

Динаміка та міцність машин

УДК 539.3

Ткачук М.А., д-р техн. наук; Бондаренко М.О., канд. техн. наук; Шейченко Р.І., Грабовський А.В., канд. техн. наук; Ткачук М.М., канд. техн. наук; Гусев Ю.Б., канд. техн. наук; Набоков А.В.

ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ У ХОДІ ПРОЕКТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІННОВАЦІЙНИХ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ

Вступ. У різних галузях промисловості натеper розширюється використання інноваційних виробів, які характеризуються істотно більш високим рівнем технічних і економічних характеристик. Зокрема, значну частину серед них займають тонкостінні машинобудівні конструкції (цистерни, вагони-платформи, крани, перевантажувачі, автомобілі, судна, літаки тощо). Інноваційні конструкції мають низку специфічних вимог за режимами експлуатації, особливі вимоги до міцності та довговічності роботи.

Спонукальними мотивами для розробки інноваційних виробів у багатьох галузях промисловості є вичерпання можливостей екстенсивного зростання, тобто за рахунок розширення кількості виробів із традиційними технічними рішеннями; вичерпання можливостей удосконалення конструкцій на основі роздільного досягнення необхідних рівнів різних компонент технічних характеристик без ув'язки з іншими компонентами; збільшення кількості аварій традиційних виробів у зв'язку з інтенсифікацією експлуатаційних режимів; наявність природних обмежень на деякі характеристики, що ускладнює підвищення навантажувальної здатності виробу; економічні міркування, які в умовах профіциту тих чи інших виробів вимагають не збільшення кількості виробів, що випускаються, а підвищення їхніх функціональних властивостей, тобто створення нових конструкцій на базі удосконалених технічних рішень. Це формує протиріччя між можливостями науки та потребами практики у відповідних моделях та методах, які дають можливість обґрунтувати раціональні технічні рішення сучасних інноваційних машинобудівних конструкцій за критеріями міцності, довговічності та техніко-економічними критеріями.

Аналіз стану питання та постановка задачі. Аналіз літературних джерел, нормативних документів і даних практичної експлуатації тонкостінних машинобудівних конструкцій (ТСМБК) дає основу для наступних висновків.

1. Інтенсивні, різко збільшені рівні експлуатаційних навантажень, диктують жорсткіші вимоги до інноваційних виробів порівняно із чинними нормативними вимогами.

2. При проектуванні нових інноваційних ТСМБК множина критеріїв і обмежень, що задіяні у процесі обґрунтування їхніх технічних рішень, різко зростає порівняно з традиційними конструкціями. Відповідно, існуючі методики розрахунку проектних параметрів, які раніше успішно застосовувалися упродовж десятиліть, стають неефективними. Вони призводять або до неконкурентних варіантів виробів, або – до незадовільних за сучасними вимогами.

3. Обмеження і вимоги, які закладені у норми, що діють для багатьох типів виробів, і стандарти, є обов'язковими для виконання незалежно від їх адекватності.

На теперішній час проектується і виготовляється велика кількість інноваційних тонкостінних машинобудівних конструкцій, що перебувають в умовах експлуатації, які сильно змінюються залежно від різних чинників. При цьому важливо, що різні фактори впливають на інтенсивність навантажень, на навантажувальну здатність і довговічність різним чином. Так, при дії зусиль від вітрового навантаження виходить стохастичний розподіл аеродинамічних зусиль. Такий же характер носить і розподіл навантажень, що виникають при русі транспортних засобів автомобільними дорогами та залізничними коліями, хоча їх характеристики і природа виникнення відмінні від вище згаданих. Ті ж аргументи можна віднести і до таких навантажень як технологічні, контактні, сейсмічні тощо.

© М.А. Ткачук, 2019

Існуюча практика розрахунку машинобудівних конструкцій у цьому випадку полягає у визначенні декількох типів характерних навантажень: екстремальних, номінальних, таких, що змінюються в певному діапазоні за деяким законом розподілу тощо. Далі розрахунок проводиться за кожним типом режимів навантаження зі встановленням того чи іншого критерію і обмеження (за міцністю, жорсткістю, масою тощо).

Основним недоліком перерахованих підходів є прив'язка до того чи іншого набору конкретних значень параметрів. Відволікаючись від ступеня обґрунтованості методики, що застосовується для розрахунку фізико-механічних процесів і станів, саме чинник неваріативності параметрів слід прийняти найбільш значною перешкодою для процедури синтезу раціональних параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій, що проектуються. Це пояснюється тим, що варіювання одних і тих же параметрів по-різному позначається на зміні їхніх оптимальних значень за різними критеріями і обмеженнями (залежно від типу розрахунку, режиму, процесу тощо). Враховуючи на додаток також і ті обставини, що результуючі поверхні відгуку в загальному випадку описуються нелінійними функціями параметрів, отримуємо у підсумку дуже складну багаторівневу задачу синтезу. У свою чергу це різко знижує ефективність розв'язання задач обґрунтування раціональних параметрів тонкостінних машинобудівних конструкцій. Цей недолік ще більше посилюється тими обставинами, що самі критерії, обмеження, структура досліджуваної конструкції є змінними вже у ході виконання проектних розробок. У результаті отримані розв'язки задач синтезу втрачають своє значення з практичної точки зору, а, значить, безрезультатно витрачаються обчислювальні, фінансові та часові ресурси.

Також що стосується задач синтезу, то вбудовані у САЕ модулі мають у розпорядженні можливості оперування тільки із параметрами та характеристиками, які фігурують та моделюються саме у них. Спроба залучити до множини критеріїв чи обмежень чинники зовнішнього походження стикається із перепонами. Проте ці чинники (економічні, технологічні, виробничі, екологічні тощо) набувають усе більшого значення. Відтак їх урахування стає не просто бажаним, а обов'язковим, особливо для інноваційних машинобудівних конструкцій. У роботі ставиться за мету розробка підходу, що базується на вказаних принципах, націлений на розв'язання прикладних задач обґрунтування параметрів для інноваційних тонкостінних конструкцій.

Підходи до обґрунтування технічних рішень і параметрів інноваційних тонкостінних машинобудівних конструкцій. Для усунення зазначеного протиріччя пропонується кілька шляхів. Найпростіший, але витратний, полягає в попередньому дослідженні якомога більшої кількості можливих варіантів проектних рішень і конструктивних параметрів. Ця задача в силу лавиноподібного зростання масиву інформації часто не під силу навіть за наявності великих обчислювальних ресурсів. Виправданим такий шлях [1–4] є або на перших етапах проектування для вибору концептуальних рішень, або для конструкцій із мінімальною кількістю варійованих параметрів.

Другий із можливих шляхів передбачає застосування для розв'язання поставленої задачі відомих або нових і удосконалених методів оптимізації [5–7]. Алгоритми оптимізації, що їх реалізують, на теперішній час вбудовуються у сучасні пакети скінченно-елементного аналізу [<http://www.mssoftware.com>, <http://www.ansys.com>] і для деяких типів конструкцій дають задовільні результати. Однак, як зазначалося вище, при багаторазовій зміні критеріальних функцій одержані результати можуть різко змінюватися, наприклад, стрибкоподібно при безперервному варіюванні тих чи інших параметрів. Це може бути викликано як видом цільової функції, так і обмежень, а також особливостями реалізованого фізико-механічного процесу або стану. Крім того, додатковою проблемою в цьому випадку є імплементація критеріальних функцій, які відрізняються від традиційно присутніх в інженерних розрахунках (наприклад, економічних, технологічних і тому подібне).

До інноваційних конструкцій пред'являються не лише підвищені вимоги за характеристиками міцності, жорсткості і динамічними характеристиками, але і сама множина таких вимог надзвичайно зростає. У цьому сенсі різко розширюється і множина задач аналізу (причому різнотипних, а також у багатьох випадках зв'язаних між собою), і множина критеріїв, обмежень при розв'язанні задач синтезу. Більш того, у таких умовах побудова традиційних оптимізаційних процедур не результативна. Більш доречні різні компромісні підходи із урахуванням варійованості та мінливості початкових даних, результуючих процесів, станів і характеристик. Це накладає відбиток і на самі ранні етапи проектування: вже початково необхідно закладати такі технічні рішення, які створять стартові переваги з точки зору інноваційності, а також потенційні можливості виконання усіх висунутих обмежень за рахунок відповідного параметричного синтезу. Іншими словами, на етапі проекту спочатку вирішується проблема принципового технічного рішення, тобто обґрунтування структури, а потім – поліпшення характеристик за рахунок зміни параметрів.

Виходячи із цих міркувань, дуже важливим є обґрунтування первинних технічних рішень виробу. Це особливо справедливо для інноваційних конструкцій. Більш того, на відміну від традиційних підходів, орієнтованих на досвід попередніх рішень, у цьому випадку результативним є якраз відступ від них, альтернативи, тобто по-справжньому інноваційні технічні рішення. У багатьох випадках для пошуку рішення можуть бути застосовані евристичні підходи, проте, з урахуванням позитивного накопиченого досвіду аналогів і попередніх рішень, у тому числі – конкретних варіантів.

На сьогодні склалася теоретична база розв'язування задач подібного типу. Так, на відміну від класичних робіт із оптимізації [5, 8, 9], пропонується орієнтуватися на метод узагальненого параметричного моделювання [10]. При його застосуванні як варійовані можуть виступати і традиційні числові параметри, структури і розподіли. Відповідно, цей метод адаптується і до нечіткої множини варійованих параметрів, критеріїв і обмежень. Крім того, він пристосований до розвитку для різноманітних конструкцій. Це було здійснено, зокрема, у роботах [10–13] для тонкостінних конструкцій. У цих роботах продемонстровано, що при варіюванні товщини окремих елементів чутливість до зміни характеристик, зокрема, рівня напружень, можна лінеаризувати. У той же час, запропоновані в цих роботах підходи були в основному поширені на задачі аналізу, а не на задачі синтезу. Такі лінеаризовані залежності справедливі тільки для певного діапазону варіювання товщини, тоді як логіка проектних досліджень вимагає ширших діапазонів. У зв'язку з цим пропонується залучати до розв'язання задачі поверхні відгуку.

Таким чином, ставиться мета розширити запропоновані підходи до задачі обґрунтування проектно-технологічних параметрів ТСМБК. Зокрема, ілюстрація здійснюється на прикладі вантажних вагонів.

Застосування запропонованого підходу до розв'язання прикладних задач. *Обґрунтування раціональних параметрів рами вагона-цистерни для перевезення технічної сірки.* У руслі описаного загального підходу процес забезпечення раціональних технічних рішень необхідно провести у два етапи. На першому етапі, спираючись на досвід експертів, здійснюється обґрунтування структури, а на другому – конструктивних параметрів. Як початковий варіант інноваційного проектного виробу обрано вагон-цистерну для перевезення сірки розплавленої.

Цей вагон-цистерна у традиційному варіанті [<http://uralvagonzavod.ru>] має задовільні технічні характеристики. Проте при створенні інноваційних конструкцій було звернено увагу, що у сучасному вагонобудуванні склалася тенденція збільшення навантажувальної здатності, зокрема підвищення навантаження на вісь з 23,5 т до 25,0 т. Перехід на осьове навантаження 25 т/вісь, що є одним з критеріїв інноваційного рухомого складу,

порівняно з осьовим навантаженням 23,5 т дає прибавку до маси бруutto 6 т. З урахуванням коефіцієнта тари вагону очікувана прибавка вантажопідйомності складає 3,5÷4,5 т.

На основі евристичних підходів у інноваційному вагоні-цистерні використані технічні рішення, які дають можливість зменшити трудомісткість, масу тари, складність виготовлення, витрати на експлуатацію, збільшивши при цьому надійність і міцність конструкції [14, 15], а саме: кріплення кожухів напівавтоматичним методом, поліровка зовнішнього кожуха, установка композитних днищ, введено підігрівання зливної труби і арматурного відсіку, дзеркальна внутрішня поверхня кожуха, який підігріває, відбиває довгохвильову частину спектру у бік котла, наявність теплових екранів в системі розігрівання усуває місцеве перегрівання нижньої частини котла, забезпечує рівномірне розігрівання і виключає викривлення обічайки котла і сублимацію продукту. Таким чином, виконавши вимоги щодо перевезення вантажу, було створено передумови до розв'язання основної задачі – обґрунтування раціональних параметрів рами вагону, які б забезпечили необхідний виґраш за масою конструкції.

Поставлена задача обґрунтування параметрів для вагону-цистерни за розрахунковим режимом навантаження при стисканні. На рис 1 наведені задані крайові умови та навантаження, що включають дію вертикальних та поздовжніх сил, внутрішній робочий тиск у котлі та розпірне навантаження від транспортованого вантажу (у розглянутому випадку – це технологічна сірчана кислота), рис.2. Задані закріплення обмежують рух конструкції вздовж осей OY, OZ та обертання навколо осей OZ та OX.

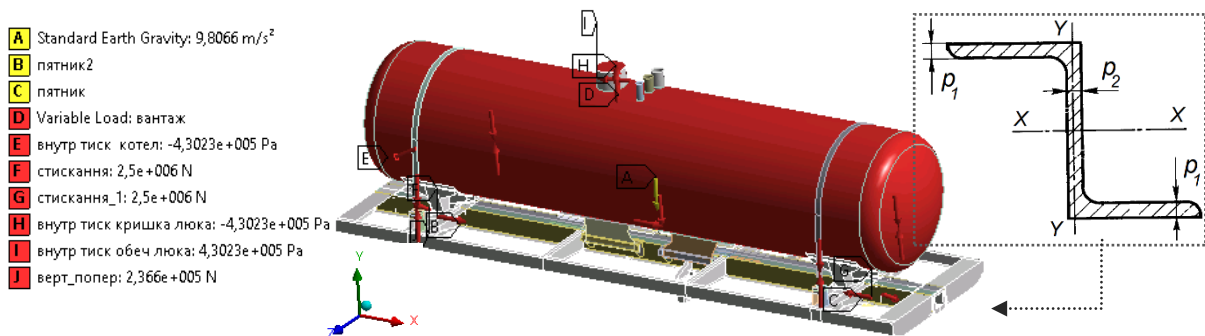


Рисунок 1 – Схема накладання обмежень та навантажень та гідростатичне навантаження від вантажу

Варійовані параметри – товщини полук Z-профілів рами, $p_1=0,011\div 0,019$ м та $p_2=0,01\div 0,018$ м, рис. 1. Обґрунтування параметрів виконувалося з метою мінімізації максимальних еквівалентних напружень при бажаній масі конструкції 15 т. На рис. 2 поверхня С відображає відповідне обмеження. Рисунок 3 ілюструє пошук проектного рішення на поверхні відгуку максимальних еквівалентних напружень, що задовольняє вимозі мінімізації та виконує обмеження на масу конструкції.

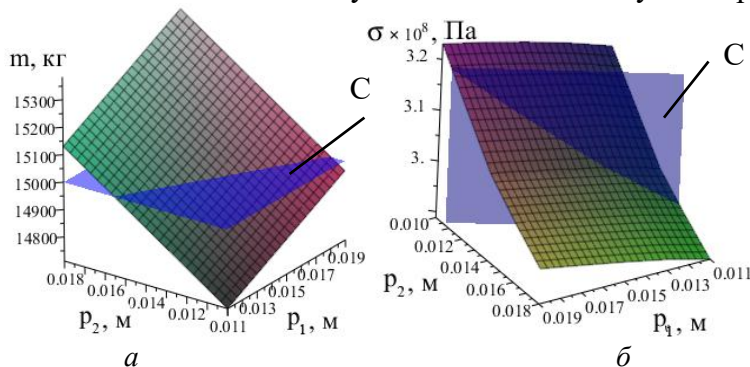


Рисунок 2 – Поверхні відгуку, побудовані для обґрунтування проектних рішень: а – маса конструкції; б – максимальні еквівалентні напруження

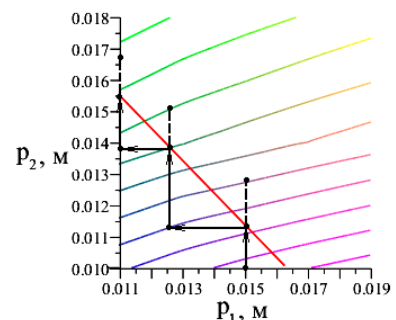


Рисунок 3 – Траекторія пошуку проектного рішення

Отриманий розв’язок, значення параметрів $p_1 = 0.011$, $p_2 = 0.0155$ коригується згідно існуючих сортamentів. У результаті знаходимо рішення $p_1 = 0.011$, $p_2 = 0.0155$ при значеннях маси $14,5 \cdot 10^3$ кг та напружень 290 МПа, які не перевищують допустиме значення напружень для розглянутого елемента конструкції, рис.4. Таким чином, запропонований підхід дає можливість створити проект інноваційного вагону-цистерни із підвищеними параметрами ефективності теплоізоляції, вантажопідйомності, коефіцієнту тари.

Для додаткового підтвердження ефективності розроблених підходів паралельно було здійснено розв’язання задачі у середовищі ANSYS Workbench із застосуванням методу Screening (розв’язок отримано за 1000 ітерацій). Із наведених на рис. 5–8 ілюстрацій видно, що одержані розв’язки практично співпадають.

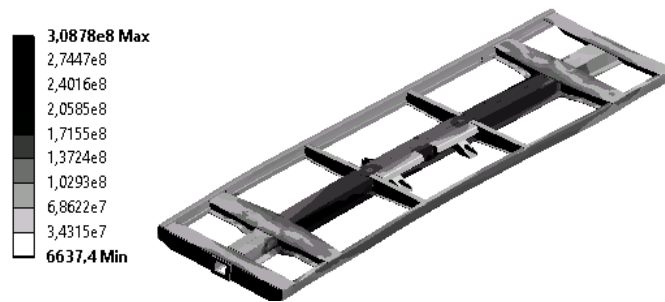


Рисунок 4 – Розподіл напружень у конструкції рами вагону-цистерни із рекомендованими параметрами

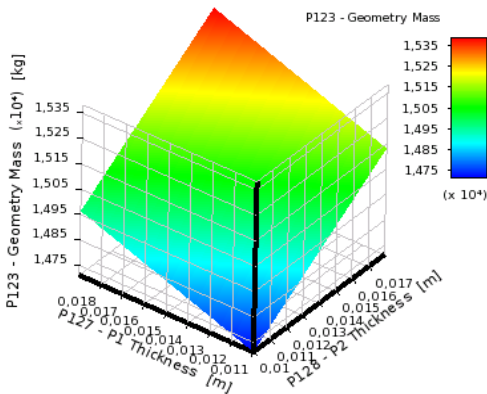


Рисунок 5 – Поверхня відгуку за масою конструкції, побудована в ANSYS Workbench

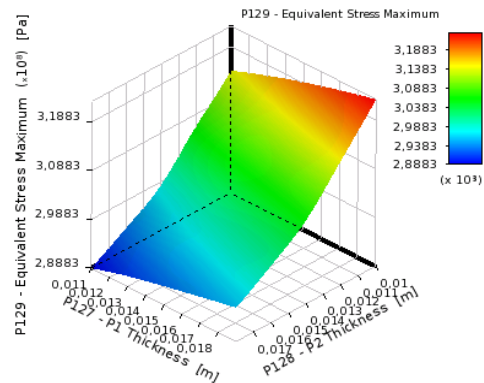


Рисунок 6 – Поверхня відгуку за максимальними еквівалентними напруженнями, побудована в ANSYS Workbench

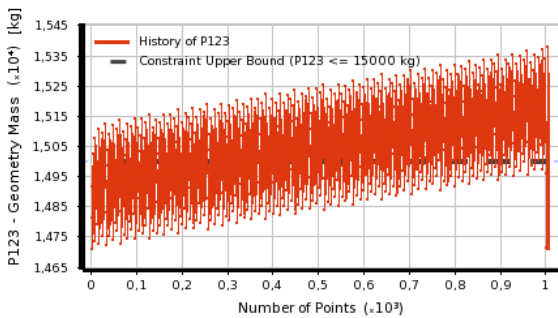


Рисунок 7 – Траекторія пошуку розв’язку у модулі оптимізації ANSYS Workbench

	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
P127 - P1 Thickness (m)	0,011172	0,01114	0,01306
P128 - P2 Thickness (m)	0,015254	0,014254	0,01402
P123 - Geometry Mass (kg)	★ ★ ★ 14992	★ ★ ★ 14939	★ ★ ★ 14987
P129 - Equivalent Stress Maximum (Pa)	★ ★ ★ 2,9504E+08	★ 2,9752E+08	★ 3,0057E+08

Рисунок 8 – Розв’язки, знайдені в ANSYS Workbench

Обґрунтування раціональних параметрів рами вагона-платформи універсальної. Аналогічна задача обґрунтування параметрів рами ставилася для вагона-платформи. Ставилася задача обґрунтування параметрів вагона платформи під дією вертикальних сил від двох 20-ти футових контейнерів, рис. 9. Така схема навантаження уже розглядалася у роботі [14]. Варійовані параметри – товщини елементів хребтової балки, $p_1=0,0065\div 0,0155$ м та $p_2=0,0095\div 0,0245$ м, рис. 9. Розв’язок відшукувався з метою зниження маси конструкції при виконанні умови не перевищити допустимі напруження для складових елементів платформи. На рисунку 10 наведені побудовані поверхні відгуку, аналогічні випадку для вагона-цистерни (точка А – шуканий розв’язок).

Отриманий розв’язок, значення параметрів $p_1=0.011$, $p_2=0.0155$ (при значеннях маси 7,1 т та напружень 147 МПа, які не перевищують допустиме значення напружень для розглянутого елемента конструкції) коригується згідно існуючих сортаментів. На рис. 11 – розподіл еквівалентних напружень у конструкції рами вагона-платформи із рекомендованими параметрами.

Розв’язок задачі параметричної оптимізації, одержаний із використанням програмного комплексу ANSYS Workbench, наведено на рис. 12–15. Бачимо невелике відхилення отриманих результатів, що складає 3,5%.

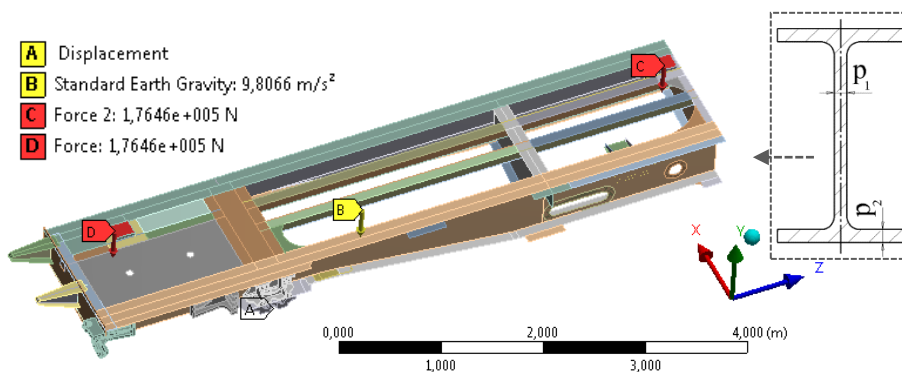


Рисунок 9 – Розрахункова модель (1/4 вагона) та змінювані параметри елемента хребтової балки вагона-платформи

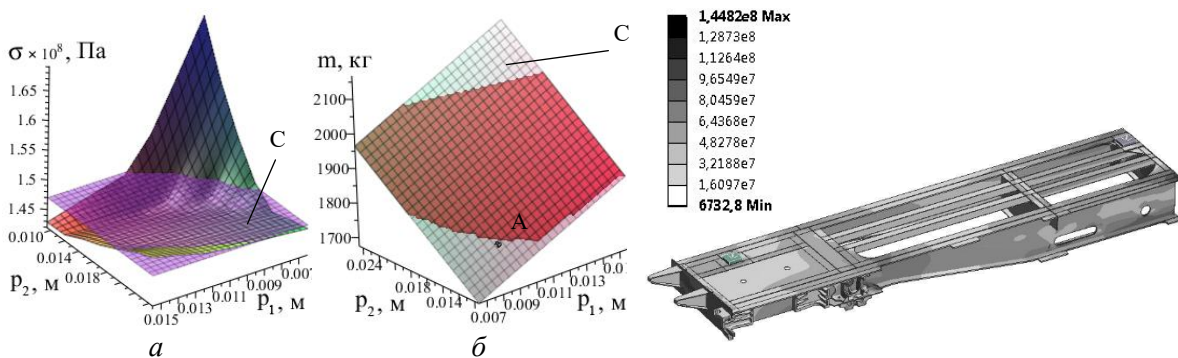


Рисунок 11 – Розподіл максимальних еквівалентних напружень, МПа

Рисунок 10 – Поверхні відгуку на фоні обмежень, побудовані для подальшого обґрунтування проектних рішень: а – маса конструкції; б – максимальні еквівалентні напруження

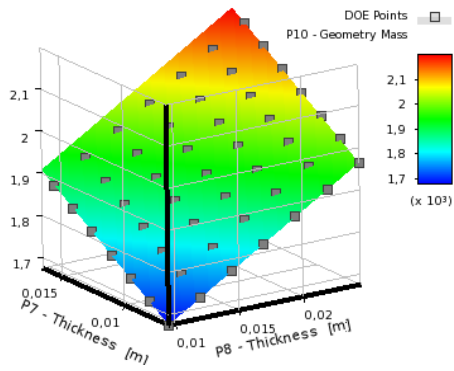


Рисунок 12 – Поверхня відгуку за масою конструкції (кг), побудована в ANSYS Workbench

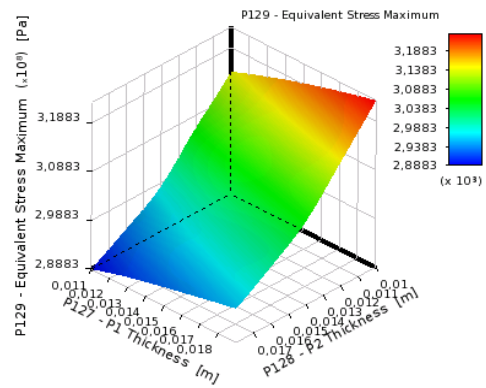


Рисунок 13 – Поверхня відгуку за максимальними еквівалентними напруженнями, побудована в ANSYS Workbench

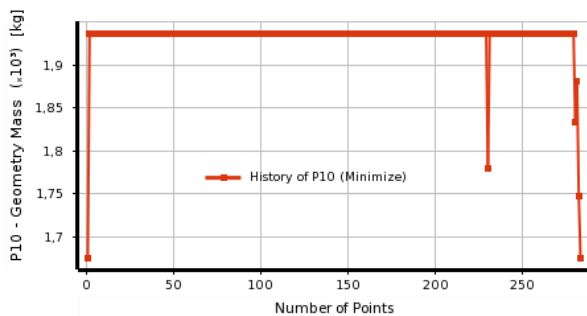


Рисунок 14 – Траекторія пошуку розв'язку у модулі оптимізації в ANSYS Workbench

	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
P7 - Thickness (m)	0,0095147	0,010428	0,0115
P8 - Thickness (m)	0,014022	0,015392	0,017
P9 - Thickness (m)	0,014022	0,015392	0,017
P4 - Equivalent Stress (Pa)	★ ★ ★ 1,4433E+08	★ ★ ★ 1,4384E+08	★ ★ ★ 1,4463E+08
P10 - Geometry Mass (kg)	★ 1832,9	★ 1880,6	— 1936,6

Рисунок 15 – Розв'язки, знайдені в ANSYS Workbench

Таким чином, підтверджена ефективність розроблених методів та алгоритмів. Це дає можливість стверджувати про застосовність розробленого підходу для розв'язання інших задач обґрунтування проектних рішень, залучаючи далі додаткові специфічні для об'єктів досліджень вимоги та чинники.

Обґрунтування раціональних параметрів крана-перевантажувача. Розроблений та розвинений у роботах [14, 15] підхід був застосований для визначення раціональних параметрів великогабаритного крана-перевантажувача.

Традиційне компоновання мостового крану-перевантажувача (рис. 16) припускає наявність масивної основної балки, якою переміщається візок грейфера разом з вантажем, що транспортується. Ця балка є, як правило, тонкостінною коробчастою багатосекційною конструкцією. Для її зміцнення і посилення над балкою створюється шпренгельна система – сукупність стійок і розкосів, що утворюють просторову (також тонкостінну) рамну конструкцію. Основна балка і шпренгельна система спільно утворюють верхню частину конструкції крану-перевантажувача, яка, в основному, визначає міцність, навантажувальну здатність, властивості деформування і довговічність виробу в цілому. Таким чином, при розробці інноваційних кранів-перевантажувачів основну увагу слід зосередити на обґрунтуванні проектних параметрів силових елементів надбудови.

У руслі загального підходу, який описано вище, на першому етапі досліджень, спираючись на роботи [11–13], здійснюється обґрунтування структури, а на другому – конструктивних параметрів силових елементів надбудови крану-перевантажувача. Як початковий варіант інноваційного проектного виробу обрано кран-перевантажувач фірми TAKRAF. Схема силових елементів мостового крану-перевантажувача фірми TAKRAF наведена на рис. 16, а. Він має задовільні технічні характеристики. Проте при створенні інноваційних конструкцій було звернено увагу на певний дисбаланс [15]:

шпренгельна система, по-перше, досить податлива, а по-друге, – недостатньо навантажена.



Рисунок 16 – Варіанти конструктивного виконання надбудови кранів-перевантажувачів:
a – традиційний; *б* – інноваційний

У зв'язку з цим на основі евристичних підходів запропоновано іншу структуру шпренгельної системи [14, 16] (див. рис. 16, *б*). Це призводить до істотного посилення конструкції [16] (рис. 17). Таким чином, було створено передумови до розв'язання основної задачі – обґрунтування раціональних параметрів усієї верхньої надбудови.

На верхню надбудову поширюються жорсткі вимоги із міцності і жорсткості. Так, вимагається, щоб стріла прогину моста крану-перевантажувача не перевищувала $1/700$ його довжини. Крім того, потрібно дотримання міцності елементів верхньої надбудови як за умовою неперевищення (із запасом) границі текучості матеріалу (при дії підвищених навантажень), так і границі витривалості (при дії багаточислових навантажень).

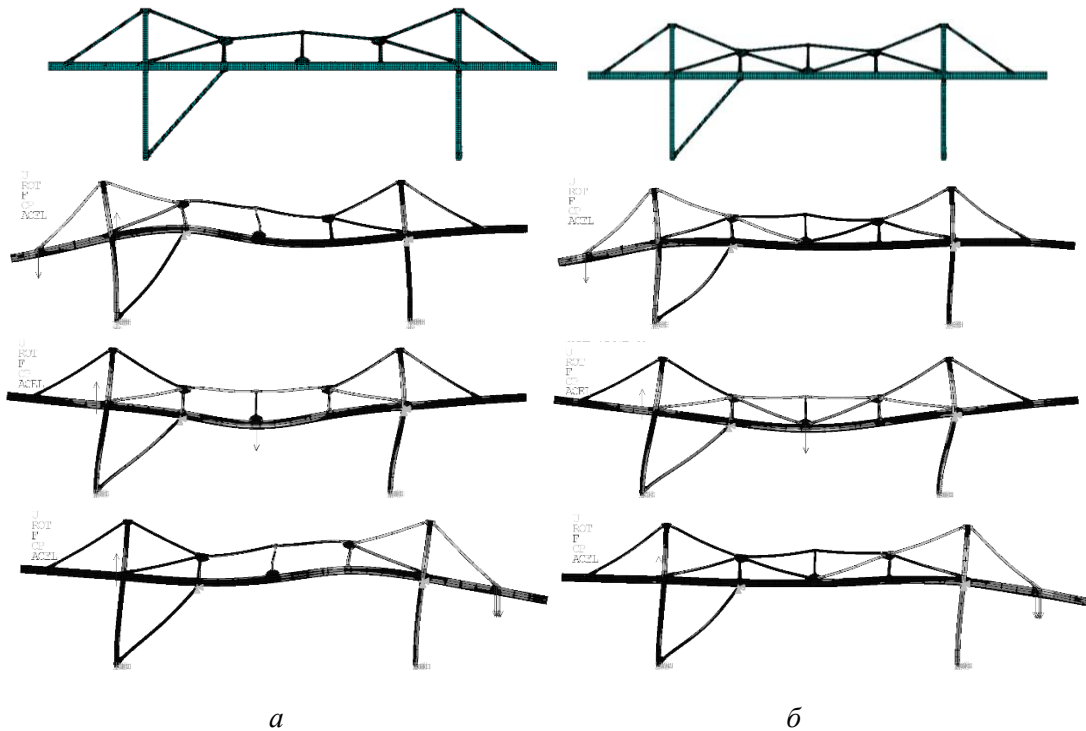


Рисунок 17 – Варіанти конструктивних рішень крану-перевантажувача і деформовані стани, що їм відповідають, під дією навантаження силової структури при різних положеннях грейферного візка:
a – варіант без серединних опорних розкосів (прототип), *б* – посилений варіант

Задачу обґрунтування проектних рішень ефективніше розв'язувати, з одного боку, при спільному аналізі напружено-деформованого стану усієї верхньої надбудови, а, з іншої – при спільному варіюванні усіх його проектних параметрів, тому залучення до розв'язання задачі поверхонь відгуку є особливо доцільним.

Зокрема, такими виступають значення максимального еквівалентного напруження за Мізесом як функції проектних параметрів. Крім того, вводиться параметр

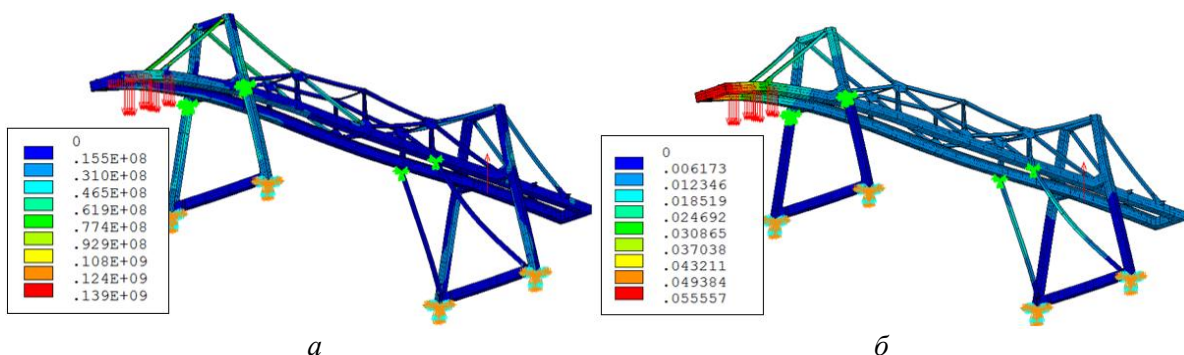
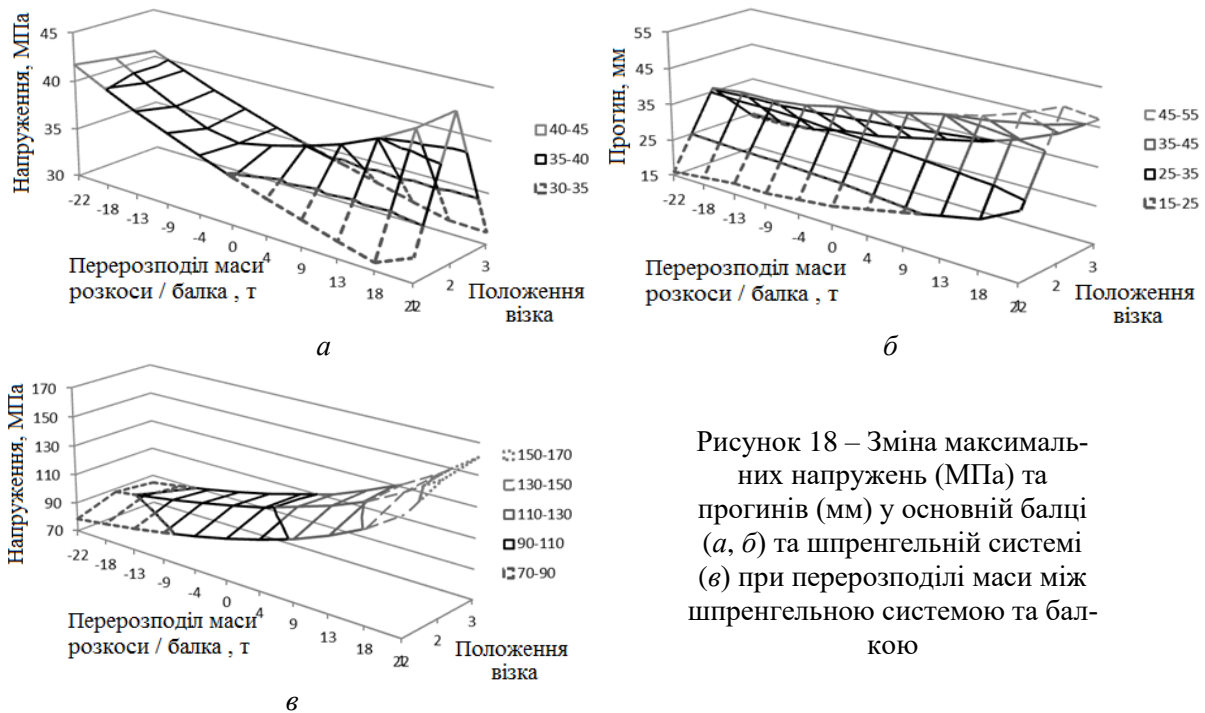
$\gamma \in [-1; 1]$, який визначає положення грейферного візка на мосту («-1» відповідає його розташуванню на ремонтній консолі, «+1» – на робочій консолі, «0» – в центрі прольоту).

Мінімізація отриманого функціоналу у просторі параметрів при обмеженнях, які стосуються міцності і жорсткості надбудови, призводить до визначення таких параметрів, які визначають міцну, довговічну, легку конструкцію верхньої надбудови мостового крану-перевантажувача. Зокрема, на рис. 18 представлено як ілюстрації зрізи функціонала при варіюванні (коефіцієнт для елементів панелей моста) в межах $[-0,5; 0,5]$, $\gamma \in [-1; 1]$.

На рис. 19–21 представлено розподіли компонент напружено-деформованого стану у крані-перевантажувачі з рекомендованим набором параметрів.

Розроблені на основі проведених досліджень результати були передані на ПАО «Азовмаш» і використані при проектуванні і виготовленні інноваційних кранів-перевантажувачів та інших виробів.

Таким чином, на прикладі вагона-цистерни та вагона-платформи, а також крана-перевантажувача, продемонстровано ефективність розроблених підходів. Зокрема, досягнуто вимог за масою та міцністю цих інноваційних виробів.



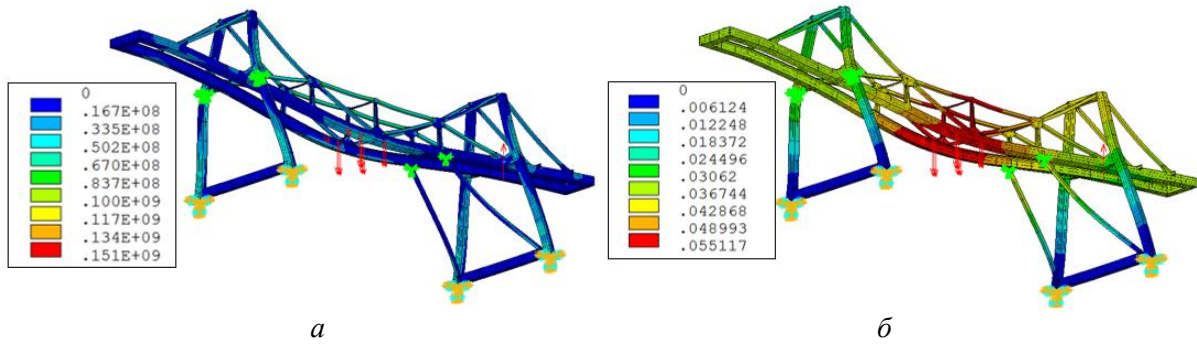


Рисунок 20 – Характеристики НДС в елементах верхньої надбудови кранів-перевантажувачів, (візок в центрі): *a* – еквівалентне напруження за Мізесом, Па; *б* – повні переміщення, м

Висновки. Розроблено новий підхід до проектного забезпечення міцності інноваційних ТСМБК, який, на відміну від традиційних, містить два етапи. На першому етапі на основі евристичних прийомів та із урахуванням досвіду аналогічних проектів розробляється структура та загальнокомпонувальні рішення інноваційних виробів, а на другому – здійснюється досягнення проектних критеріїв і обмежень шляхом цілеспрямованого варіювання проектно-технологічних параметрів. Таке поєднання неформалізованих і формалізованих складових дає можливість порівняно з традиційними методами відшукувати більш досконалі технічні рішення та раціональні параметри ТСМБК.

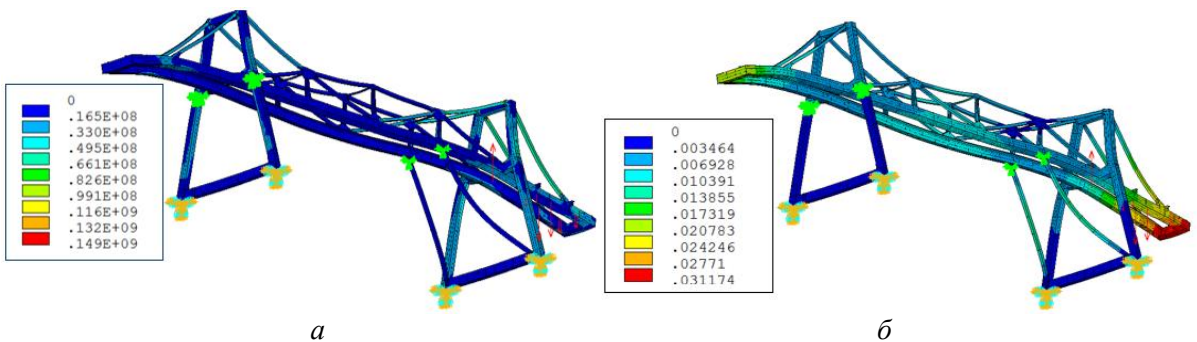


Рисунок 21 – Характеристики НДС в елементах верхньої надбудови кранів-перевантажувачів, (візок на ремонтній консолі): *a* – еквівалентне напруження за Мізесом, Па; *б* – повні переміщення, м

Розроблений підхід застосовано при проектуванні вагона-цистерни та вагона-платформи універсальної, а також крана-перевантажувача, що дало можливість збільшити їх вантажопідйомність на 7–18%.

Література: 1. Пелешко Е.В. Специализированный интегрированный программно-модельный комплекс на основе обобщенного параметрического описания сложных механических систем / Е.В. Пелешко, Н.Н. Ткачук, Г.Д. Гриценко, Н.А. Ткачук // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №3. – С. 101–117. 2. Гриценко Г.Д. Применение специализированных систем автоматизированного анализа и синтеза сложных механических конструкций: определение напряженно-деформированного состояния и обоснование параметров / Г.Д. Гриценко, А.В. Ткачук, Н.А. Ткачук, Е.В. Пелешко, С.Т. Бруль, А.В. Литвиненко // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – №14. – С. 17–25. 3. Пелешко Є.В. Комплексне дослідження міцності та жорсткості корпусів транспортних засобів спеціального призначення / Є.В. Пелешко, М.А. Ткачук, С.Т. Бруль, О.В. Литвиненко, І.М. Карапейчик // Вісник Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 39. – С. 116–131. 4. Карапейчик І.М. Підвищення тактико-технічних характеристик легкоброньованих машин шляхом забезпечення міцності бронекорпусів / І.М. Карапейчик, С.Т. Бруль, М.А. Ткачук, Є.В. Пелешко, О.В. Кохановська // Академія сухопутних військ. Військово-технічний збірник. – Львів: АСВ, 2012. – № 2(7). – С. 33–43. 5. Сеа Ж. Оптимізація. Тео-

рия и алгоритмы / Ж. Сеа – Москва: Мир, 1973. – 244 с. **6.** Кіндрацький Б. Сучасний стан і проблеми багатокритеріального синтезу машинобудівних конструкцій (огляд) / Б. Кіндрацький, Г. Сулим // *Машинознавство*, 2002. – № 10. – С. 26–40. **7.** Кіндрацький Б.І. Концепція і алгоритм ієрархічного багатокритеріального структурно-параметричного синтезу машинобудівних конструкцій / Б.І. Кіндрацький // *Zagadnienia dydaktyczne w środowisku systemówtechnologicznych*. – Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 2003. – С. 113–116. **8.** Полак Э. Численные методы оптимизации / Полак Э. – Москва: Мир, 1974. – 147 с. **9.** Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау. – Москва: Мир, 1975. – 534 с. **10.** Ткачук Н.А. Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной, Е.А. Орлов, Н.Н. Ткачук // *Механіка та машинобудування*, 2006. – № 1. – С. 57–79. **11.** Гусев Ю.Б. Общий подход к обеспечению долговечности, работоспособности и нагрузочной способности мостовых перегружателей / Ю.Б. Гусев // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, 2008. – № 3/1 (33). – С. 39–45. **12.** Грабовский А.В. Влияние варьируемых инерционно-жесткостных параметров на характеристики динамических многомассовых систем / А.В. Грабовский // *Вісник Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т»*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – №12 (1184). – С. 17–22. **13.** Грабовський А.В. Забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень / А.В. Грабовський та ін. // *Вісник Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т»*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – №18 (1190). – С. 22–29. **14.** Tkachuk M. Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation / Tkachuk M., et al. // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – Харків: УДАЗТ, 2018. – 1/7 (91). – С. 18–29. **15.** Бондаренко М. А. Инновационные тонкостенные конструкции: обоснование проектно-технологических параметров / М. А. Бондаренко., А. В. Литвиненко, Ю. Б. Гусев, Р. И. Шейченко, Р. В. Граборов, А. Д. Чепурной // *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXV міжнародної науково-практичної конференції, Ч. I*. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – С. 166. **16.** Ткачук Н. А. Линеаризация функции отклика прочностных и динамических характеристик тонкостенных конструкции на изменение толщины / Н. А. Ткачук, А. В. Литвиненко, Ю. В. Костенко, А. Ю. Танченко, А. В. Грабовский // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2014. – № 14(1057). – С. 138–154.

Bibliography (transliterated): **1.** Peleshko E.V. Specializirovannyj integrirovannyj programmno-modelnyj kompleks na osnove obobshennogo parametricheskogo opisaniya slozhnyh mehanicheskikh sistem / E.V. Peleshko, N.N. Tkachuk, G.D. Gricenko, N.A. Tkachuk // *Visnik Nac. tehn. un-tu «Khark. politehn. in-t»*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2007. – №3. – S. 101–117. **2.** Gricenko G.D. Primenenie specializirovannyh sistem avtomatizirovannogo analiza i sinteza slozhnyh mehanicheskikh konstrukcij: opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i obosnovanie parametrov / G.D. Gricenko, A.V. Tkachuk, N.A. Tkachuk, E.V. Peleshko, S.T. Brul, A.V. Litvinenko // *Visnik Nac. tehn. un-tu «Khark. politehn. in-t»*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2008. – №14. – S. 17–25. **3.** Peleshko Ye.V. Kompleksne doslidzhennya micnosti ta zhorstkosti korpusiv transportnih zasobiv specialnogo pryznachennya / Ye.V. Peleshko, M.A. Tkachuk, S.T. Brul, O.V. Litvinenko, I.M. Karapejchik // *Visnik Nac. tehn. un-tu «Khark. politehn. in-t»*. Kharkiv: NTU «KhPI», 2010. – № 39. – S. 116–131. **4.** Karapejchik I.M. Pidvishennya taktiko-tehnichnih harakteristik legkobronovanih mashin shlyahom zabezpechennya micnosti brone-korpusiv / I.M. Karapejchik, S.T. Brul, M.A. Tkachuk, Ye.V. Peleshko, O.V. Kohanovska // *Akademiya suhoputnih vijsk. Vijskovo-tehnichnij zbirnik*. – Lviv: ASV, 2012. – № 2(7). – S. 33–43. **5.** Sea Zh. Optimizaciya. Teoriya i algoritmy / Zh. Sea – Moskva: Mir, 1973. – 244 s. **6.** Kindrackij B. Suchasnij stan i problemi bagatokriterialnogo sintezu mashi-nobudivnih konstrukcij (oglyad) / B. Kindrackij, G. Sulim // *Mashinoznnavstvo*, 2002. – № 10. – S. 26–40. **7.** Kindrackij B.I. Koncepciya i algoritm iyerarhichnogo bagatokriterialnogo strukturno-parametrichnogo sintezu mashinobudivnih konstrukcij / B.I. Kindrac-kij // *Zagadnienia dydaktyczne w srodowisku systemowtechnologicznych*. – Lublin: Lubelskie Towarzystwo Naukowe, 2003. – S. 113–116. **8.** Polak E. Chislennye metody optimizacii / Polak E. – Moskva: Mir, 1974. – 147 s. **9.** Himmelblau D. Prikladnoe nelinejnoe pro-grammirovanie / D. Himmelblau. – Moskva: Mir, 1975. – 534 s. **10.** Tkachuk N.A. Konechno-elementnye modeli elementov slozhnyh mehanicheskikh sistem: tehnologiya avtomati-zirovannoj generacii i parametrizovannogo opisaniya / N.A. Tkachuk, G.D.

Gricenko, A.D. Chepurnoj, E.A.Orlov, N.N. Tkachuk // *Mehanika ta mashinobuduvannya*, 2006. – № 1. – S.57–79. **11.** Gusev Yu.B. *Obshij podhod k obespecheniyu dolgovechnosti, rabotosposobnosti i nagruzochnoj sposobnosti mostovyh peregruzhatelej* / Yu.B. Gusev // *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 2008. – № 3/1 (33). – S. 39–45. **12.** Grabovskij A.V. *Vliyanie variruemih inercionno-zhestkostnyh parametrov na harakteristiki dinamicheskikh mnogomassovyh sistem* / A.V. Grabovskij // *Visnik Nac. tehn. un-tu «Khark. politehn. in-t»*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – №12 (1184). – S. 17–22. **13.** Grabovskij A.V. *Zabezpechennya taktiko-tehnichnih harakteristik vijskovih gusenichnih i kolisnih mashin na etapi proektnih doslidzhen* / A.V. Grabovskij ta in. // *Visnik Nac. tehn. un-tu «Khark. politehn. in-t»*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016. – №18 (1190). – S. 22–29. **14.** Tkachuk M. *Thin-walled structures: analysis of the stressed-strained state and parameter validation* / Tkachuk M., et al. // *Shidno-Yevropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. – Kharkiv: UDAZT, 2018. – 1/7 (91). – S. 18–29. **15.** Bondarenko M.A. *Innovacionnye tonkosten-nye konstrukcii: obosnovanie proektno-tehnologicheskikh parametrov* / M. A Bondarenko, A. V. Litvinenko, Yu. B. Gusev, R. I. Shejchenko, R. V. Graborov, A. D. Chepurnoj // *Informacijni tehnologiyi: nauka, tehnika, tehnologiya, osvita, zdorov'ya: Tezi dopovidej XXV mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferenciyi, Ch. I*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2017. – S. 166. **16.** Tkachuk N. A. *Linearizaciya funkcii otklika prochnostnyh i dinamicheskikh harakteristik tonkostennyh konstrukcii na izmenenie tolshiny* / N. A. Tkachuk, A. V. Litvinenko, Yu. V. Kostenko, A. Yu. Tanchenko, A. V. Grabovskij // *Visnik Nacionalnogo tehnichnogo universitetu «Kharkivskij politehnichnij institut»*. – Kharkiv: NTU «KhPI». 2014. – № 14(1057). – S. 138–154.

Ткачук М.А., Бондаренко М.О., Шейченко Р.І., Грабовський А.В., Ткачук М.М., Гусєв Ю.Б., Набоков А.В.

ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ У ХОДІ ПРОЕКТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ІННОВАЦІЙНИХ ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ

У роботі описано новий підхід до визначення технічних рішень інноваційних тонкостінних машинобудівних конструкцій та їхніх проектних параметрів. Цей підхід полягає у поєднанні двох етапів. На першому етапі визначається раціональна структура, а на другому – проектні параметри. За рахунок такого поєднання вдається, з одного боку, досягнути високих технічних характеристик виробів, а також задовольнити вимогам забезпечення міцності та зниження маси. Наведені ілюстративні матеріали.

Ткачук Н.А., Бондаренко М.А., Шейченко Р.И., Грабовский А.В., Ткачук Н.Н., Гусев Ю.Б., Набоков А.В.

ОБОСНОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ХОДЕ ПРОЕКТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИННОВАЦИОННЫХ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В работе описан новый подход к определению технических решений инновационных тонкостенных машиностроительных конструкций и их проектных параметров. Этот подход заключается в сочетании двух этапов. На первом этапе определяется рациональная структура, а на втором – проектные параметры. За счет такого сочетания удается, с одной стороны, достичь высоких технических характеристик изделий, а также удовлетворить требованиям обеспечения прочности и снижения массы. Приведены иллюстративные материалы.

M. Tkachuk, M. Bondarenko, R. Sheychenko, A. Grabovskyi, M. Tkachuk, Yu. Gusev, A. Nabokov

SUBSTANTIATION OF RATIONAL TECHNICAL SOLUTIONS DURING THE PROJECT RESEARCH OF INNOVATIVE THIN-WALLED STRUCTURES

The paper describes a new approach to technical solutions and design parameters substantiation for innovative thin-walled machine-building structures. This approach consists of a combination of two stages. At the first stage, rational structure is determined, and at the second stage, the design parameters are determined. Due to this combination it is possible, on the one hand, to achieve high technical characteristics of the products, as well as to meet the requirements of ensuring strength and reducing weight. Illustrative materials are provided.