

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЕТЕНОГО ВУГЛЕПЛАСТИКУ

Застосування композитних матеріалів в різних галузях сучасної промисловості стрімко збільшується завдяки їхніми високими міцностними властивостями, малою масою та хорошою технологічністю. Велика розмаїтість застосовуваних матеріалів, видів армування і внутрішніх структур викликає потребу в дослідженнях статичних і динамічних властивостей композиційних матеріалів. Завдяки останнім досягненням в області технологій композитні матеріали широко використовуються в різних промислових цілях. В результаті виникає значний інтерес до вивчення та розуміння поведінки композитних структур. Аналіз композитних конструкцій, вивчення резонансних частот, факторів демпфірування та модальних форм зіграв важливу роль у визначенні динамічних характеристик конструкції, виявленні пошкоджень та моніторингу стану структури композиту. В ході даної роботи представлено результати розрахунково-експериментальних досліджень модуля пружності, власних частот та форм коливань, демпфуючі властивості композитного матеріалу. Випробування проводилися над зразками плетеного десятишарового вуглепластика. Досліджуваний вуглепластик, армований вуглецевим волокном, має полотняне плетіння. Зразки були вирізані в трьох напрямках: основи (під кутом 0°), утка (під кутом 90°) та під кутом 45° . Для кожного напрямку було заготовлено по дев'ять зразків. Для дослідження модуля пружності було використано установку для випробувань на розтяг, а для визначення власних частот та форм коливань-віброденд. Демпфуючі властивості розраховані методом Оберста, на основі амплітудно-частотних характеристик зразків. Проведена статистична обробка результатів експерименту та отримано значення математичного очікування, дисперсії та середнього квадратичного відхилення. Побудовано геометричні та скінченно-елементні моделі зразків вуглепластика, визначені їх власні частоти та форми коливань. Проведено порівняння розрахунково-експериментальних даних з численними розрахунками, використовуючи метод скінченних елементів.

Ключові слова: композитні матеріали, вуглепластик, модуль пружності, власні частоти, форми коливань, демпфірування, амплітудно-частотна характеристика.

Применение композиционных материалов в различных отраслях современной промышленности стремительно увеличивается благодаря их высоким прочностным свойствам, малой массе и хорошей технологичности. Большое разнообразие применяемых материалов, видов армирования и внутренних структур вызывает потребность в исследованиях статических и динамических свойств композиционных материалов. Благодаря последним достижениям в области технологий композитные материалы широко используются в различных промышленных целях. В результате возникает значительный интерес к изучению и пониманию поведения композитных структур. Анализ композитных конструкций, изучение резонансных частот, факторов демпфирования и модальных форм сыграл важную роль в определении динамических характеристик конструкции, обнаружении повреждений и мониторинге состояния структуры композита. В ходе данной работы представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований модуля упругости, собственных частот и форм колебаний, демпфирующих свойств композитного материала. Испытания проводились над образцами плетеного десятислойного углепластика. Исследуемый углепластик, армированный углеродным волокном, имеет полотняное переплетение. Образцы были вырезаны в трех направлениях: основы (под углом 0°), утка (под углом 90°) и под углом 45° . Для каждого направления было заготовлено по девять образцов. Для исследования модуля упругости было использовано устройство для испытаний на растяжение, а для определения собственных частот и форм колебаний - вибростенд. Демпфирующие свойства рассчитаны методом Оберста, на основе амплитудно-частотных характеристик образцов. Проведена статистическая обработка результатов эксперимента и получены значения математического ожидания, дисперсии и среднеквадратического отклонения. Построены геометрические и конечно-элементные модели образцов углепластика, определены их собственные частоты и формы колебаний. Проведено сравнение расчетно-экспериментальных данных с многочисленными расчетами, выполненными методом конечных элементов.

Ключевые слова: композитные материалы, углепластик, модуль упругости, собственные частоты, формы колебаний, демпфирование, амплитудно-частотная характеристика.

The use of composite materials in various branches of modern industry is rapidly increasing due to their high strength properties, low weight and good manufacturability. A wide variety of materials used, types of reinforcement and internal structures creates a need for studies of the static and dynamic properties of composite materials. Due to the latest advances in technology, composite materials are widely used in a variety of industrial applications. As a result, there is considerable interest in studying and understanding the behavior of composite structures. Analysis of composite structures, study of resonance frequencies, damping factors and modal shapes played an important role in determining the dynamic characteristics of the structure, detecting damage and monitoring the state of the composite structure. In this paper, the results of computational and experimental researches of the Young's modulus, natural frequencies and modes of vibration, damping properties of the composite material are presented. The researches were carried out on samples of the woven ten-layer carbon fiber reinforced plastic. The investigated carbon fiber reinforced plastic has a plain weave. Samples were cut in three directions: warp (0°), weft (90°) and 45° . Nine samples were prepared for each direction. To study the Young's modulus, a tensile testing machine was used, and a vibration stand was used to determine the natural frequencies and modes of vibration. Damping properties are calculated by the Oberst method, based on the amplitude-frequency characteristics of the samples. Statistical processing of the experimental results was carried out and the values of the mathematical expectation, variance and standard deviation were obtained. Geometric and finite element models of carbon fiber reinforced plastic samples were built, their natural frequencies and vibration modes were determined. Comparison of the computational and experimental data with numerous calculations using the finite element method is carried out.

Key words: composite materials, carbon fiber, modulus of elasticity, natural frequencies, forms of oscillations, damping, amplitude-frequency characteristic.

Вступ. Із розвитком технологій виробництва композитних матеріалів значно розширилась їх галузь застосування. Композитні матеріали використовуються через їх високого відношення міцності до ваги в галузях, де потрібні компоненти з високими експлуатаційними характеристиками. Один із найпоширеніших композитних матеріалів - є вуглепластик.

Вуглепластик (або карбон) – це композитний матеріал, в структуру якого входять: вуглецеві волокна та смола. Вуглепластик використовують в автомобільній, авіаційній, ракетній, космічній промисловості, медицині та побуті, замінюючи собою металеві елементи, деталі та конструкції, тому вуглепластик - є одним із поширених композитним матеріалом [1]. Фізичні властивості композитних матеріалів, а зокрема вуглепластика, залежать від таких параметрів, як: низька щільність, яка впливає на вагу деталі та конструкції, висока міцність, високі механічні властивості.

У виробництві виробів різного призначення, від побутових до складних конструкційних, використовуються вуглепластики на основі епоксидних смол з наповненням із вуглецевого волокна (вуглетканини). Активне їх використання сприяє розвитку та модифікації компонентів композитних матеріалів та покращенню їх властивостей. У багатьох випадках виробів з вуглепластиків працюють в умовах механічних навантажень.

Літературний огляд. В статті [2] запропоновано формулювання, базуючись на моделі зсуву та рівноваги глобальних сил, для визначення ефективного модуля пружності композитів з вуглецевих нанотрубок (ВНТ) та епоксидної смоли. Ефективний модуль пружності з моделі підтверджено наявними експериментальними результатами та виявлені гарні збіги. Результати показують, що збільшення довжини ВНТ, кількості шарів ВНТ, модуля міжпросторового зсуву між сусідніми шарами ВНТ і процентного обсягу ВНТ призводить до збільшення ефективного модуля пружності. Встановлено, що ефективний модуль пружності десятишарового композиту ВНТ/епоксидної смоли досягає 152 ГПа при напівдовгому ВНТ, де процентний вміст ВНТ 8200 нм та 14,5% відповідно. Це також показує, що, хоча композити з одношаровими вуглецевими нанотрубками (ОШВНТ) мають чудову передачу навантаження, ОШВНТ демонструють більш слабку армуючу здатність, ніж їх аналоги - багатшарові ВНТ.

У статті [3] описується мікромеханічний підхід з використанням методу скінченних елементів для оцінки ефективного модуля пружності композитів, армованих одношаровими вуглецевими нанотрубками. Ці композитні матеріали складаються з орієнтованих вуглецевих нанотрубок, які рівномірно розподілені в матриці. Грунтуючись на мікромеханічній теорії, модуль пружності нанокompозита оцінюється шляхом розгляду, як типового циліндричного елемента. У середині представницького елемента обсягу арматура моделюється відповідно до її атомістичної мікроструктури, а матриця моделюється як суцільне середови-

ще. Скінченні елементи на основі пружин використовуються для моделювання дискретної геометричної структури та поведінки кожної одношарової вуглецевої нанотрубки. Умови передачі навантаження між вуглецевими нанотрубками і матрицею моделюються за допомогою сполучних елементів зі змінною жорсткістю, які з'єднують два матеріали, моделюючи міжфазну область. Запропонована модель була протестована чисельно та отримані результати для змінних значень жорсткості елементів з'єднання. Вплив кордону розділу на характеристики композиту досліджено для різних об'ємних часток. Чисельні результати порівнюються з експериментальними і аналітичними прогнозами.

В статті [4] розглядається вплив на модуль пружності утворення Al_4C_3 в формуванні вуглецевої нанотрубки (ВНТ) - Al для композитів з алюмінієвою матрицею. Цей вплив було проаналізовано з використанням моделей та методом скінченних елементів (МСЕ), що включають різні об'ємні частки ВНТ та міжфазні шари Al_4C_3 різної товщини. Армування моделювалося з напівсферичними торцевими заглушками та без них, які характерні для ВНТ. Результати показали, що модуль пружності композитів значно збільшується із збільшенням об'ємної частки ВНТ, в той час як збільшення товщини шару Al_4C_3 викликає невелике збільшення модуля пружності. Це може бути пов'язано із комбінованим ефектом посилення ВНТ. Включення ВНТ з напівсферичними торцевими заглушками в модель МСЕ знижує розрахунковий модуль пружності. Результати, представлені в цій роботі, продемонстрували важливість вибору моделі для аналізу механічної поведінки композитів.

У дослідженні [5] механічні властивості вуглецевого волокна, скловолокна та арамідних двовимірних трубчастих плетених композитів (ТПК) були оцінені та зіставлені при навантаженні, розтягуванні та крутінні. Теорія плоского напруженого стану досліджувала механізм руйнування плетіння.

Механічні властивості та поведінка при пошкодженні композитного вуглецево-епоксидного тканого матеріалу при розтягуванні та стисненні в площині вивчаються на мезомасштабному рівні за допомогою експериментів та моделювання. В статті [6] пропонується ефективний метод моделювання елемента представницького об'єму з скінчено-елементною моделлю з високою об'ємною часткою пряжі та реалістичною геометрією. Для трьох компонентів - пряжі, матриці та кордонів представницького об'єму - встановлені основні закони матеріалу з пластичністю, асиметрією розтягування-стиснення і еволюцією пошкоджень. Спостерігаються істотно різні механічні властивості та еволюція пошкоджень в залежності від умов навантаження і вихідних геометричних характеристик. На ньому показана нелінійна крива напруги та деформації з чіткою перехідною областю та інтенсивним пошкодженням при розтягуванні, в той час як при стисненні спостерігається квазілінійну поведінку аж до руйнування з невеликим пошкодженням до остаточного руйнування. Більш того, в порівнянні з постій-

ним коефіцієнтом Пуассона при деформації під час стиску, при розтягуванні виникає різке збільшення коефіцієнта Пуассона. Моделювання показує механізми пошкодження, включаючи поперечне пошкодження, пошкодження матриці та розшарування, які відіграють вирішальну роль в еволюції властивостей. Зокрема, швидке накопичення пошкоджень після пружної деформації руйнує міцні зв'язки і викликає легку деформацію поперечних ниток, що призводить до переміщення області та найбільшого коефіцієнта Пуассона при розтягуванні. Вся механічна поведінка і еволюція ушкоджень добре фіксуються та пояснюються за допомогою поточної моделі елемента представницького об'єму.

У дослідженні [7] вивчався вплив натягу волокна на деформацію пластин з вуглецевого композиту, які використовують як компоненти дзеркальної поверхні космічних радіотелескопів. Застосовуючи стандартні рівняння теорії композитів, було розроблено аналітичну модель напружено-деформованого стану вуглецевих композитних пластин з урахуванням розтягування волокон і термічних напружень. Результати експериментів, проведених на квадратних пластинах, виготовлених з вуглецевих композиційних матеріалів, добре узгоджуються з передбаченнями запропонованої моделі. Натяг волокна вуглецевого композиту було проаналізовано для різних композитних структур. Результати показали, що високі рівні натягу волокон в вуглецевому композиті знижують ступінь деформації композитної структури.

В роботі [8] вивчено можливість застосування різних методів вимірювання деформації вуглецевих/епоксидних ламінатів при квазістатичних та втомних навантаженнях. На ламінати, випробувані під кутами 0° , 45° , 60° , 90° та $\pm 45^\circ$, були застосовані тензодатчики, механічні екстензометри, системи кореляції цифрових зображень та 2-мірні камери. Крім того, зміщення, зареєстровані серво-гідролічним поршнем, контролювалися та порівнювалися з методами вимірювання локальної деформації. Обговорюються типові приклади, що ілюструють характеристики та обмеження кожного методу квазістатичних випробувань і випробувань на втому. Представлено вплив відповідного методу вимірювання деформації, поверхні зразка, напрямлення волокон і процесів в зразках під час випробувань на зареєстроване поведінку деформації та розрахункову жорсткість. Дано рекомендації по точному виміру деформації анізотропних ламінатів на основі отриманих результатів.

У роботі [9] представлена методологія отримання фізично обґрунтованих моделей багатошарових композитних конструкцій з використанням комбінації модального аналізу, чисельного моделювання та повнення параметрів, уникаючи загальних невизначеностей при побудові аналогічних числових моделей. Більш того, ця модель встановлює базову лінію (вихідну ситуацію) динамічної поведінки набору композитних пластин. Отже, вона може застосовуватися для оцінки стану або контролю якості виробництва існуючих конструкцій за допомогою неруйнівного моніторингу стану конструкцій, яка може допомогти виявити

деградацію або дефекти композитних компонентів. Для отримання цих значень була проведена велика експериментальна робота по модальному аналізу набору вуглецево-епоксидних ламінатів. Модальні характеристики, отримані чисельно за допомогою моделі методу скінченних елементів (МСЕ) на основі довідкових даних виробника, порівнювали з експериментальними результатами.

Постановка задачі. Для того, щоб провести розрахунково-експериментальні дослідження, визначити механічні властивості вуглепластика, було виготовлено зразки для випробувань з десяти шарового листу вуглепластику, розміром $1000 \times 250 \times 2$ мм. Кожен із шарів листа має вид полотняного плетіння, нитка основи та нитка утка в якому, перекривають одна одну, а також кожна пара системних ниток перпендикулярна одна одній. Також, полотняне плетіння є одним із основним і найпростішим видом. Тканина може бути легко оброблена, завдяки гарному співвідношенню розмірів та мінімального зносу волокон при різанні, що підходить для виготовлення великих плоских поверхонь [10,11]. Полотняне плетіння вуглепластику зображено на рис. 1.



Рисунок 1 – Полотняне плетіння вуглепластику

Зразки були розташовані на схемі таким чином, щоб отримати по дев'ять зразків з листа вуглепластика у трьох напрямках: основи (під кутом 0°), утку (під кутом 90°) та під кутом 45° . Розмір отриманих зразків становить $250 \times 25 \times 2$ мм, згідно до міждержавних стандартів випробування на розтягнення. [12]. Схема за якою були виготовлені та вирізані зрізки, наведена на рис. 2. Групи зразків зображені на рис. 3. Параметри даних зразків наведені в таблиці 1.

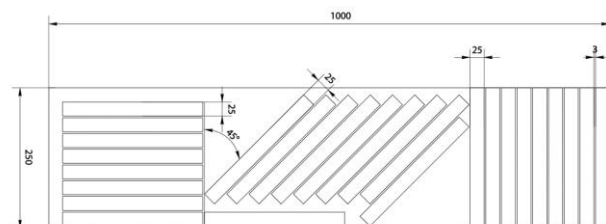


Рисунок 2 – Схема виготовлення зразків для випробувань

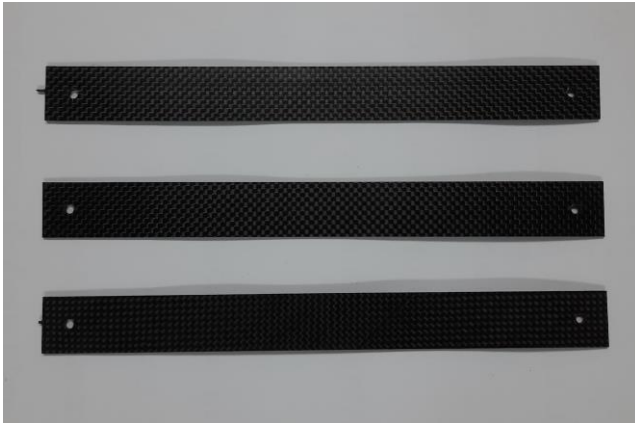


Рисунок 3 – Зразки вуглепластику за трьома напрямками

Таблиця 1 – Параметри зразків

Параметр	Значення
Довжина робочої частини, l , мм	250
Ширина, b , мм	25
Товщина, h , мм	2
Площа перетину, F , мм ²	50
Густина, ρ , кг/м ³	1360

При виконанні експерименту використовувалась, установка для випробувань на розтяг, яка зображена на рис. 4. Навантаження зразків при розтягуванні здійснювалось із використанням клинових захоплень.



Рисунок 4 – Установка для випробувань

Зусилля вимірювалось за допомогою тензодатчика Keli Def (рис. 5), що має S-подібну форму, які виготовляються з алюмінію та легованої нержавіючої сталі. S-образні тензодатчики сили при розтягуванні та стисненні можуть використовуватися в верстатах з виробництва кабелів, тканин та волокон для контролю сили натягу цих матеріалів. Тензодатчик з'єднаний з вимірювальним блоком Keli Ukraine XK3118T16 (рис. 6), на екран якого виводяться значення зусиль.



Рисунок 5 – Тензодатчик Keli Def



Рисунок 6 – Вимірювальний блок Keli Ukraine XK3118T16

Для визначення деформації зразків використовувався екстензометр Epsilon 3542. Даний екстензометр застосовується для осьового розтягування, стиснення та циклічних випробувань. Визначає деформацію при розтягуванні та стисненні, яка виводиться на екран персонального комп'ютера. Екстензометри моделі 3542 розроблені для проведення випробувань широкого ряду матеріалів, включаючи металеві матеріали та сплави, полімерні, композиційні та керамічні матеріали.

Для дослідження динамічних властивостей зразків вуглепластику, було використано вібростенд. Щоб виміряти амплітуду віброприскорень, було використано два датчика ADXL335. Перший датчик був встановлений на вібростенді, другий на зразку [13].

Визначення пружних властивостей. Під час досліду, для визначення пружних властивостей вуглепластика, кожен із зразків був навантажений двічі. сили навантаження яких складали: при першому 980 Н, а другому – 1960 Н, а напруження становлять $1,95 \times 10^7$ Па та $3,9 \times 10^7$ Па, відповідно. Дане навантаження було повторно проведене для кожного напрямку. Кількість повторів досліду для кожного зразка, складалась із десяти циклів. Дана кількість повторів (циклів) необхідна для подальшої статистичної обробки результа-

тів. Результати отриманих деформацій зразків, при циклічному навантаженні наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Деформація зразків

Напрямок, °	Сила, N (Н)	Напруження, σ (Па)	Деформація, ε (м/м)									
			Цикл №1	Цикл №2	Цикл №3	Цикл №4	Цикл №5	Цикл №6	Цикл №7	Цикл №8	Цикл №9	Цикл №10
0°	980	$1,95 \times 10^7$	$3,30 \times 10^{-4}$	$3,45 \times 10^{-4}$	$3,46 \times 10^{-4}$	$3,42 \times 10^{-4}$	$3,45 \times 10^{-4}$	$3,42 \times 10^{-4}$	$3,42 \times 10^{-4}$	$3,45 \times 10^{-4}$	$3,45 \times 10^{-4}$	$3,41 \times 10^{-4}$
	1960	$3,9 \times 10^7$	$6,89 \times 10^{-4}$	$7,02 \times 10^{-4}$	$6,98 \times 10^{-4}$	$6,97 \times 10^{-4}$	$6,98 \times 10^{-4}$	$6,98 \times 10^{-4}$	$6,97 \times 10^{-4}$	$6,97 \times 10^{-4}$	$6,96 \times 10^{-4}$	$7,01 \times 10^{-4}$
45°	980	$1,95 \times 10^7$	$1,28 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,31 \times 10^{-3}$	$1,31 \times 10^{-3}$	$1,31 \times 10^{-3}$
	1960	$3,9 \times 10^7$	$2,65 \times 10^{-3}$	$2,71 \times 10^{-3}$	$2,72 \times 10^{-3}$	$2,72 \times 10^{-3}$	$2,72 \times 10^{-3}$	$2,70 \times 10^{-3}$	$2,73 \times 10^{-3}$	$2,74 \times 10^{-3}$	$2,71 \times 10^{-3}$	$2,70 \times 10^{-3}$
90°	980	$1,95 \times 10^7$	$3,67 \times 10^{-4}$	$3,65 \times 10^{-4}$	$3,67 \times 10^{-4}$	$3,68 \times 10^{-4}$	$3,64 \times 10^{-4}$	$3,62 \times 10^{-4}$	$3,62 \times 10^{-4}$	$3,60 \times 10^{-4}$	$3,57 \times 10^{-4}$	$3,58 \times 10^{-4}$
	1960	$3,9 \times 10^7$	$7,47 \times 10^{-4}$	$7,52 \times 10^{-4}$	$7,45 \times 10^{-4}$	$7,47 \times 10^{-4}$	$7,43 \times 10^{-4}$	$7,42 \times 10^{-4}$	$7,30 \times 10^{-4}$	$7,36 \times 10^{-4}$	$7,37 \times 10^{-4}$	$7,35 \times 10^{-4}$

За отриманими результатами експерименту, було розраховано модуль пружності та проведена статистична обробка за трьома напрямками.

Модуль пружності був розрахований за формулою (1), за формулою (2) було встановлено напруження [14]:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma = N / F \quad (2)$$

де E – модуль пружності;

σ – напруження;

ε – деформація;

N – сила навантаження;

F – площа перетину зразка (табл. 1).

Щоб знизити похибку результатів, було проведено статистичну обробку. Розраховано математичне очікування (3), дисперсію (4) та середнє квадратичне відхилення (5) модуля пружності:

$$M[n] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i \quad (3)$$

$$D[n] = M[n^2] - M^2[n] \quad (4)$$

$$S[n] = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (n_i - M[n])^2} \quad (5)$$

де $M[n]$ – математичне очікування;

$D[n]$ – дисперсія;

$S[n]$ – середнє квадратичне відхилення;

n_i – значення модуля пружності в i -тому експерименті;

N – кількість зразків.

Результати статистичної обробки наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Статистична обробка модуля пружності за трьома напрямками

Зразки	Мат. Очікування, E (Па)	Дисперсія, E (Па) ²	СКВ E , (Па)
--------	---------------------------	----------------------------------	----------------

Під кутом 0°	$5,68 \times 10^{10}$	$3,03 \times 10^{17}$	$5,50 \times 10^8$
Під кутом 45°	$1,47 \times 10^{10}$	$0,63 \times 10^{17}$	$2,50 \times 10^8$
Під кутом 90°	$5,34 \times 10^{10}$	$3,03 \times 10^{17}$	$5,50 \times 10^8$

Демпфуючі властивості вуглепластику (метод Оберста). Для оцінки демпфуючих властивостей вуглепластика, було використано метод Оберста [15]. Мета проведення дослідження даним методом передбачає побудову амплітудно-частотної характеристики. Зразок має бути жорстко затиснутий з одного краю, в якому збуджуються гармонічні коливання (в діапазоні 20 – 1000 Гц). Коефіцієнт механічних втрат (КМВ) – параметр, що вводиться для оцінки ефективності демпфірування матеріалу та розраховується за формулою (6). Схема обробки АЧХ зображена на графіку на рис.7.

$$\eta_i = \frac{\Delta f_i}{f_i} \quad (6)$$

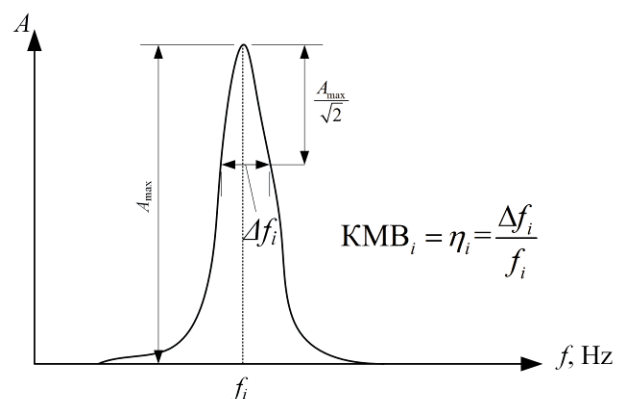


Рисунок 7 – Коефіцієнт механічних втрат (КМВ)

Результати експериментальних досліджень власних частот та коефіцієнта механічних втрат кожного із зразків наведені в таблицях 4-6. В таблиці 4 наведені результати для зразків у напрямку основи, в табл. 5-утку, а в табл. 6 – під кутом 45°.

Відповідні графіки зображені на рисунках 8-10.

Таблиця 4 – Результати досліджень зразків у напрямку основи

Зразок, №		Кількість проведених експериментів (циклів)					Середнє
		Цикл, №1	Цикл, №2	Цикл, №3	Цикл, №4	Цикл, №5	
1	Частота, Гц	30	30	30	30	30	30
	КМВ	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
2	Частота, Гц	31	31	31	31	31	31
	КМВ	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
3	Частота, Гц	30	30	30	30	30	30
	КМВ	0,058	0,056	0,057	0,057	0,057	0,057
4	Частота, Гц	30	30	30	30	30	30
	КМВ	0,054	0,055	0,056	0,056	0,056	0,0554
5	Частота, Гц	31	31	31	31	31	31
	КМВ	0,047	0,048	0,048	0,049	0,049	0,0482
6	Частота, Гц	31	31	31	31	31	31
	КМВ	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029	0,029
7	Частота, Гц	31	32	32	32	32	31,8
	КМВ	0,113	0,113	0,112	0,113	0,116	0,1134
8	Частота, Гц	32	32	32	32	32	32
	КМВ	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
9	Частота, Гц	30	30	30	30	30	30
	КМВ	0,060	0,060	0,059	0,059	0,059	0,0594

Таблиця 5 – Результати досліджень зразків у напрямку утку

Зразок, №		Кількість проведених експериментів (циклів)					Середнє
		Цикл, №1	Цикл, №2	Цикл, №3	Цикл, №4	Цикл, №5	
1	Частота, Гц	33	33	33	33	33	33
	КМВ	0,045	0,048	0,049	0,050	0,050	0,0484
2	Частота, Гц	32	32	32	32	32	32
	КМВ	0,063	0,062	0,064	0,064	0,065	0,0636
3	Частота, Гц	34	34	34	34	34	34
	КМВ	0,054	0,052	0,051	0,051	0,050	0,0516
4	Частота, Гц	33	33	33	33	33	33
	КМВ	0,039	0,040	0,058	0,040	0,041	0,0436
5	Частота, Гц	33	33	33	33	33	33
	КМВ	0,043	0,040	0,041	0,041	0,042	0,0414
6	Частота, Гц	31	31	31	31	31	31
	КМВ	0,057	0,061	0,069	0,070	0,071	0,0656
7	Частота, Гц	33	33	33	33	33	33
	КМВ	0,043	0,046	0,053	0,051	0,061	0,0508
8	Частота, Гц	33	33	33	34	34	33,4
	КМВ	0,057	0,063	0,072	0,073	0,070	0,067
9	Частота, Гц	35	35	35	35	35	35
	КМВ	0,167	0,173	0,178	0,183	0,180	0,1762

Таблиця 6 – Результати досліджень зразків у напрямку під кутом 45°

Зразок, №		Кількість проведених експериментів (циклів)					Середнє
		Цикл, №1	Цикл, №2	Цикл, №3	Цикл, №4	Цикл, №5	
1	Частота, Гц	17	17	17	17	17	17
	КМВ	0,067	0,060	0,059	0,058	0,057	0,0602
2	Частота, Гц	17	17	17	17	17	17
	КМВ	0,067	0,056	0,062	0,054	0,055	0,0588
3	Частота, Гц	17	17	17	17	17	17
	КМВ	0,079	0,069	0,070	0,066	0,065	0,0698
4	Частота, Гц	17	17	17	17	17	17
	КМВ	0,083	0,074	0,072	0,070	0,070	0,0738
5	Частота, Гц	17	17	17	17	17	17
	КМВ	0,059	0,054	0,054	0,054	0,053	0,0548
6	Частота, Гц	17	17	17	17	17	17
	КМВ	0,062	0,056	0,057	0,055	0,055	0,057
7	Частота, Гц	17	17	17	17	17	17
	КМВ	0,074	0,059	0,060	0,060	0,060	0,0626
8	Частота, Гц	17	17	17	17	17	17
	КМВ	0,074	0,064	0,063	0,063	0,062	0,0652
9	Частота, Гц	17	17	17	17	17	17
	КМВ	0,063	0,058	0,058	0,056	0,057	0,0584

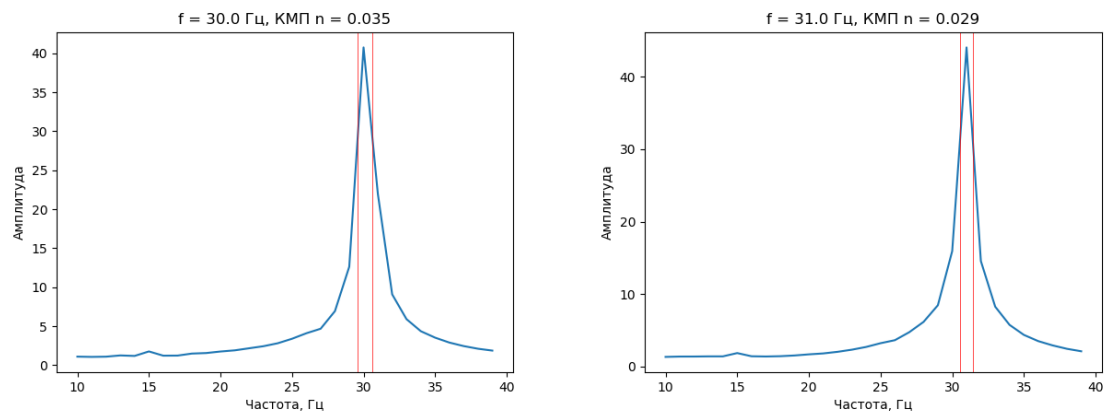


Рисунок 8 – Амплітудно-частотні характеристики першого та п'ятого зразка у напрямку основи на першій резонансній частоті

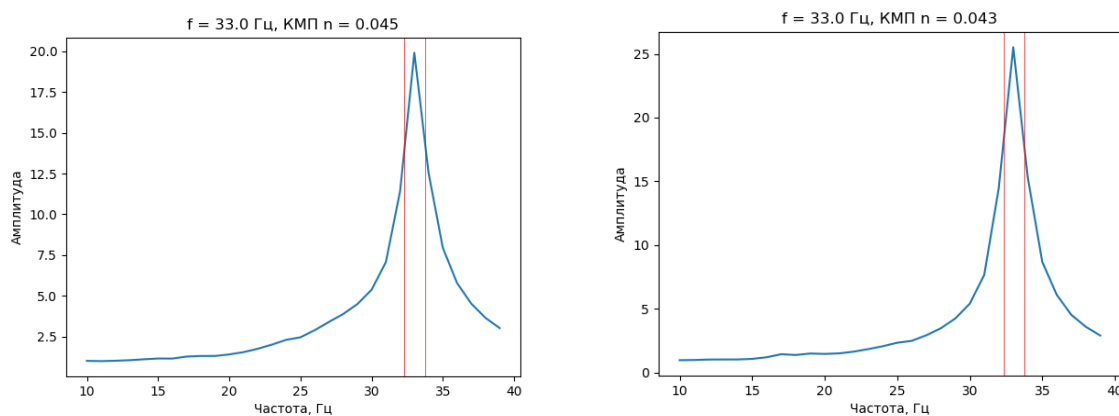


Рисунок 9 – Амплітудно-частотні характеристики першого та п'ятого зразка у напрямку утка на першій резонансній частоті

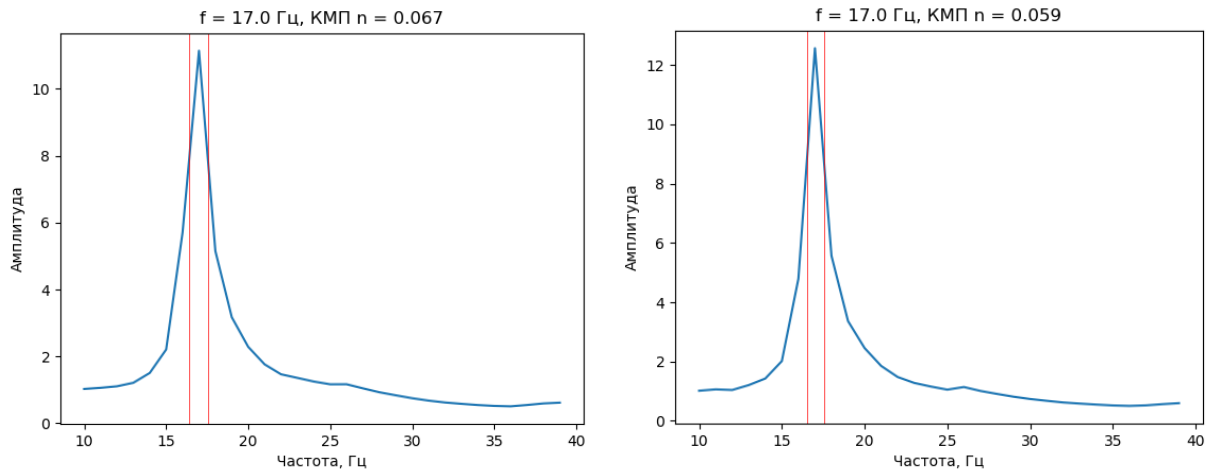


Рисунок 10 – Амплітудно-частотні характеристики першого та п'ятого зразка під кутом 45 ° на першій резонансній частоті

Чисельні дослідження характеристик зразків. Для підтвердження експериментальних даних проведено розрахункові дослідження з використовуючи метод скінченних елементів (МСЕ).

В ході перевірки моделі та отриманих експериментальних даних, було побудовано геометричну модель та скінченно-елементну сітку моделі зразка вуглепластику. Геометрична модель зображена на рис.11, скінченно-елементна сітка моделі зображена на рис. 12. На краю зразка, з однієї із сторін було встановлено жорстке защемлення.

На основі скінчено-елементної моделі зразка, проведено розрахунок власних частот та форм коливань. Для розрахунку та підтвердження експериментальних даних модуля пружності, було використано дані із таблиці 3.

Отримані результати в ході чисельного розрахунку значень власних частот та результати експериментальними даних наведені в табл. 7.

Форми коливань кожних із зразків наведені на рис. 13-15.

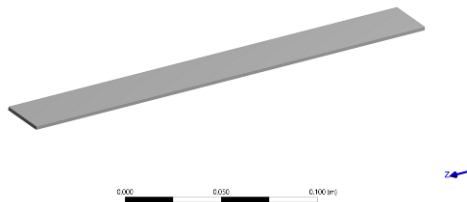


Рисунок 11 – Геометрична модель зразка вуглепластика

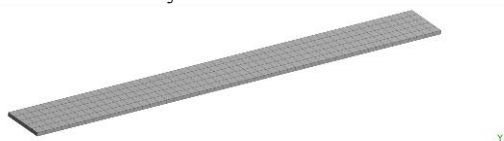
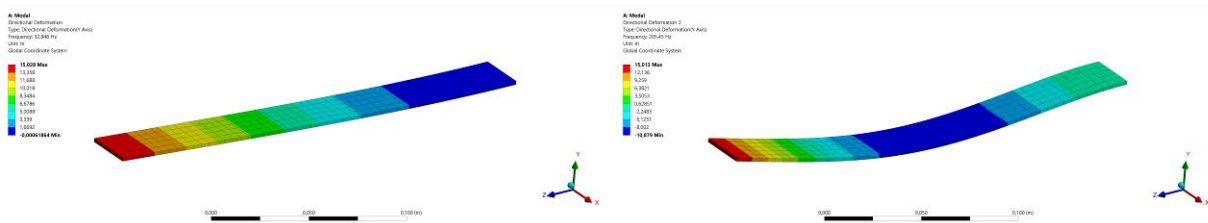


Рисунок 12 – Скінченно-елементна сітка моделі зразка вуглепластика

Таблиця 7 – Розрахункові та експериментальні частоти коливань

Напрямок зразків, °	Розрахункова частота, Гц	Експериментальна частота, Гц	Відхилення, %
0°	31	32,846	6%
45°	17	16,736	2%
90°	33	31,85	3%

Із результатів таблиці 7 помітно, що відхилення між першими частотами зразків, для кожного напрямку є незначним. Це означає, що отримані експериментальні дані, модуля пружності, підтверджують достовірність чисельних результатів.



А - 32,846 Гц

Б – 205,45 Гц

Рисунок 13 – Розрахункова перша (А) та друга (Б) власна частота та форма коливань зразків у напрямку основи (0°)

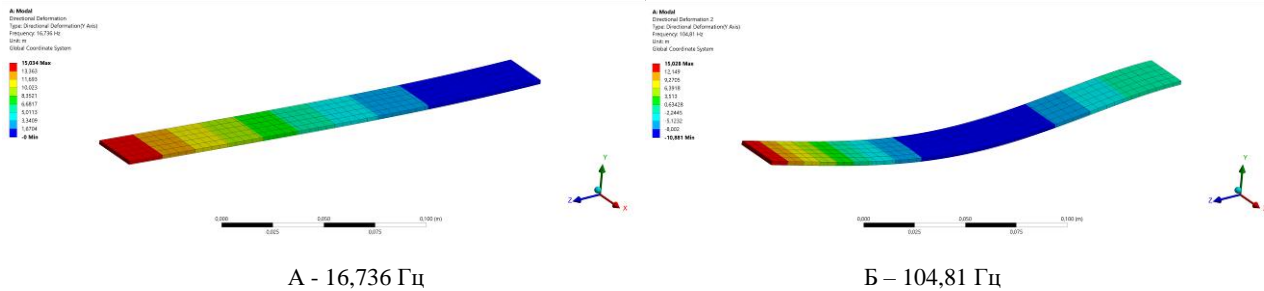


Рисунок 14 – Розрахункова перша (А) та друга (Б) власна частота та форма коливань зразків у напрямку 45°

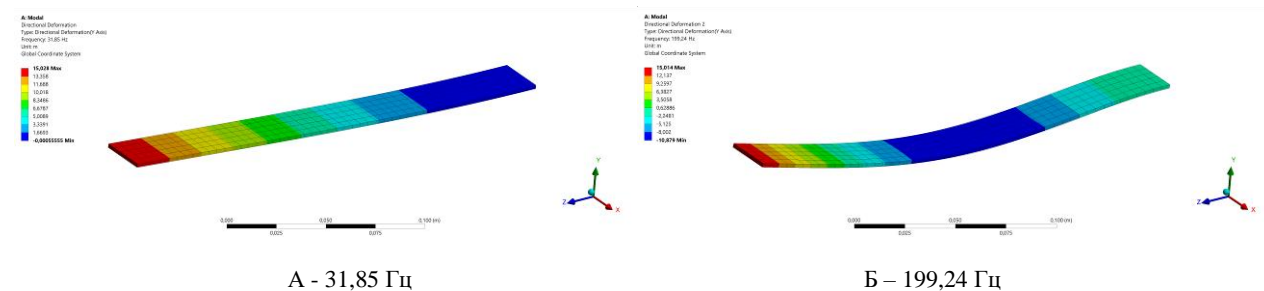


Рисунок 15 – Розрахункова перша (А) та друга (Б) власна частота та форма коливань зразків у напрямку утка (90°)

Розрахунки для кожного напрямку проводились ґрунтуючись на усереднених характеристиках.

З аналізу можна побачити, що процент відхилення для зразків у напрямку утка та під кутом 45° є найменшим. Власні частоти в напрямках основи та утка майже співпадають.

Висновки. В ході даного експериментального дослідження при розтягненні зразків було визначено модуль пружності десяти шарового плетеного вуглепластику, розраховано статистичні дані, такі як: математичне очікування, дисперсія та середнє квадратичне відхилення модуля пружності за трьома напрямками.

Експериментальним шляхом отримано власні частоти та розраховано коефіцієнт механічних втрат для кожного зразку. Розроблено геометричну та скінченно-елементну модель. Проведено розрахункові дослідження власних частот та форм коливань зразків вуглепластика.

Розрахункова частота зразків для кожного напрямку, співпадає з експериментальною частотою із незначним відсотком відхилення. Це показує гарне кількісне та якісне співвідношення отриманих результатів дослідження. Зразок напрямком волокон якого знаходиться під кутом 45° , демонструє кращий збіг з експериментальними даними.

Список літератури

1. Corrine Ying Xuan Chua, Hsuan-Chen Liu, Nicola Di Trani, Antonia Susnjar, Jeremy Ho, Giovanni Scorrano, Jessica Rhudy, Antons Sizovs, Graziano Lollo, Nathanael Hernandez, Maria Concetta Nucci, Roberto Cicalo, Mauro Ferrari, Alessandro Grattoni. Carbon fiber reinforced polymers for implantable medical devices - Biomaterials Volume 271, April 2021
2. N.V.Viet, Q.Wang, W.S.Kuo. Effective Young's modulus of carbon nanotube/epoxy composites - Volume 94, 1 June 2016, Pages 160-166
3. G.I.Giannopoulos, S.K.Georgantzinis, N.K.Anifantis. A

semi-continuum finite element approach to evaluate the Young's modulus of single-walled carbon nanotube reinforced composites - Volume 41, Issue 8, December 2010, Pages 594-601

4. I.Alfonso, O.Navarro, J.Vargas, A.Beltrán, C.Aguilar, G.González, I.A.Figueroa. FEA evaluation of the Al4C3 formation effect on the Young's modulus of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites - Volume 127, 1 September 2015, Pages 420-425

5. Abbas Armanfard, Garrett W.Melenka. Experimental evaluation of carbon fibre, fibreglass and aramid tubular braided composites under combined tension-torsion loading - Volume 269, 1 August 2021, 114049

6. Guowei Zhou, Qingping Sun, Dayong Li, Zhaoxu Meng, Yinghong Peng, Zhangxing Chen, Danielle Zeng, Xuming Su. Meso-scale modeling and damage analysis of carbon/epoxy woven fabric composite under in-plane tension and compression loadings - Volume 190, 15 January 2021, 105980

7. Olga Bitkina, Jang-Ho Lee, Elena Darlington. Effect of fiber tension on the deformation of a carbon composite plate for space radio telescopes - Volume 45, September 2015, Pages 99-103

8. Julia Brunbauer, Gerald Pinter. On the strain measurement and stiffness calculation of carbon fibre reinforced composites under quasi-static tensile and tension-tension fatigue loads - Volume 40, December 2014, Pages 256-264

9. M.Cuadrado, J.A.Artero-Guerrero, J.Pernas-Sánchez, D.Varas. Model updating of uncertain parameters of carbon/epoxy composite plates from experimental modal data - Volume 455, 1 September 2019, Pages 380-401

10. П.И. Богомолов, И.А. Козлов, М.А. Буруля. Обзор современных технологий изготовления объемно-армирующих преформ для перспективных композиционных материалов. - 2017.

11. M.H. Aliabadi. Computational and Experimental Methods in Structures: Volume 6 "Woven Composites" - April 2015

12. ГОСТ 32656-2017 (ISO 527:4-1997, ISO 527:5:2009) Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжения.

13. М.С. Богатир, О.О. Водка, І.В. Задорожний, О.М. Ломакін, Г.І. Львов 2020 Розрахунково-експериментальні Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. № 99. 2099

дослідження механічних характеристик композитних матеріалів. - 2020

14. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. - 1982

15. Oberst, H. and Frankenfled, K., "Über die Dämpfung dünner Bleche durch festhaltende Belage," *Acustica*, 1952, Vol 2, Leaflet 4, AB 181-194 (Part 1), and 1954, Vol 4, p. 433 (Part 2).

References (transliterated)

1. Corrine Ying Xuan Chua, Hsuan-Chen Liu, Nicola Di Trani, Antonia Susnjar, Jeremy Ho, Giovanni Scorrano, Jessica Rhudy, Antons Sizovs, Graziano Lolli, Nathanael Hernandez, Maria Concetta Nucci, Roberto Cicalo, Mauro Ferrari, Alessandro Grattoni. Carbon fiber reinforced polymers for implantable medical devices - *Biomaterials* Volume 271, April 2021

2. N.V.Viet, Q.Wang, W.S.Kuo. Effective Young's modulus of carbon nanotube/epoxy composites - Volume 94, 1 June 2016, Pages 160-166

3. G.I.Giannopoulos, S.K.Georgantzinos, N.K.Anifantis. A semi-continuum finite element approach to evaluate the Young's modulus of single-walled carbon nanotube reinforced composites - Volume 41, Issue 8, December 2010, Pages 594-601

4. I.Alfonso, O.Navarro, J.Vargas, A.Beltrán, C.Aguilar, G.González, I.A.Figueroa. FEA evaluation of the Al4C3 formation effect on the Young's modulus of carbon nanotube reinforced aluminum matrix composites - Volume 127, 1 September 2015, Pages 420-425

5. Abbas Armanfard, Garrett W.Melenka. Experimental evaluation of carbon fibre, fibreglass and aramid tubular braided composites under combined tension-torsion loading - Volume 269, 1 August 2021, 114049

6. Guowei Zhou, Qingping Sun, Dayong Li, Zhaoxu Meng, Yinghong Peng, Zhangxing Chen, Danielle Zeng, Xuming Su. Meso-scale modeling and damage analysis of carbon/epoxy woven fabric composite under in-plane tension and compression

loadings - Volume 190, 15 January 2021, 105980

7. Olga Bitkina, Jang-Ho Lee, Elena Darlington. Effect of fiber tension on the deformation of a carbon composite plate for space radio telescopes - Volume 45, September 2015, Pages 99-103

8. Julia Brunbauer, Gerald Pinter. On the strain measurement and stiffness calculation of carbon fibre reinforced composites under quasi-static tensile and tension-tension fatigue loads - Volume 40, December 2014, Pages 256-264

9. M.Cuadrado, J.A. Artero-Guerrero, J. Pernas-Sánchez, D.Varas. Model updating of uncertain parameters of carbon/epoxy composite plates from experimental modal data - Volume 455, 1 September 2019, Pages 380-401

10. P.I. Bogomolov, I.A. Kozlov, M.A. Birulya. Review of modern technologies for the manufacture of volume-reinforcing preforms for advanced composite materials. - 2017.

11. M.H. Aliabadi. Computational and Experimental Methods in Structures: Volume 6 "Woven Composites" - April 2015

12. GOST 32656-2017 (ISO 527: 4-1997, ISO 527-5: 2009) Polymer composites. Test methods. Tensile tests.

13. M.S. Bohaty, O.O. Vodka, I.V. Zadorozhny, O.M. Lomakin, G.I. Lvov. Computational and experimental studies of mechanical properties of composite materials. - 2020

14. Samul V.I. Foundations of the theory of elasticity and plasticity. - 1982

15. Oberst, H. and Frankenfled, K., "Über die Dämpfung dünner Bleche durch festhaltende Belage," *Acustica*, 1952, Vol 2, Leaflet 4, AB 181-194 (Part 1), and 1954, Vol 4, p. 433 (Part 2).

Поступила (received) 15.12.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Богатир Михайло Сергійович (Богатырь Михаил Сергеевич, Mykhailo Bohaty) – аспірант кафедри «Динаміка та міцність машин» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-68-79; e-mail: mbogaty@outlook.com

Водка Олексій Олександрович (Водка Алексей Александрович, Oleksii O. Vodka) – доцент, кандидат технічних наук, завідувач кафедри «Динаміка та міцність машин» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-69-75; e-mail: oleksii.vodka@gmail.com

Львов Геннадій Іванович (Львов Геннадий Иванович, Gennadiy I. Lvov) – професор, доктор технічних наук, професор кафедри «Динаміка та міцність машин» НТУ «ХПІ», тел. (057) 707-63-43; e-mail: lvovdpm@ukr.net

Чепелюк Олександр Олександрович (Чепелюк Александр Александрович, Chepeliuk Oleksandr Oleksandrovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: chep1@i.ua.