

УДК 004.9 : 691-419.8

О. О. Ларін¹
А. О. Таряник¹

РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ВНУТРІШНЬОЇ БУДОВИ ГУМО-КОРДНОЇ БАГАТОШАРОВОЇ АМОРТИЗАЦІЙНОЇ ПРОКЛАДКИ

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Запропоновано інформаційну систему комп'ютерного моделювання пружних властивостей амортизаційної прокладки та розроблена інтелектуальна система вибору параметрів оптимального розташування армуючих волокон за допомогою генетичного алгоритму. Для розробки керувальної програми застосовано об'єктно-орієнтований підхід. Програма є інтегрованою комп'ютерною системою, що має інтерактивний графічний інтерфейс користувача. Програма взаємодіє зі скінченно-елементним комплексом для проведення інженерних розрахунків та має власний модуль для демонстрації тривимірної геометрії, що працює на основі бібліотеки OpenGL.

Ключові слова: інтегровані комп'ютерні системи, генетичний алгоритм, гумо-кордні композити, гума амортизаційна прокладка, МСЕ.

Вступ

Експлуатація будівельних конструкцій часто супроводжується динамічними навантаженнями різної природи, які здатні викликати вібрації. Динамічний вплив на будівельні конструкції може мати сейсмічну природу або бути викликаний наявністю штучних джерел підвищеної вібрації, наприклад в спеціалізованих промислових будівлях (фундаменти та корпуси турбін, іншого габаритного вібраційного обладнання) або в транспортних спорудах (мости, естакади). Крім того близьке розташування навіть неспеціалізованих будівель до джерел вібрацій (споруди в районі залізничних колій, метро тощо) може призводити до виникнення в цих конструкціях небажаних високих рівнів вібрацій.

Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є застосування амортизаційних прокладок, як шарків між несучими елементами конструкцій та джерелом можливої вібрації, що дозволяє частково ізолювати та загасити динамічний вплив. В сучасній практиці в якості таких елементів застосовують гумові [1] та багатошарові гумово-сталеві прокладки [2—4], а також багатошарові гумові прокладки, що посилені наявністю внутрішнього жорсткого корду [4—6]. Очевидно, що забезпечення мінімальної передачі вібраційного впливу на будівельні споруди є важливою практичною задачею, яка дозволить підвищити довговічність конструкцій та зберегти кошти, що витрачаються на їх ремонт під час експлуатації.

Таким чином, актуальними є дослідження, спрямовані на визначення характеристик гумової амортизаційної прокладки та формування обґрунтованих рекомендацій, щодо їх внутрішньої композитної будови з точки зору підвищення амортизаційних властивостей та характеристик міцності.

Постановка задачі

У роботі досліджується композитний багатошаровий амортизаційний елемент, що складається з гуми та має шари, посилені текстильним армуванням. На рис. 1 показано схему конструкції такого елемента, а також фото натурального зразка.

Пружна поведінка та міцність такої прокладки істотно залежить від її внутрішньої будови: характеристик і типу кордних волокон, кількості шарів армування їх взаємного розташування в перерізі тощо [2, 7—10]. Отже, варіюванням зазначеними параметрами внутрішньої будови компо-

зитної гумової амортизаційної прокладки можна підібрати її оптимальну структуру за вимогами, що висуваються до її податливості та забезпечення міцності [10].

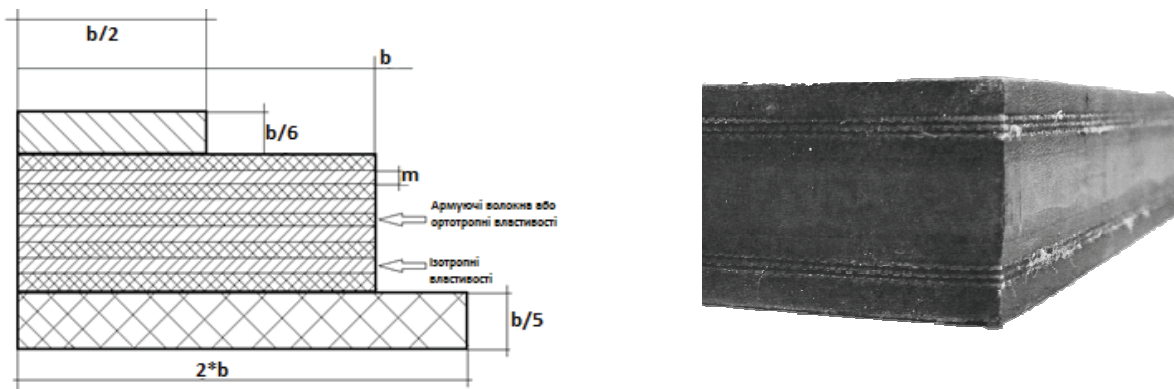


Рис. 1. Схема та фото конструкції гумової композитної амортизаційної прокладки

Розроблено алгоритм автоматизованої процедури побудови багат шарової прокладки довільної внутрішньої структури та розроблено програмне забезпечення, яке, використовуючи зазначений алгоритм та процедуру оптимізації нульового порядку (генетичний алгоритм), дозволяє отримати амортизаційну прокладку з оптимальною внутрішньою будовою.

Комп'ютерне моделювання в'язко-пружного деформування гумо-кордної амортизаційної прокладки за імпульсного збудження

Досліджуванім об'єктом взято тривимірну конструкцію, що складалась з трьох елементів: верхнє жорстке тіло (метал), проміжне тіло — гумокордна амортизаційна прокладка, нижнє тіло — тверда основа (бетон). Проводились дослідження, щодо формування напружено-деформованого стану в гумокордному композиті під дією зовнішнього статичного навантаження.

Для моделювання використано умови симетрії і таким чином моделювалась 1/4 частина амортизаційної прокладки, яка затиснута з двох сторін жорсткими тілами. Основу («нижнє» тіло) було жорстко зафіксовано по всіх ступенях свободи, протилежне тіло було обмежене до можливості відтворювати лише вертикальні рухи. Навантаження прикладалось на «верхнє» тіло, як рівномірний тиск в 10 МПа.

Для побудови геометричної моделі використаний метод «знизу-вгору». Тобто спочатку будувались точки та лінії, які утворювали каркас перетину цієї конструкції, потім на цей каркас натягувались поверхні, утворюючи ескіз перетину, який процедурою екструзії витягнуто у об'єми такої конструкції. При цьому верхнє та нижнє тіла будувались окремо, оскільки вони мають свої власні геометричні розміри. Побудова моделі за такою схемою дозволяє легко провести процедуру параметризації, що в подальшому забезпечує автоматизацію отримання моделей з різними геометричними параметрами. В цілому параметрична модель (рис. 2) складалась з трьох тіл (див. рис. 2): верхнє тіло, нижнє тіло та амортизаційна прокладка, заданих своїми габаритними розмірами, але ключова частина цієї моделі знаходиться в особливості моделювання середнього тіла — прокладки. Це тіло змодельоване як система об'ємів, кожний з яких має власну товщину та може мати власні властивості матеріалу. Власне ідея вибору оптимальної внутрішньої будови прокладки полягає в можливості зміни саме цих параметрів.

Визначення характеристик деформування проводилось на основі методу скінчених елементів (МСЕ) з використанням тривимірних восьми-вузлових гексадральних скінчених елементів (СЕ). СЕ модель та граничні умови показані на рис. 3.

Наважливішою частиною комп'ютерного моделювання була процедура задання певним прошаркам кордного підсилення [11]. У роботі для цього використовувався спеціальний СЕ, який вбудовується в заданий вже існуючий СЕ і відповідно до своїх наперед заданих характеристик (жорсткість волокон армування та їх просторова орієнтація в межах СЕ в який вони вбудовуються) додає в матрицю жорсткості СЕ додаткову мембранну жорсткість

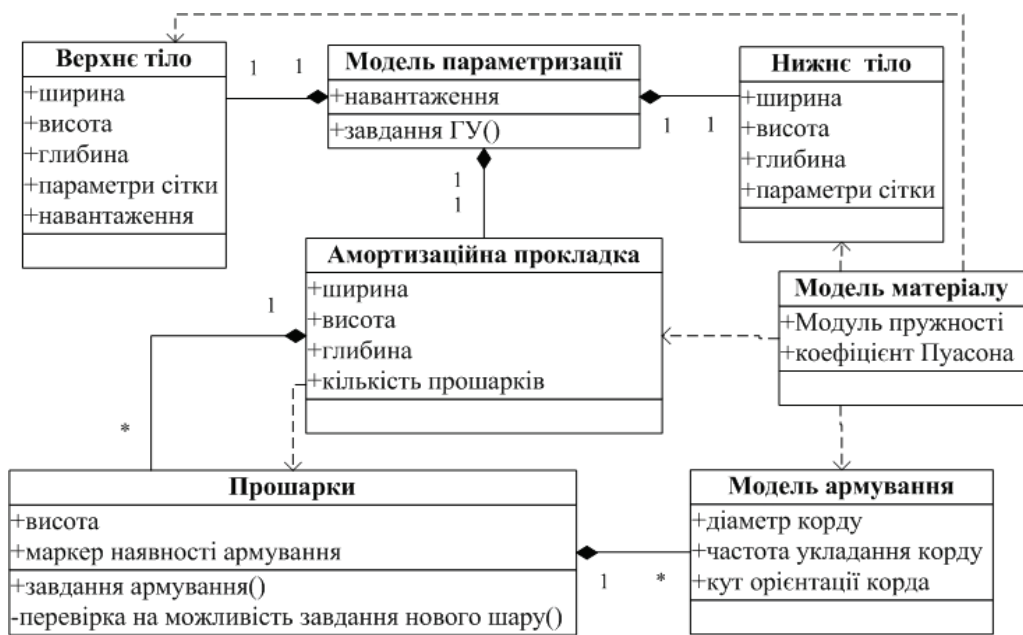


Рис. 2. Діаграма структурної схеми параметричної моделі

Загальний алгоритм відповідної СЕ технології, показаний на рис. 4, полягає в таких діях: задання властивостей матеріалу для кордних волокон, характеристик геометрії, орієнтації та розташування волокон.

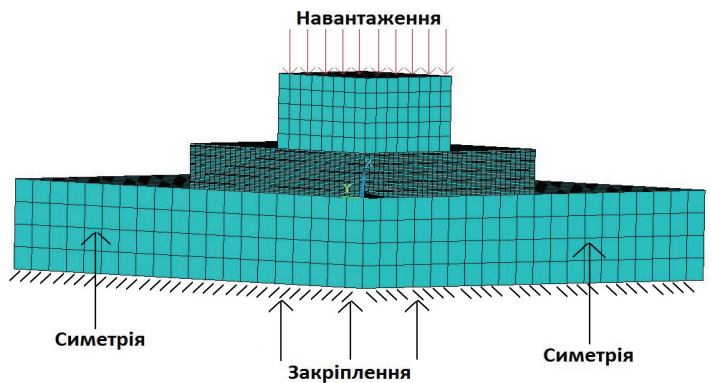


Рис. 3. Граничні умови та навантаження



Рис. 4. Алгоритм побудови армуючих волокон

Розробка спеціалізованого програмного забезпечення для керування процесом побудови комп'ютерної моделі прокладки та проведення статичного аналізу її міцності

За розглянутими вище алгоритмом та принципом параметризації створено систему макросів (скриптових програм), які дозволяють отримувати моделі з різною внутрішньою будовою амортизаційної прокладки, що придатні для проведення розрахунків на міцність в сучасних програмних комплексах інженерних розрахунків. З метою спрощення в роботі цієї системи автоматизованої будови прокладки створено спеціальну програму керування, яка має зручний графічний інтерфейс та дозволяє в інтуїтивній інтерактивній формі змінювати користувачу параметри прокладки та/або всієї системи і отримувати результати розрахунків на міцність для цієї конструкції без безпосереднього використання програмних комплексів СЕ розрахунків (необхідні програмні системи запускаються та виконують задані макросами дії у фоновому режимі).

Можливості цієї програми показані на діаграмі прецедентів UML (рис. 5).

Програма складається з робочого вікна (рис. 6) в котрому є можливість редагувати текст (макрос), переглядати вихідну геометричну модель в інтерактивному режимі (відповідний режим попереднього перегляду реалізовано окремо із застосуванням бібліотеки 3D графіки OpenGL), виводити результати проведених розрахунків у інтерактивному режимі додаткового модулю Cortona 3D (рис. 7), тобто модель або частину моделі, на якій показано контур розподілу переміщень/деформацій/напружень можна переміщати по відповідному вікну в програмі, змінювати масштаб, обертати тощо. Всі маніпуляції програмою відбуваються у меню та у вкладках. Програма розроблена на мові Visual Studio C#.

Також зроблений «конструктор» безпосереднього редагування тексту макросу та додана можливість редагування або видалення армуючих волокон в потрібних прошарках. На рис. 6 зображено вікно редагування за допомогою створеного конструктора.

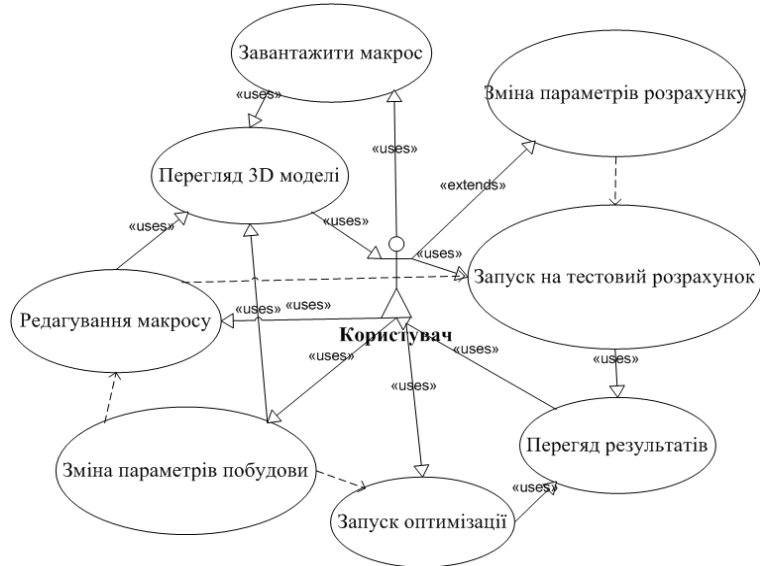


Рис. 5. UML-діаграма прецедентів програми

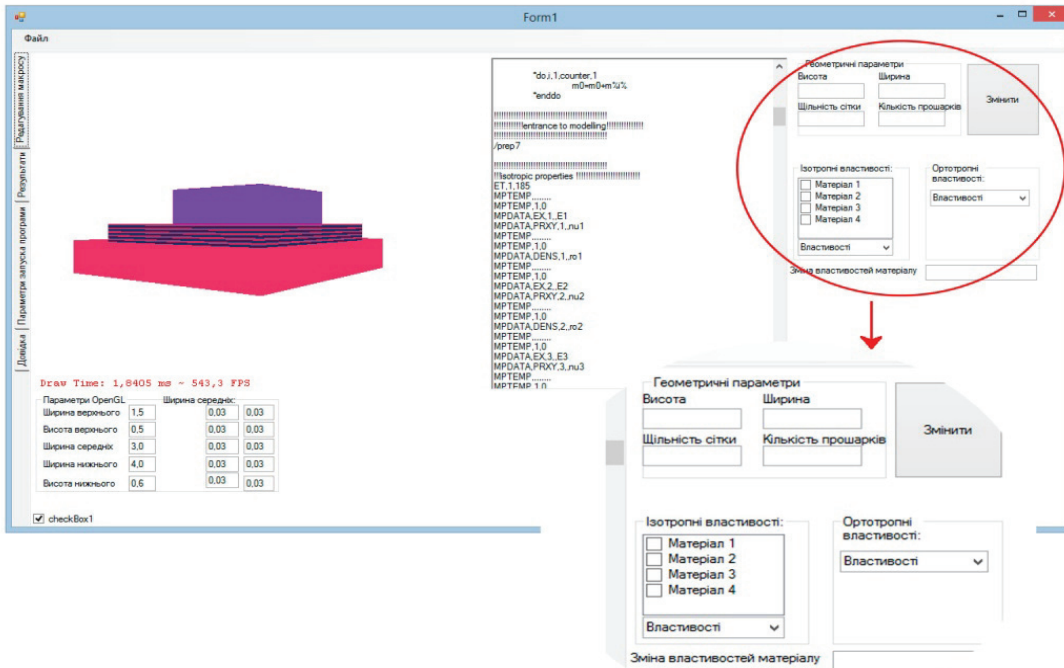


Рис. 6. Перегляд моделі та вікно для редагування макросу

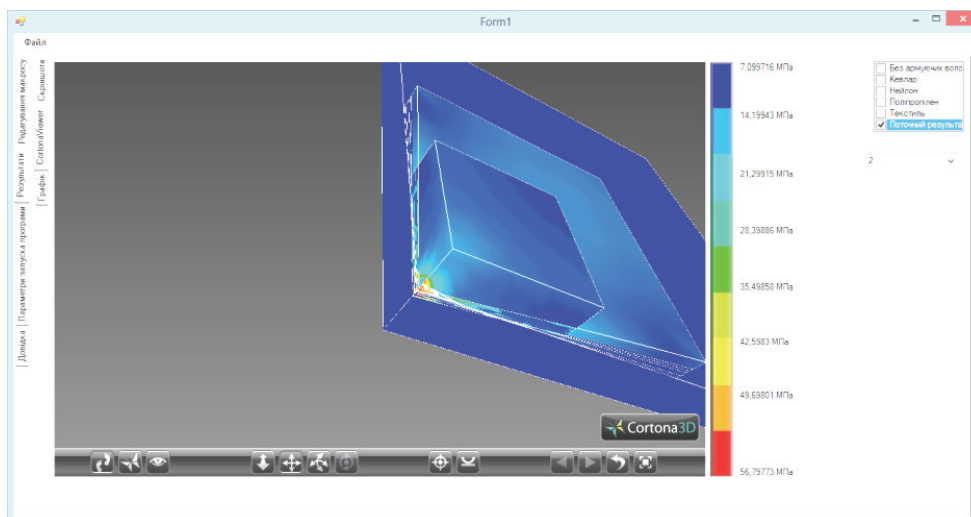


Рис. 7. Вкладка для перегляду результатів в модулі Cortona 3D

Використовуючи запропонований алгоритм побудови моделі та створене програмне забезпечення, в роботі в якості тестових прикладів проведено розрахунки з різними варіаціями положення та з різними властивостями армуючих волокон. На рис. 7 показані три варіанти внутрішньої будови амортизаційної прокладки:

- виконана з суцільної гуми (варіант 1, рис. 7а);
- прокладка має шари, що посилені текстильним кордом та які розташовані в середині прокладки (варіант 2, рис. 7б);
- прокладка має шари, що посилені текстильним кордом та які розташовані в середині (але не по центру) та по крайнім шарам прокладки (варіант 3, рис. 7в).

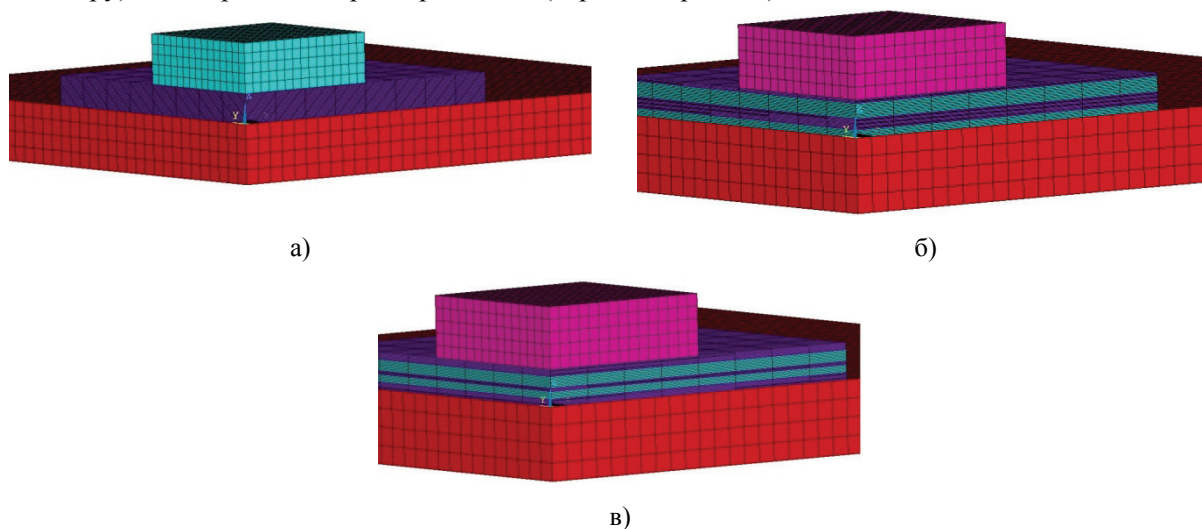


Рис. 8. Тестові результати з різними варіаціями положення армуючих волокон

Аналіз розрахунків на статичну міцність такої прокладки показує, що максимальні напруження здатні досить суттєво змінюватись в залежності від внутрішньої будови. Так для першого варіанта будови еквівалентні напруження за критерієм Мізеса становили 36 МПа, для другого варіанта — 31,5 МПа, а для третього — 30 МПа.

Оптимізація внутрішньої будови амортизаційної прокладки

Отримані попередньо результати вказують на те, що наявність та розташування прошарків амортизаційної прокладки з кордним армуванням здатне суттєво впливати на її несучу здатність. Таким чином, раціональний вибір характеристик кордного армування може забезпечити суттєве збільшення запасу міцності такої конструкції. Оскільки варіантів орієнтації та розташування кордних волокон може бути велика кількість, доцільно використовувати оптимізаційні алгоритми.

В цій роботі оптимізація є структурною, тобто варіюються не лише зміна певних неперервних або дискретних параметрів, але є варіанти типу: «є» або «нема» кордного армування в заданому про- шарку. Така ситуація робить майже неможливим використання градієнтних методів оптимізації, тому застосовано генетичний алгоритм (метод нульового порядку).

Задача кодується таким чином, щоб її розв'язання могло бути представлено в вигляді масиву подібного до інформації за складом хромосоми. Випадковим чином в масиві створюється певна кількість початкових елементів «осіб» (початкова популяція). Особи оцінюються з використанням функції пристосування, в результаті якої кожній особі присвоюється певне числове значення, що є критерієм для оптимізації і, яке визначає можливість «виживання» особи. Після цього вибираються кращі з точки зору відбору (найближчі варіанти до шуканого критерію оптимізації) особи та відбувається процедура схрещення. До осіб застосовується «генетичні оператори» (в більшості випадків це оператор схрещення (crossover) і оператор мутації (mutation)), створюючи таким чином наступне покоління. Особи наступного покоління також оцінюються та піддаються застосуванню генетичних операторів. Так моделюється еволюційний процес, що продовжується декілька життєвих циклів, доки не буде виконано критерій зупинки алгоритму [12, 13]. Таким критерієм може бути: знаходження глобального, або надоптимального розв'язання; вичерпання числа поко- лінь, що відпущені на еволюцію або вичерпання часу, відпущеного на еволюцію.

В цій задачі за початкову популяцію взято згенерований випадковим чином набір хромосом, котрі зберігають в собі випадкове положення армуючих волокон по перерізу про- кладки. Для цієї популяції розраховується пристосованість (еквівалентні за критерієм Мізеса напруження, що виникають під дією статичного навантаження на кон- струкцію). Далі відбувається відбір присто- сованіших осіб (варіантів конструкції) та їх схрещування з випадковою мутацією. Далі — всі дії повторюються до критерію зупинки.

Алгоритм було реалізовано у вигляді додатку до створеного програмного забез- печення, таким чином, що програма фор- мує випадковий набір характеристик ар- мування кордом з довільним розташуван- ням по прошарках і для такої моделі спочатку формує макрос її побудови в SE комплексі, а потім виконує розрахунок на міцність, така схема повторюється певну кількість разів (формується «популяція» можливих варіантів конструкції та зна- чення максимальних еквівалентних на- пружень для кожного варіанта). Далі оби- рається половина варіантів з цього набору, що забезпечує найменші напруження («се- лекція»). З тим набором, що залишився відбувається «схрещування», тобто фор- муються нові варіанти шляхом вибору певної частини параметрів з різних вдалих варіантів конструкцій. Крім цього, дода- ється ще 10 % «осіб популяції» з новим випадковим набором характеристик (про- цес «мутації»). Далі все повторюється.

Слід зазначити, що сформована постановка задачі оптимізації не обов'язково має єдиний розв'язок, більш того, генетичний алгоритм не має математично доведеної умови збіжності, тобто не гарантується, що буде точно знайдено глобальний мінімум цільової функції. Тим не менш, цей інструментарій є цілком ефективним алгоритмом пошуку раціональних варіантів конструкцій під

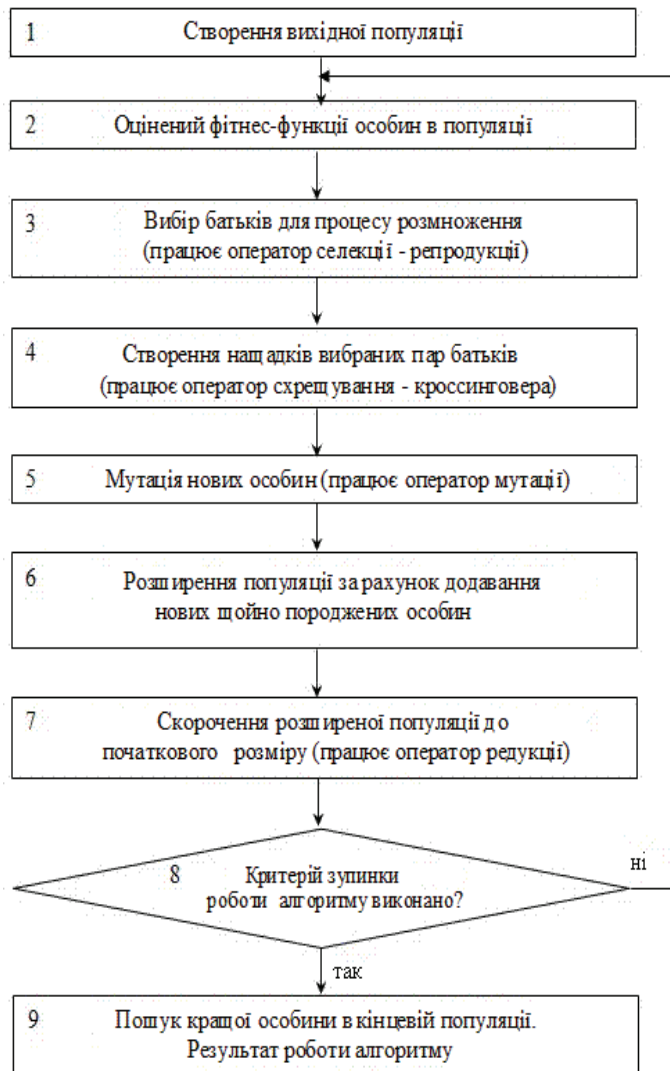
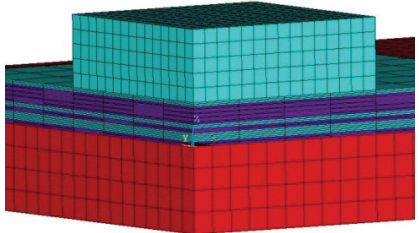
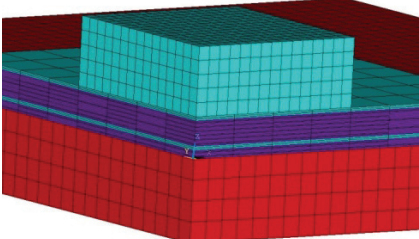


Рис. 9. Генетичний алгоритм

час розв'язання задачі структурної оптимізації.

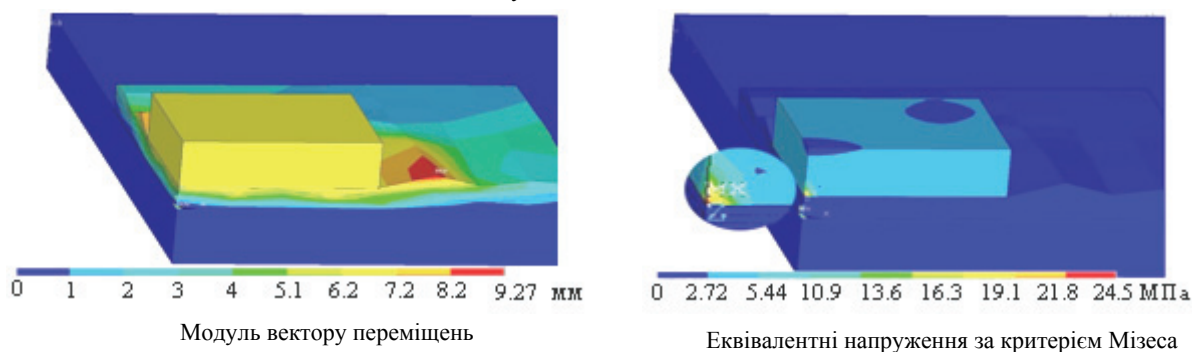
Після декількох запусків розрахунку за допомогою генетичного алгоритму вибрано два найбільш «стійких» результати. В таблиці наведені максимальні еквівалентні напруження, які виникають в прокладці, положення волокон (перераховано 10 суб-прошарків, що створювались, та відмічено «0» — суб-прошарок який не мав посилення кордом та «1» — той що їх мав), також представлено кути орієнтації волокон в просторі для тих прошарків, що мали армування.

Результати розрахунків за допомогою генетичного алгоритму

| Максимальні еквівалентні напруження | Положення волокон армування | Орієнтація волокон армування | Візуалізація моделі |
|-------------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| 24,2 МПа | 1,0,0,1,0,1,1,1,1,0 | 16,35,55,34,89,71 |  |
| 25 МПа | 1,1,0,1,1,1,1,1,1,0 | 45,35,15,14,89,61,77,81 |  |

На рис. 10 показані картини розподілу переміщень (прогинів) та еквівалентних напружень в конструкції під дією зовнішнього статичного навантаження на верхнє тіло для варіанта конструкції, що має оптимальну внутрішню будову прокладки. Найбільші напруження та деформації виникають на двох паралельних краях на місці контакту з верхнім прошарком у напрямку арматурних волокон. Визначено, що для заданого навантаження коефіцієнт запасу міцності в армуючих волокнах та гумових прошарках становить 181,8 та 29,85, відповідно.

Результати для всієї моделі:



Результати для армуючих волокон:

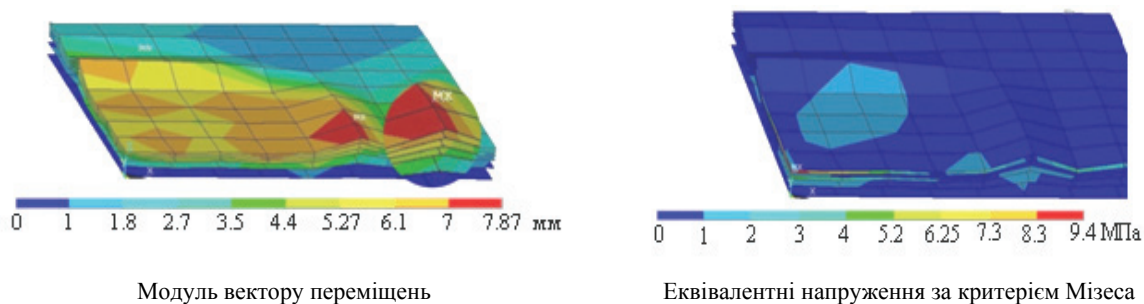


Рис. 10. Характеристики НДС в конструкції з оптимальною будовою

Висновки

Розроблено параметричну модель багат шарової амортизаційної прокладки та інтелектуальну систему вибору параметрів амортизаційної прокладки за допомогою генетичного алгоритму. Написані спеціалізована програма САПР на мові С#, за допомогою якої автоматизується побудова конструкції та полегшується робота інженера. Програма є інтегрованою комп'ютерною системою з інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом.

Проаналізовано напружено-деформований стан, що виникає під впливом статичного тиску в конструкції з визначеною оптимальною внутрішньою будовою. Визначено, що для заданого навантаження коефіцієнт запасу міцності в армуючих волокнах та гумових прошарках становить 181,8 та 29,85 відповідно. Встановлено, що максимальні напруження виникають в кордних елементах, але доцільним буде розглядати гумові прошарки, так як вони мають менший коефіцієнт запасу міцності. В гумових прошарках найбільші напруження виникають на краях контакту з металевим тілом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Gjorgjiev I. A polynomial analytical model of rubber bearings based on series of tests / I. Gjorgjiev, M. Garevski // Engineering Structures, 2013. — Vol. 56. — Pp. 600—609.
2. Nonlinear dynamically automated excursions for rubber-steel bearing isolation in multi-storey construction / [A. B. M. S. Islam, R. R. Hussain, M. Z. Jumaat, M. A. Rahman] // Automation in Construction. — 2013. — Vol. 30. — Pp. 265—275.
3. Improved equivalent viscous damping model for base-isolated structures with lead rubber bearings / [T. Zordan, T. Liu, B. Briseghella, Q. Zhang] // Engineering Structures. — 2014. — Vol. 75. — Pp. 340—352.
4. Mordini A. An innovative earthquake isolation system using fibre reinforced rubber bearings / A. Mordini, A. Strauss // Engineering Structures. — 2008. — Vol. 30 (10). — P. 2739—2751.
5. Spizzuoco M. Innovative low-cost recycled rubber-fiber reinforced isolator: experimental tests and finite element analyses / M. Spizzuoco, A. Calabrese, G. Serino // Engineering Structures. — 2014. — Vol. 76. — Pp. 99—111.
6. Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: shear modulus and damping coefficient / [A. Strauss, E. Apostolidi, T. Zimmermann et al.] // Engineering Structures. — 2014. — Vol. 75. — Pp. 402—413.
7. Polukoshko S. Vibration damping using laminated elastomeric structures / S. Polukoshko, V. Gonca, J. Svabs // Solid State Phenomena. — 2015. — Vol. 220—221. — P. 81—90.
8. Gonca V. Analytical and experimental research of compressive stiffness for laminated elastomeric structures / V. Gonca, S. Polukoshko, A. Boyko // Procedia Engineering. — 2014. — Vol. 69. — Pp. 1388—1396.
9. Карпинос Д. М. Композиционные материалы / Д. М. Карпинос. — Киев : Наук. думка, 1985. — 588 с.
10. Зиновьев П. А. Оптимальное проектирование композитных материалов // П. А. Зиновьев, А. А. Смердов. — М. : изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 103 с.
11. Скворцов, Ю. В. Моделирование композитных элементов конструкций и анализ их разрушения в САЕ-системах MSC. Patran-Nastran и ANSYS [Электронный ресурс] : эл. учеб. пособие / Ю. В. Скворцов, С. В. Глушков, А. И. Хромов ; Самарский государственный аэрокосмический университет им. С. П. Королева. — Самара, 2012. — 148 с.
12. Бураков М. В. Генетический алгоритм: теория и практика : учеб. пос. / М. В. Бураков. — СПб. : ГУАП, 2008. — 164 с.
13. Панченко Т. В. Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко. — Астрахань : Астраханский университет, 2007. — 87 с.

Рекомендована кафедрою технології та автоматизації машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 7.07.2016

Ларін Олексій Олександрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри динаміки та міцності машин, e-mail: AlexeyA.Larin@gmail.com;

Таряник Антон Олегович — студент інженерно-фізичного факультету, e-mail: Anton.Taryanik@gmail.com.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

О. О. Larin¹
A. O. Taryanik¹

Development of Intellectual Information System for Creation of Optimal Internal Structure of Multilayer Fiber-Reinforced Rubber Bearing

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

There has been proposed an information system for computer modeling of the elastic properties of amortization gaskets which allows to optimal selection of parameters and location of reinforcement fibers using a genetic algorithm. An object-oriented approach is used for the development of the control program. The program is created as an integrated

computer system that has an interactive graphical user interface. The program interacts with the finite-element software for engineering calculations, and has its own module which pre-demonstrates the three-dimensional geometry based on OpenGL graphic library.

Keywords: integrated computer systems, genetic algorithm, rubber-cord composites, rubber damper pad, FEM.

Larin Oleksii O. — Dr. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Dynamics and Strength, e-mail: AlexeyA.Larin@gmail.com;

Taryanik Anton O. — Master Student of the Machines and Physics Department, e-mail: Anton.Taryanik@gmail.com

А. А. Ларин¹
А. О. Таряник¹

Разработка интеллектуальной системы формирования оптимальной внутренней структуры резинокордной многослойной амортизационной прокладки

¹Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

Предложено создание информационной системы компьютерного моделирования упругих свойств амортизационной прокладки и разработана интеллектуальная система выбора параметров оптимального расположения армирующих волокон с помощью генетического алгоритма. Для разработки управляющей программы применен объектно-ориентированный подход. Программа представляет собой интегрированную компьютерную систему, имеет интерактивный графический интерфейс пользователя. Программа взаимодействует с конечно-элементным комплексом для проведения инженерных расчетов и имеет собственный модуль для демонстрации трехмерной геометрии, работающий на основе библиотеки OpenGL.

Ключевые слова: интегрированные компьютерные системы, генетический алгоритм, резино-кордные композиты, резиновая амортизационная прокладка, МКЭ.

Ларин Алексей Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры динамики и прочности машин, e-mail: AlexeyA.Larin@gmail.com;

Таряник Антон Олегович — студент инженерно-физического факультета, e-mail: Anton.Taryanik@gmail.com