

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Бондаренко Марина Олександрівна

УДК 539.3

ДИСЕРТАЦІЯ


ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ ШЛЯХОМ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АПРОКСИМАЦІЙ ПОВЕРХОНЬ ВІДГУКУ

05.02.09 – динаміка та міцність машин

13 – механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 М. О. Бондаренко


*Згоденієм за
змістом з іншими
примірниками дисер-
тації засвідчую.*

*Власний секретар
визначеної
вченою радою*

Науковий керівник

Ткачук Микола Анатолійович,
доктор технічних наук, професор



 *Марин О.О.*
12.06.2018.

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Бондаренко М.О. Забезпечення міцності тонкостінних конструкцій шляхом обґрунтування параметрів із використанням апроксимацій поверхонь відгуку. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.02.09 "Динаміка та міцність машин" (013 – Механічна інженерія). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2018.

Сучасні потреби машинобудування та різних галузей промисловості вимагають широкого застосування тонкостінних конструкцій. До особливостей цих конструкцій відноситься високий ступінь навантаженості всіх елементів і частин, значний рівень напружень і великі прогини. При цьому межі області застосовності традиційних геометрично і фізично лінійних моделей порушуються, і виникає необхідність переходу до використання нелінійних моделей. Важливою обставиною при цьому є необхідність розв'язання не одиничних, а великої кількості задач аналізу напружено-деформованого стану тонкостінних машинобудівних конструкцій в нелінійній постановці. Це обумовлено тим, що на етапі проектних розробок передбачається прийняття рішень на основі багатоваріантних розв'язків задач аналізу. При цьому відбувається або експертний синтез структури і параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій, або пряма побудова дискретної хмари точок для мінімізації з урахуванням обмежень (наприклад, прогинів або напружень).

Перераховані фактори створюють проблемну ситуацію в механіці і машинобудуванні. Це визначає актуальність досліджень, проведених у цій дисертаційній роботі та спрямованих на підвищення ефективності

розв'язання задач обґрунтування проектних рішень для тонкостінних машинобудівних конструкцій на основі нелінійних моделей.

У дисертаційній роботі розв'язана науково-технічна задача, яка полягає в розробці і реалізації підходу до забезпечення конструкційної міцності складних тонкостінних машинобудівних конструкцій, що працюють в умовах геометрично та фізично нелінійної поведінки матеріалу, на основі побудови і використання апроксимацій функцій відгуку.

У роботі застосовуються методи твердотілого тривимірного моделювання та метод узагальненого параметричного моделювання складних і надскладних механічних систем – для створення параметричних моделей досліджуваних конструкцій, методи механіки суцільного середовища – для аналізу напружено-деформованого стану тонкостінних машинобудівних конструкцій, метод скінченних елементів – для дискретизації досліджуваних конструкцій та розв'язання задач аналізу досліджуваних станів та процесів, метод скінченних різниць – для обчислення похідної функції відгуку в ході реалізації алгоритму пошуку раціонального поєднання конструктивних параметрів досліджуваних об'єктів.

У ході виконання дисертаційного дослідження отримано наступні наукові результати: 1) здійснено аналіз та узагальнення існуючих методів визначення напружено-деформованого стану елементів машин конструкцій з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей деформування та підходів до пошуку обґрунтованих рішень; 2) розроблено комплекс математичних моделей для визначення напружено-деформованого стану тонкостінних елементів машин з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей, в які інтегроване узагальнене параметричне моделювання; 3) розроблено методи апроксимації функції відгуку в ході досліджень, спрямованих на обґрунтування параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій, а також визначено ефективні методи пошуку екстремуму з урахуванням особливостей форми функцій відгуку для нелінійних систем;

4) розроблено та апробовано на тестових задачах програмний комплекс для розв'язання задач обґрунтування раціональних параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій, який реалізує запропоновані математичні моделі та розроблений підхід; 5) розроблений підхід та моделі застосовано для розв'язання прикладних задач аналізу напружено-деформованого стану та обґрунтування конструктивних параметрів тонкостінних елементів реальних машинобудівних конструкцій; 6) здійснено оцінку достовірності отриманих чисельних результатів шляхом порівняння з даними експериментальних досліджень; 7) сформовано практичні рекомендації та впроваджено результати досліджень у виробництво.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розробці підходу до забезпечення конструкційної міцності тонкостінних машинобудівних конструкцій, що працюють в умовах геометрично та фізично нелінійної поведінки матеріалу, шляхом обґрунтування параметрів із застосуванням апроксимацій поверхонь відгуку. При цьому розв'язані нові задачі та виявлені наступні закономірності:

1) розроблено новий підхід до обґрунтування проектних рішень для тонкостінних машинобудівних конструкцій при варійованих конструктивних, технологічних параметрах і умовах експлуатації на основі мінімізації апроксимаційної цільової функції (на відміну від традиційних підходів, у яких використовується дійсна функція відгуку) із урахуванням геометрично і фізично нелінійної поведінки матеріалу тонкостінних елементів конструкцій, що створює можливість більш оперативного визначення раціональних параметрів цих конструкцій;

2) удосконалено метод апроксимації поверхні відгуку у частині уточнення її вигляду в міру наближення до шуканого розв'язку, що створює умови для зменшення обсягу обчислень значень функції відгуку порівняно із відомими методами при збереженні прийнятної точності розв'язку;

3) встановлено характер залежностей характеристик напружено-

деформованого стану низки тонкостінних машинобудівних конструкцій від варійованих проектних параметрів, що є основою формування апроксимаційних поверхонь відгуку при синтезі раціональних розв'язків за різними критеріями.

Розроблений підхід дає можливість одночасно розглядати різні критерії, за якими проводиться обґрунтування параметрів, включаючи характеристики міцності, жорсткості, технологічні та економічні чинники. Ці критерії вводяться у цільову функцію з ваговими коефіцієнтами. Обмеження на допустимі значення параметрів враховуються введенням у цільову функцію штрафних функцій. Для обчислення чутливості окремих величин до зміни параметрів запропоновано використовувати скінченно-різницеві співвідношення. Апроксимована цільова функція відображає в цілому глобальні тенденції зміни рішень. Це дає змогу у більшості випадків знайти стійке раціональне технічне рішення, близьке до оптимального.

Розроблений спеціалізований програмно-модельний комплекс включає три основні компоненти: параметричні моделі, створювані спеціально під конкретний об'єкт дослідження або клас об'єктів; програмні модулі, які оперують з даними про об'єкт і варіюють чисельну модель; експерт, який контролює проведення усіх етапів дослідження.

Комплекс розрахункових математичних моделей для визначення напружено-деформованого стану тонкостінних елементів машин з урахуванням геометричної та фізичної нелінійностей, що побудовані, моделі апроксимаційного опису поверхні відгуку різного ступеня точності, алгоритм мінімізації цільової функції, а також отримані результати чисельних розрахунків мають практичне застосування. Вони можуть використовуватись для знаходження раціональних параметрів тонкостінних конструкцій, які використовуються у машинобудуванні та промисловості, оскільки розроблений підхід, на відміну від існуючих традиційних, враховує особливості задач, що розглядаються, та є адаптованим до умов виробництва.

Він гарантує отримання розв'язку, є недорогим з точки зору часових та комп'ютерних ресурсів, створює можливість автоматизації процесу пошуку раціонального технічного рішення, у більшості випадків забезпечує стійке проектне рішення, нечутливе до проектних змін.

Результати дисертаційних досліджень представляють інтерес для впровадження в НДІ, КБ і безпосередньо на підприємствах, які займаються проектуванням, виготовленням і експлуатацією тонкостінних машинобудівних виробів (або виробів, у складі яких містяться тонкостінні елементи), що працюють в умовах складних режимів навантаження при великих переміщеннях і деформаціях, які значно перевищують пружні. Це і рухомий склад залізничного транспорту (вагони, цистерни, платформи тощо), бойові машини, кар'єрні екскаватори, відвалоутворювачі, перевантажувачі тощо.

На цій основі розроблені рекомендації щодо раціонального проектування тонкостінних елементів вантажних вагонів, корпусів легкоброньованих машин, каркасів кузовів автобусів та кабін тракторів. Потенційну цінність представляють ці розробки для елементів гірничо-шахтного устаткування, підйомно-транспортних машин, транспортних засобів військового і цивільного призначення, суден, вітроенергетичних установок тощо.

Створено програмний комплекс, який впроваджений у практику проектних робіт у ТОВ «Науково-інженерний центр КК «РейлТрансХолдінг» (м. Маріуполь) та ДП «Завод ім. В.О. Малишева» (м. Харків). У цьому випадку застосування теоретичних підходів, математичних і чисельних моделей, запропонованих у дисертаційній роботі, дало можливість із практичної точки зору більш ефективно розв'язувати задачі обґрунтування проектних параметрів.

Ключові слова: тонкостінна машинобудівна конструкція, проектний параметр, геометрична нелінійність, фізична нелінійність, апроксимація, лінеаризація, білінеаризація, функція відгуку, оптимізація, метод скінченних елементів.

Список публікацій здобувача

1. Бондаренко М.А. Спеціалізовані програмно-модельні комплекси для аналізу фізико-механічних процесів та синтезу параметрів бронекорпусів легко броньованих машин / О.В. Литвиненко, С.Т. Бруль, М.О. Бондаренко, О.О. Бондаренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХПІ», 2013. – С. 219.

2. Бондаренко М.А. Розробка методів забезпечення пасивної безпеки автобусів / М.О. Бондаренко, О.О. Бондаренко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції, Ч.І – Харків, НТУ «ХПІ», 2014. – С. 188.

3. Бондаренко М. О. Аналіз конструкцій залізничних вагонів і методів їх розрахунку на міцність / М. О. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №14. – С. 16–22.

4. Бондаренко М.А. Экспериментальные исследования грузового вагона / А.Д. Чепурной, А.В. Литвиненко, А.Н. Баранов, Р.И. Шейченко, М.А. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №22. – С. 44–61.

5. Бондаренко М. О. Дослідження напружено-деформованого стану каркасу кузова автобуса в умовах моделювання його тестового випробування на пасивну безпечність / М. О. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №29. – С. 13–17.

6. Бондаренко М.А. Метод линеаризации поверхности отклика в задаче обоснования проектных параметров тонкостенных элементов машиностроительных конструкций / А.В. Литвиненко, Р.И. Шейченко, Р.В. Граборов, М.А. Бондаренко // Вісник Національного технічного

університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 31. – С. 88–99.

7. Бондаренко М.А. Билинеаризация поверхности отклика в оптимизационных исследованиях тонкостенных элементов машиностроительных конструкций / М.А. Бондаренко, Р.И. Шейченко, Р.В. Граборов, Д.Г. Шинкин, Д.В. Киричук // Механіка та машинобудування. – 2014. – № 1. – С. 18–23.

8. Чубань (Бондаренко) М.О. Вплив проектно-технологічних параметрів на міцність та динамічні характеристики тонкостінних конструкцій / О.В. Мартиненко, О.В. Веретельник, А.Ю. Танченко, М.О. Чубань, О.В. Литвиненко // Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки: Тези доповідей VI міжнародної науково-практичної конференції. – Київ, Вид. дім Дмитра Бураго, 2015. – С. 154–155.

9. Чубань (Бондаренко) М. О. Вдосконалення методів дослідження кузовів вагонів під дією експлуатаційних навантажень / М.О. Чубань, Р.І. Шейченко, А.В. Середа, Д.Г. Шинкін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIII міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I – Харків, НТУ «ХПІ», 2015. – С. 234.

10. Бондаренко М. А. Ходовые прочностные и динамические испытания вагона-платформы / А.Д. Чепурной, А.В. Литвиненко, Р.И. Шейченко, Р.В. Граборов, М.А. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – №31. – С. 111–128.

11. Чубань (Бондаренко) М.А. Аппроксимация поверхности отклика для использования в процессе параметрического синтеза машиностроительных конструкций / М.А. Чубань // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – №43. – С. 161–164.

12. Чубань (Бондаренко) М.А. Модели аппроксимации поверхности отклика в оптимизационных исследованиях машиностроительных конструкций / М.А. Чубань, Р.И. Шейченко, Р.В. Граборов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 62. – С. 46–51.

13. Чубань (Бондаренко) М. А. Методологические основы расширенных прочностных и динамических исследований при испытаниях длиннобазных платформ / В.И. Сенько, С.В. Макеев, А.Д. Чепурной, А.В. Литвиненко, Р.И. Шейченко, Р.В. Граборов, Н.А. Ткачук, М.А. Чубань // Механіка та машинобудування. – 2015. – №1. – С. 67–81.

14. Чубань (Бондаренко) М.А. Вплив варіювання проектних параметрів на характеристики міцності та жорсткості корпусів легкоброньованих машин / М.А. Чубань, А.М. Малакей, Р.І. Шейченко, О.О. Атрошенко, І.В. Мазур, В.В. Дураченко // Наукове забезпечення службово-бойової діяльності Національної гвардії України: Тези доповідей VII науково-практичної конференції. – Харків, НАНГУ, 2016. – С. 155–156.

15. Чубань (Бондаренко) М.А. Дослідження впливу проектних параметрів на характеристики міцності та жорсткості корпусів легкоброньованих машин / М.О. Чубань, А.М. Малакей, В.В. Дураченко, О.О. Атрошенко, І.В. Мазур // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції. – Львів, НАСВ, 2016. – С. 66–67.

16. Чубань (Бондаренко) М.А. Обоснование проектно-технологических решений при проектировании инновационных образцов подвижного состава железных дорог / А.Д. Чепурной, А.В. Литвиненко, Р.И. Шейченко, Р.В. Граборов, М.А. Чубань, Н.А. Ткачук // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I – Харків, НТУ «ХПІ», 2016. – С. 234.

17. Чубань (Бондаренко) М. А. Испытания вагона-платформы универсальной / В.И. Сенько, С.В. Макеев, А.Д. Чепурной, Р.И. Шейченко, А.В. Литвиненко, Р.В. Граборов, Н.А. Ткачук, М.А. Чубань // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – №12. – С. 71–83.

18. Чубань (Бондаренко) М.А. Влияние варьирования проектных параметров на прочностные и жесткостные характеристики корпусов легкобронированных машин / М.А. Чубань, Р.И. Шейченко, Р.В. Граборов, А.В. Грабовский, А.Ю. Танченко, Н.А. Ткачук // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – №23. – С. 149–155.

19. Чубань (Бондаренко) М. А. Функциональные испытания перспективного вагона-цистерны для перевозки расплавленной серы модели 15-9544 / В.В. Галов, С.Б. Комиссаров, Р.В. Граборов, Р.И. Шейченко, М.А. Чубань // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – №39. – С. 50–55.

20. Бондаренко М. О. Методи оптимізації із застосуванням поверхонь відгуку, адаптовані до розв'язання задач аналізу та синтезу конструктивних параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій / М. О. Бондаренко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 42. – С. 22–28.

21. Пат. на корисну модель UA 115987 U, МПК В61D 5/00. Залізничний вагон-цистерна / С.О. Шпак, А.Д. Чепурний, О.В. Литвиненко, В.С. Марінюк, Р.І. Шейченко, О.В. Морозюк, Д.В. Степанов, Р.В. Граборов, М.О.Чубань; Власник ООО УК "РейлТрансХолдінг", заявл. 01.08.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. №9.

22. Бондаренко М.А. Обгрунтування структури та параметрів бронекорпусів вітчизняних легкоброньованих машин за критеріями захищеності / А.Ю. Васильєв, Д.С. Мухін, С.В. Куценко, М.О. Бондаренко //

Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції. – Львів, НАСВ, 2017. – С. 22.

23. Бондаренко М.А. Комп'ютерне моделювання у процесі обґрунтування технічних рішень для інноваційних виробів / М. О. Бондаренко, А. Д. Чепурний, О. В. Литвиненко, Ю. Б. Гусев, Р. І. Шейченко, Р. В. Граборов // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I. – Харків, НТУ «ХПІ», 2017. – С. 167.

24. Бондаренко М.А. Линеаризация и билинеаризация поверхности отклика в случае нелинейного поведения оптимизируемых конструкций / М.А. Бондаренко // Механіка та машинобудування. – 2017. – №1. – С. 32–37.

25. Bondarenko M. Analysis and synthesis of complex spatial thin-walled structures / A. Marchenko, A. Chepurnoy, V. Sen'ko, S. Makeev, O. Litvinenko, R. Sheychenko, R. Graborov, M. Tkachuk, M. Bondarenko // Proceedings of the Institute of Vehicles. – Warsaw: Institute of Vehicles of Warsaw University of Technology. – 2017. – №. 1 (110). – P. 17–29.

26. Бондаренко М. А. Компьютерное моделирование в процессе обоснования технических решений при проектировании инновационных изделий / Ю. Б. Гусев, Р. И. Шейченко, Р.В. Граборов, М. А. Бондаренко, А. Ю. Танченко, Н. А. Ткачук, А. В. Набоков, Лунев Е.О. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 5. – С. 95–107.

27. Бондаренко М. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций / Р. И. Шейченко, Н. А. Ткачук, М. А. Бондаренко, Е.А. Лунев // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 12. – С. 137–145.

28. Бондаренко М. А. Экспериментальные исследования тонкостенных конструкций / Ю. Б. Гусев, Р. И. Шейченко, Н. А. Ткачук, А. Ю. Танченко, А. В. Грабовский, А. В. Набоков, М. А. Бондаренко, А. М. Головин, В. В. Шеманская // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 14. – С. 140–155.

29. Бондаренко М. О. Числові дослідження вантажного вагону / А. Д. Чепурний, Р. І. Шейченко, Р. В. Граборов, М. А. Ткачук, М. О. Бондаренко, А. В. Грабовський, Є. О. Луньов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 23. – С. 47–55.

30. Бондаренко М. О. Расчетно-экспериментальная верификация динамической модели корпуса бронетранспортера / М.А. Бондаренко, Е.В. Пелешко, А.Ю. Васильев, А.В. Грабовський, Р.В. Граборов, Ю.В. Веретельник, В.В. Посохов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017. – № 32. – С. 5–13.

31. Бондаренко М. А. Решение задач анализа и синтеза сложных пространственных тонкостенных конструкций / А.Д. Чепурной, В.И. Сенько, С.В. Макеев, А.В. Литвиненко, Р.И. Шейченко, Р.В. Граборов, Н.А. Ткачук, М.А. Бондаренко // Вестник Белорусского государственного университета транспорта. – Гомель: БГУТ. – 2017. – №2. – С. 152–162.

32. Bondarenko M. Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation / M. Tkachuk, M. Bondarenko, A. Grabovskiy, A. Vasiliev, R. Sheychenko, R. Graborov, V. Posohov, E. Lunyov, A. Nabokov // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: УДАЗТ. – 2018. – 1/7 (91) – С. 18–29 (Scopus).

ABSTRACT

Bondarenko M.O. Thin-walled structures strength assurance by parameters validation using response surfaces approximations. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Thesis for candidate of technical science degree (Doctor of Philosophy) in speciality 05.02.09 – Dynamics and Strength of Machines (013 – mechanical engineering). – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Kharkiv, 2018.

Modern needs of mechanical engineering and various industries require widespread application of thin-walled structures. Unique feature of these structures are: a high degree of components and parts loading, substantial level of stress and large deflections. Traditional geometrical and physical linear models can't be applied upon that, so the nonlinear models have to be used. What is more, it is necessary to solve not a single, but a series of tasks for the stress-deformed state analysis of thin-walled engineering structures in nonlinear formulation. The reason is that substantiated decisions based on solution of multivariate analysis problem should be made during the project development. In this case, either the structure and parameters expert synthesis of thin-walled engineering structures occurs, or direct construction of a discrete cloud of points for minimization taking into account constraints (for example, deflections or stresses).

The listed factors create a problem situation in mechanics and engineering. This determines relevance of the research carried out in this dissertation, which is aimed at increasing the solving efficiency for problems of design solutions substantiation for thin-walled engineering structures based on nonlinear models.

The scientific and technical task of development and implementation of methods is solved in the dissertation. It provides development and implementation of methods for strength assurance of thin-walled structures that operate in

conditions of geometric and physical nonlinearity basing on construction and use of the response functions approximations.

Methods of solid-state three-dimensional modeling and method of generalized parametric modeling of complex and complicated mechanical systems are used for parametric models creation of investigated structures; methods of continuous mechanics – for stress-deformed state analysis of thin-walled engineering structures; finite element method – for investigated structures discretization and for solving analysis tasks of investigated states and process, finite difference method – to calculate the derivative response function during implementation of algorithm for finding a rational constructive parameters combination of investigated objects.

The following scientific results were obtained during the dissertation research:

- 1) analysis and generalization of existing methods of stress-strain state analysis of mechanical engineering elements, taking into account geometric and physical deformation nonlinearities and approaches to finding reasoned solutions, are carried out;
- 2) complex of mathematical models is created for stress-strain state analysis of thin-walled elements of machines taking into account geometric and physical nonlinearities, in which a generalized parametric modeling is integrated;
- 3) methods of response function approximation in the course of research aimed at parameters validation of thin-walled mechanical engineering structures are created, as well as effective methods for finding extremum taking into account form peculiarities of response functions for nonlinear systems;
- 4) program complex for solving the tasks of rational parameters validation of thin-walled mechanical engineering structures is created and tested on the test tasks, which implements proposed mathematical models and developed approach;
- 5) the developed approach and models are applied to solve applied problems of stress-strain state analysis and structural parameters validation of thin-walled elements of real machines;
- 6) validity of obtained numerical results is evaluated by comparison with data of experimental researches;
- 7) practical recommendations are formed and results of research are implemented into production.

The scientific novelty of obtained results is to develop an approach to providing strength assurance of thin-walled structures that operate in conditions of geometric and physical material nonlinearity by substantiating the parameters with use of response surfaces approximations. New tasks were solved and following regularities were found:

1) new approach to validation of design solutions for thin-walled engineering structures with varying design, technical parameters and operating conditions is developed on the basis of minimization of approximated target function (as opposed to traditional approaches in which the actual response function is used) taking into account geometrically and physically non-linear material behavior of thin-walled structural elements, which makes it possible to more efficiently determine rational parameters of these structure;

2) method of response surface approximation in part of refining its appearance as it approaches the solution is improved, this creates conditions for reduce computation volume of response function values compared with known methods while maintaining an acceptable solution accuracy;

3) character of stress-strain state dependencies of a number of thin-walled mechanical engineering structures on the basis of design parameters is found, which is the basis of formation of response surfaces approximation in synthesis of rational solutions according to different criteria.

The developed approach gives possibility to simultaneously consider different criteria for parameters validation, including characteristics of strength, rigidity, technological and economic factors. These criteria are added into the objective function with weighted coefficients. Constraints on parameters allowable values are taken into account by adding into the objective function of penalty functions. For sensitivity evaluation of individual values to parameters variation, using of finite-difference ratios is proposed. Approximated objective function reflects global trend of decision-changing. This allows, in most cases, to find a sustainable, rational technical solution close to optimal.

The developed specialized program-model complex includes three main components: parametric models, created specially for a concrete investigated object or class of objects; program modules that operate with object data and vary the numerical model; an expert to control all research stages.

Constructed mathematical model of thin-walled machine elements stress-deformed state considering geometric and physical nonlinearities, models of response surface approximative description of different degrees of accuracy, as well as obtained numerical computations have practical application. They can be used to find rational parameters of thin-walled structures in engineering and industry, since the developed approach, in contrast to existing ones, takes into account tasks peculiarities of substantiating design solutions for thin-walled structures or elements and is adapted to production conditions. Developed approach guarantees getting inexpensive in terms of time and computer resources solution, creates the ability to automate the process of rational technical solution finding, provides sustainable insensitive to changes design solution in most cases.

The dissertation research results are of interest for implementation in research institutes, design bureaus and directly at enterprises involved in the design, manufacture and operation of thin-walled engineering products (or products containing thin-walled elements), which operate in conditions of complex loading regimes under large displacements and deformations, which significantly exceed elastic ones. These are a rolling stock of rail transport (wagons, tanks, platforms and other), military technics, quarry excavators, dumpers, reloaders etc.

Recommendations of rational design of thin-walled elements of freight cars, hulls of lightly armored vehicles, buses hulls and tractors cabins. The potential value of these developments is for elements of mining equipment, lifting and transport vehicles, military and civilian vehicles, ships, wind power plants, etc.

The program complex created was introduced into the practice of design works at JSC "Science Engineering Center of MC "RailTransHolding" (Mariupol) and the SE "V.O. Malyshev Plant" (Kharkiv). In this case, application of

theoretical approaches, mathematical and numerical models proposed in the dissertation, made it possible to more effectively solve problems of design parameters validation.

Keywords: thin-walled machine-building structure, design parameter, geometric nonlinearity, physical nonlinearity, approximation, linearization, bilinearization, response function, optimization, finite element method.

List of publications

1. Bondarenko M.A. Spetsializovani prohramno-modelni kompleksy dlia analizu fizyko-mekhanichnykh protsesiv ta syntezy parametriv bronekorpusiv lekho bronovanykh mashyn / O.V. Lytvynenko, S.T. Brul, M.O. Bondarenko, O.O. Bondarenko // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: Tezy dopovidei XXI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Ch.I – Kharkiv, NTU «KhPI», 2013. – S. 219.

2. Bondarenko M.A. Rozrobka metodiv zabezpechennia pasyvnoi bezpeky avtobusiv / M.O. Bondarenko, O.O. Bondarenko // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: Tezy dopovidei XXII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Ch.I – Kharkiv, NTU «KhPI», 2014. – S. 188.

3. Bondarenko M. O. Analiz konstruktsii zaliznychnykh vahoniv i metodiv yikh rozrakhunku na mitsnist / M.O. Bondarenko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2014. – №14. – S. 16–22.

4. Bondarenko M.A. Eksperymentalnie yssledovanyia hruzovoho vahona / A.D. Chepurnoi, A.V. Lytvynenko, A.N. Baranov, R.I. Sheychenko, M.A. Bondarenko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2014. – №22. – S. 44–61.

5. Bondarenko M. O. Doslidzhennia napruzhenno-deformovanoho stanu karkasu kuzova avtobusa v umovakh modeliuвання yoho testovoho

vyprobuvannia na pasyvnu bezpechnist / M. O. Bondarenko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichniyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2014. – №29. – S. 13–17.

6. Bondarenko M.A. Metod lynearyzatsyy poverkhnosty otklyka v zadache obosnovanyia proektnikh parametrov tonkostennikh elementov mashynostroytelnykh konstruktsiyi / A.V. Lytvynenko, R.I. Sheychenko, R.V. Graborov, M.A. Bondarenko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichniyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2014. – № 31. – S. 88–99.

7. Bondarenko M.A. Bylynearyzatsyia poverkhnosty otklyka v optymizatsyionnykh yssledovanyiakh tonkostennikh elementov mashynostroytelnykh konstruktsiyi / M.A. Bondarenko, R.I. Sheychenko, R.V. Graborov, D.H. Shynkin, D.V. Kyrychuk // Mekhanika ta mashynobuduvannia. – 2014. – № 1. – S. 18–23.

8. Chuban (Bondarenko) M.O. Vplyv proektno-tekhnolohichnykh parametriv na mitsnist ta dynamichni kharakterystyky tonkostinnykh konstruktsii / O.V. Martynenko, O.V. Veretelnik, A.Iu. Tanchenko, M.O. Chuban, O.V. Lytvynenko // Problemni pytannia rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniki: Tezy dopovidei VI mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. – Kyiv, Vyd. dim Dmytra Buraho, 2015. – S. 154–155.

9. Chuban (Bondarenko) M. O. Vdoskonalennia metodiv doslidzhennia kuzoviv vahoniv pid diieiu ekspluatatsiinykh navantazhen / M.O. Chuban, R.I. Sheychenko, A.V. Sereda, D.H. Shynkin // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: Tezy dopovidei XXIII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Ch. I – Kharkiv, NTU «KhPI», 2015. – S. 234.

10. Bondarenko M. A. Khodovie prochnostnie y dynamycheskye yspitanyia vahona-platformi / A.D. Chepurnoi, A.V. Lytvynenko, R.I. Sheychenko, R.V. Graborov, M.A. Bondarenko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho

universytetu «Kharkivskyi politekhnichniyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2015. – №31. – S. 111–128.

11. Chuban (Bondarenko) M.A. Approksymatsyia poverkhnosty otklyka dlia yspolzovanyia v protsesse parametrycheskoho synteza mashynostroytelnykh konstruktsyi / M.A. Chuban // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichniyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2015. – №43. – S. 161–164.

12. Chuban (Bondarenko) M.A. Modely approksymatsyy poverkhnosty otklyka v optymyzatsyionnykh yssledovaniakh mashynostroytelnykh konstruktsyi / M.A. Chuban, R.I. Sheychenko, R.V. Graborov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichniyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2015. – № 62. – S. 46–51.

13. Chuban (Bondarenko) M.A. Metodolohycheskye osnovy rasshyrennikh prochnostnykh y dynamycheskykh yssledovanyi pry yspitaniakh dlynnobaznykh platform / V.I. Senko, S.V. Makeev, A.D. Chepurnoi, A.V. Lytvynenko, R.I. Sheychenko, R.V. Hraborov, N.A. Tkachuk, M.A. Chuban // Mekhanika ta mashynobuduvannia. – 2015. – №1. – S. 67–81.

14. Chuban (Bondarenko) M.A. Vplyv variivannia proektnykh parametriv na kharakterystyky mitsnosti ta zhorstkosti korpusiv lehkobronovanykh mashyn / M.A. Chuban, A.M. Malakei, R.I. Sheychenko, O.O. Atroshenko, I.V. Mazur, V.V. Durachenko // Naukove zabezpechennia sluzhbovo-boiovoi diialnosti Natsionalnoi hvardii Ukrainy: Tezy dopovidei VII naukovo-praktychnoi konferentsii. – Kharkiv, NANHU, 2016. – S. 155–156.

15. Chuban (Bondarenko) M.A. Doslidzhennia vplyvu proektnykh parametriv na kharakterystyky mitsnosti ta zhorstkosti korpusiv lehkobronovanykh mashyn / M.O. Chuban, A.M. Malakei, V.V. Durachenko, O.O. Atroshenko, I.V. Mazur // Perspektyvy rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky Sukhoputnykh viisk: Tezy dopovidei mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. – Lviv, NASV, 2016. – S. 66–67.

16. Chuban (Bondarenko) M.A. Obosnovanye proektno-tehnolohycheskykh reshenyi pry proektyrovanyy unnovatsyonnykh obraztsov podvyzhnoho sostava zheleznykh doroh / A.D. Chepurnoi, A.V. Lytvynenko, R.I. Sheychenko, R.V. Graborov, M.A. Chuban, N.A. Tkachuk // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: Tezy dopovidei XXIV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Ch. I – Kharkiv, NTU «KhPI», 2016. – S. 234.

17. Chuban (Bondarenko) M. A. Ysprytanyia vahona-platformy unyversalnoi / V.Y. Senko, S.V. Makeev, A.D. Chepurnoi, R.I. Sheychenko, A.V. Lytvynenko, R.V. Graborov, N.A. Tkachuk, M.A. Chuban // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2016. – №12. – S. 71–83.

18. Chuban (Bondarenko) M.A. Vlyianye varyrovanyia proektnykh parametrov na prochnostnye y zhestkostnye kharakterystyky korpusov lehkobronyrovannykh mashyn / M.A. Chuban, R.I. Sheychenko, R.V. Graborov, A.V. Grabovskyi, A.Iu. Tanchenko, N.A. Tkachuk // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2016. – №23. – S. 149–155.

19. Chuban (Bondarenko) M. A. Funktsyonalnie yspitanyia perspektyvnoho vahona-tsystemni dlia perevozky rasplavlennoi seri modely 15-9544 / V.V. Galov, S.B. Komysarov, R.V. Graborov, R.I. Sheychenko, M.A. Chuban // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2016. – №39. – S. 50–55.

20. Bondarenko M.O. Metody optymizatsii iz zastosuvanniam poverkhon vidhuku, adaptovani do rozviazannia zadach analizu ta syntezu konstruktyvnykh parametrov tonkostinnykh mashynobudivnykh konstruksii / M.O. Bondarenko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2016. – № 42. – S. 22–28.

21. Pat. na korysnu model UA 115987 U, MPK B61D 5/00. Zaliznychnyi vahon-tssystema / S.O. Shpak, A.D. Chepurnyi, O.V. Lytvynenko, V.S. Mariniuk, R.I. Sheychenko, O.V. Moroziuk, D.V. Stepanov, R.V. Graborov, M.O.Chuban; Vlasnyk OOO UK "ReilTransKholdinh", zaiavl. 01.08.2016; opubl. 10.05.2017, Biul. №9.

22. Bondarenko M.A. Obgruntuvannia struktury ta parametriv bronekorpusiv vitchyznianskykh lehkobronovanykh mashyn za kryteriiamy zakhyshchenosti / A.Iu. Vasyliiev, D.S. Mukhin, S.V. Kutsenko, M.O. Bondarenko // Perspektyvy rozvytku ozbroiennia ta viiskovoi tekhniky Sukhoputnykh viisk: Tezy dopovidei mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. – Lviv, NASV, 2017. – S. 22.

23. Bondarenko M.A. Kompiuterne modeliuvannia u protsesi obgruntuvannia tekhnichnykh rishen dlia innovatsiinykh vyrobiv / M.O. Bondarenko, A.D. Chepurnyi, O.V. Lytvynenko, Yu.B. Gusiev, R.I. Sheychenko, R.V. Graborov // Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: Tezy dopovidei XXV mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, Ch. I. – Kharkiv, NTU «KhPI», 2017. – S. 167.

26. Bondarenko M. A. Kompiuternoe modelyrovanye v protsesse obosnovannia tekhnicheskyykh reshenyi pry proektyrovanny ynnovatsyonnikh yzdelyi / Yu.B. Gusev, R.I. Sheychenko, R.V. Hraborov, M.A. Bondarenko, A.Yu. Tanchenko, N.A. Tkachuk, A.V. Nabokov, Lunev E.O. // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2017. – № 5. – S. 95–107.

27. Bondarenko M.A. Chyslennoe modelyrovanye napriazhenno-deformyrovannoho sostoianiya ynnovatsyonnikh tonkostennikh mashynostroytelnykh konstruktsyi / R.I. Sheychenko, N.A. Tkachuk, M.A. Bondarenko, E.A. Lunev // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskyi politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2017. – № 12. – S. 137–145.

28. Bondarenko M. A. Eksperymentalnie yssledovanyia tonkostennikh konstruktsyi / Yu.B. Gusev, R.I. Sheychenko, N.A. Tkachuk, A.Yu. Tanchenko, A.V. Hrabovskiy, A.V. Nabokov, M.A. Bondarenko, A.M. Golovyn, V.V. Shemanskaia // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2017. – № 14. – S. 140–155.

29. Bondarenko M.O. Chyslovi doslidzhennia vantazhnoho vahonu / A.D. Chepurnyi, R.I. Sheychenko, R.V. Graborov, M.A. Tkachuk, M.O. Bondarenko, A.V. Grabovskiy, Ye.O. Lunov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2017. – № 23. – S. 47–55.

30. Bondarenko M.O. Raschetno-eksperymentalnaia veryfykatsyia dynamycheskoi modely korpusa bronetransporetera / M.A. Bondarenko, E.V. Peleshko, A.Iu. Vasyliiev, A.V. Hrabovskiy, R.V. Graborov, Yu.V. Veretelnik, V.V. Posokhov // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2017. – № 32. – S. 5–13.

31. Bondarenko M. A. Reshenye zadach analiza y synteza slozhnikh prostranstvennikh tonkostennikh konstruktsyi / A.D. Chepurnoy, V.I. Senko, S.V. Makeev, A.V. Lytvynenko, R.I. Sheychenko, R.V. Graborov, N.A. Tkachuk, M.A. Bondarenko // Vestnyk Belorusskoho hosudarstvennoho unyversyteta transporta. – Homel: BHUT. – 2017. – №2. – S. 152–162.

32. Bondarenko M. Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation / M. Tkachuk, M. Bondarenko, A. Grabovskiy, A. Vasiliev, R. Sheychenko, R. Graborov, V. Posohov, E. Lunyov, A. Nabokov // Skhidno-Yevropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii. – Kharkiv: UDAZT. – 2018. – 1/7 (91) – S. 18–29 (Scopus).

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
1. Методи розв’язання задач аналізу та синтезу складних просторових тонкостінних конструкцій.....	13
1.1. Методи аналізу напружено-деформованого стану тонкостінних конструкцій з урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей	15
1.2. Методи оптимізації з використанням поверхонь відгуку	21
1.3. Чисельна реалізація методів оптимізації у сучасних програмних комплексах.....	28
Висновки до розділу 1. Постановка задач досліджень	32
2. Математичне моделювання напружено-деформованого стану і обґрунтування параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій.....	34
2.1. Параметризація моделей машинобудівних конструкцій для розв’язання задач аналізу і синтезу	35
2.2. Основні співвідношення для дослідження напружено-деформованого стану машинобудівних конструкцій з урахуванням фізичної та геометричної нелінійностей.....	40
2.3. Побудування функцій відгуку	57
Висновки до розділу 2.....	60
3. Чисельна реалізація методів обґрунтування конструктивних параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій.....	62
3.1. Апроксимація функцій відгуку оцінюваних характеристик досліджуваних об’єктів	63
3.2. Обґрунтування варійованих параметрів у ході проектних досліджень.....	79

3.3. Розробка програмно-модельного комплексу.....	92
Висновки до розділу 3.....	94
4. Розв’язання прикладних задач.....	96
4.1. Обґрунтування конструктивних рішень для кузова пасажирського автобуса за критеріями міцності та норм безпеки.....	97
4.2. Побудова поверхні відгуку в ході проведення пошуку раціональних параметрів силової структури вантажного напіввагона.....	104
4.3. Обґрунтування проектних рішень при визначенні параметрів каркаса кабіни трактора.....	109
4.4. Підвищення характеристик міцності корпусу легкоброньованої машини БТР-80.....	112
4.5. Обґрунтування раціональних конструктивних параметрів для корпусу багатоцільового тягача	117
Висновки до розділу 4.....	120
5. Розрахунково-експериментальні дослідження та впровадження у виробництво.....	123
5.1. Розрахунково-експериментальні дослідження динамічних характеристик корпусів легкоброньованих машин	123
5.2. Розрахунково-експериментальні дослідження дослідного зразка корпусу БТР-3Е.....	131
5.3. Розрахунково-експериментальні дослідження вантажного вагона.....	132
5.4. Впровадження результатів досліджень.....	151
Висновки до розділу 5.....	152
ВИСНОВКИ.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	157
ДОДАТКИ.....	178