposed for computing sensitivity of the stress-strain state components and natural frequencies using finite-difference relations. With this method sensitivity is determined with the help of the "reference" solutions, which is matched with the maximum allowable (standard setting) thinning of the individual construction elements. As a result, the linearized relations for the determination of the natural frequencies fluctuations and the stress-strain state components are applied not only to infinitesimal variations of the thickness of individual elements, but also to small finite magnitudes.

The proposed approach consist in superposition of the "reference" solutions determination using stress-strain state components as well as natural frequencies. It was tested on the set of test problems and a number of real engineering structures, for example, plant "Azovmash" crane-loader PMG-20. Using this approach weight of the upper structure of the new projected crane-loader was reduced, capacity and service life increased.

Keywords: stress-strain state, thin-walled structures, corrosion thinning, sensitivity, disturbance, finite element method.

Танченко Андрій Юрійович

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ
ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ
ПРИ ЗМІНІ ТОВЩИНИ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

АВТОРЕФЕРАТ

Відповідальний за випуск:
к.т.н., доц. Зарубіна А.О.

Підписано до друку 16.07.2013 р. Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Друк – різнографія. Гарнітура Times New Roman.
Умовн. друк. арк. 0,9. Наклад 100 прим. Зам. № 59

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)
61024, м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1
