

М. Р. ТКАЧ¹, Ю. М. ГАЛИНКІН¹, І. Ю. ЖУК², А. А. МОНАХОВ¹,
С. М. ДОЦЕНКО¹, О. О. КОСТРИКОВ¹

¹ Національний університет кораблебудування, Миколаїв, Україна

² Чорноморський державний університет імені Петра могили, Миколаїв, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ТА РОЗРАХУНКОВЕ ВИЗНАЧЕННЯ ФОРМ ВЛАСНИХ КОЛИВАНЬ ПОЛІМЕРНОГО ВИРОБУ

У сучасному машинобудуванні широко розповсюджені вироби з неметалічних матеріалів, низька вартість і широкий спектр властивостей обумовили велике різноманіття використання таких матеріалів при створенні різних деталей. Серед геометричних форм деталей зустрічаються різні конфігурації, в тому числі й циліндрична. Це можуть бути різного роду втулки, поршині, труби та таке інше. Вироби з неметалічних матеріалів часто працюють в умовах високих динамічних навантажень, піддаються різного роду вібраціям, що робить актуальним визначення параметрів динамічного навантаження. До таких параметрів насамперед відносяться форми власних коливань і відповідні ним частоти. Об'єктом дослідження є полімерний виріб у вигляді січеного конуса діаметром 70,5 мм знизу, та 69,0 мм зверху, висотою 80 мм, товщина стінки 2,2 мм. Метою роботи є визначення власних частот та форм коливань описаного вище виробу. Досягнення мети забезпечено використанням сучасного експериментального методу спекл-інтерферометрії реального часу, який відноситься до оптичних методів неруйнівного контролю та захищений рядом патентів України. Оптична схема експериментального стенду описана в цій публікації, наведено характеристики обладнання та приборів, що використані в складі експериментального стенду. Особливістю даного дослідження є використання безконтактного збудження, коли віброгенеруючий елемент знаходиться поблизу досліджуваного об'єкта, але не торкається його. При цьому коливання передаються через шар повітря, віброзбуджувач не змінює масу досліджуваного об'єкта; як наслідок – відсутнє спотворення форм і зміна частот власних коливань. У діапазоні 0...5 кГц експериментально виявлено одинадцять форм власних коливань, які наведено в цій роботі. При цьому вузлові лінії, що проходять перпендикулярно до осі обертання об'єкта n у досліджуваному діапазоні змінюються від 0 до 2, кількість пар вузлових ліній, що проходять у меридіональному напрямку m , змінюється з 2 до 5. Уточнення кількості форм і підвищення якості ідентифікації виконано в програмному комплексі SolidWorks, що дозволило виявити в зазначеному діапазоні дванадцять форм коливань, що пояснюється недостатньою силою дистанційного збудження саме для невиявленої форми. Не дивлячись на це, середньоквадратичне відхилення між результатами розрахункових та експериментальних досліджень становить 4,2 %, що є прийнятним для використання розробленої моделі в подальших розрахунках.

Ключові слова: форма коливань; частота коливань; полімерний виріб; експериментальні дослідження; комп'ютерне моделювання.

Вступ

Полімерні матеріали широко використовуються в сучасній промисловості у найрізноманітніших напрямках. На сьогодні відома велика кількість неметалічних матеріалів з надзвичайно широким діапазоном властивостей, такими як легкість, висока міцність, гнучкість та низька вартість виробництва. Щорічне світове виробництво пластику складає понад 359 мільйонів тонн [1]. Однією з причин, що сприяє широкому розповсюдженню пластикових виробів є використання швидкого прототипування – процесу, який включає швидке створення фізичних моделей продуктів або компонентів з використанням технології 3D-друку. Два з найчастіше використовуваних

матеріалів для цієї мети – полімолочна кислота (PLA) і акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS). Обидва мають механічні властивості, які роблять їх придатними для широкого застосування в техніці [2].

Однією з розповсюджених форм деталей, що широко розповсюджені є циліндрична, це втулки, ізолятори, поршні і багато інших. Для забезпечення надійності виробів з полімерних матеріалів необхідно враховувати параметри динамічної міцності, неврахування може привести до збільшення ваги, зменшення надійності роботи а іноді й руйнування [3]. Одним з параметрів динамічної міцності є частота власних коливань, та форми власних коливань [5]. У роботі [4] представлено рішення задачі для оболонок, що мають довільну постійну кривизну. Були



[Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

отримані чисельні результати для частот та форм власних коливань трьох типів оболонок: кругової циліндричної, сферичної та гіперболічної парабоїдальної. Відомо про аналітичні методи, що використовуються для визначення частот власних коливань та відповідних форм для ряду граничних умов, відкритих кругових циліндричних оболонок [5]. Також зазначається що окремого розглядання потребують товстостінні циліндричні оболонки [6]. Визначенню вібраційних параметрів неметалічних оболонок присвячені роботи [7, 8]. В роботі [9] наведено особливості проектування виробу (капоту авіадвигуна), спираючись на частотні параметри.

Теоретичне та експериментальне визначення характеристики жорсткості армованої вуглецевим волокном PLA та ABS коробчастої балки, присвячена робота [10], також виконано порівняння з армуванням короткими волокнами. Армування вуглецевим волокном забезпечує зниження амплітуди разом з покращенням демпфувальних властивостей, а також суттєве збільшення як міцності на розтяг, так і міцності на вигин.

Виявлення впливу параметрів тривимірного (3D) друку, таких як висота шару, коефіцієнт заповнення і геометричні параметри (конічний кут) на вібраційну поведінку виробів з поліетилентерефталату (PET-G), надрукованих на 3D-принтері присвячена робота [11]. Власна частота конічних балок, виготовлених плавленням ниток (FFF) PET-G збільшувалася з вищими значеннями швидкості заповнення, хоча жодних критичних змін для висоти шару не спостерігалось, а зміна кута конусності значно коливалася значення частоти власних коливань

Постановка задачі дослідження

Метою роботи є експериментальне та розрахункове визначення частот власних коливань та відповідних їм форм полікарбонатної деталі. Деталь має форму полого січеного конуса діаметром 70,5 мм знизу, та 69,0 мм зверху, висота 80 мм, товщина стінки 2,2 мм, рис. 1.

Експериментальне визначення проведено методом спеклінтерферометрії реального часу [12]. Суть методу полягає в опроміненні досліджуваного об'єкту променем когерентного опромінення (в нашому випадку використаний твердотільний одномодовий лазер довжиною хвилі 532 нм, потужністю 50 мВт), який отримано після оптичного розділення на дві складові. Перша складова опромінення віддзеркалена від досліджуваного об'єкту, та оптичного складена з другою, подрібненою, половиною, яка направлена на об'єкт камери без зміни довжини хвилі. При цьому перший промінь подрібнено мато-

вим склом на велику кількість спеклів. Така організація оптичної схеми дозволяє для кожної локальної одиниці зображення (кожного спеклу) отримувати яскравість, пропорційну різниці фази коливань когерентного опромінення накладених променів на матриці відеокамери. В свою чергу різниця фаз складових когерентного опромінення пропорційна амплітуді коливань досліджуваного об'єкта, оскільки для випадків, коли зміщення дільниці поверхні досліджуваного об'єкта відсутнє, різниця фази коливань когерентного опромінення мінімальна, і яскравість спеклу – максимальна. Для випадків, коли зміщення дільниці досліджуваного об'єкту наближається до половини довжини хвилі когерентного опромінення, у нашому випадку 216 нм, коливання когерентного опромінення оптично складених лазерних променів відбувається у протифазі, при цьому яскравість спеклу мінімальна. Таким чином, на екрані монітору оператора формується зображення досліджуваного об'єкту, яке складено з набору спеклів різної яскравості. При цьому досліджуваний об'єкт піддається впливу частотного сигналу, який задається оператором.

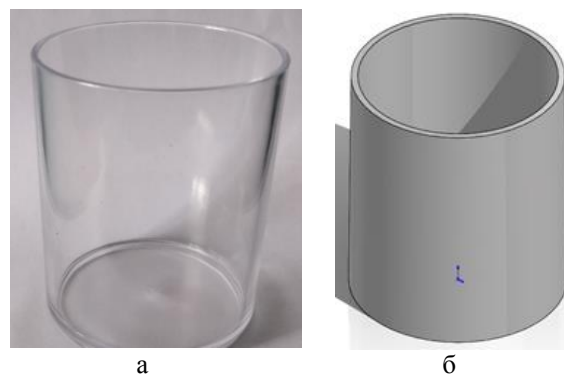


Рис. 1. Досліджуваний об'єкт та його модель:
а – полікарбонатний вироб,
б – твердо тільна модель полі карбонатного виробу

Розроблене програмне забезпечення одночасно з обробкою вхідного сигналу відеокамери, дозволяє контролювати генерацію збуджуючого сигналу у частотному генераторі, підсиленні цього сигналу та передачі його до віброакустичного збуджувача. Особливістю експериментального дослідження полімерного циліндру є використання безконтактного збудження, яке досягнуто шляхом встановлення на близькій відстані (менше 1 мм) віброакустичного джерела, яке механічно не зв'язане з досліджуваним об'єктом, при цьому частотний сигнал передається через повітря, рис. 2.

Використання безконтактного збудження виявило прийнятну якість збудження коливань у діапазоні 0...5 кГц, та дозволило провести визначення частот власних коливань та відповідних їм форм без

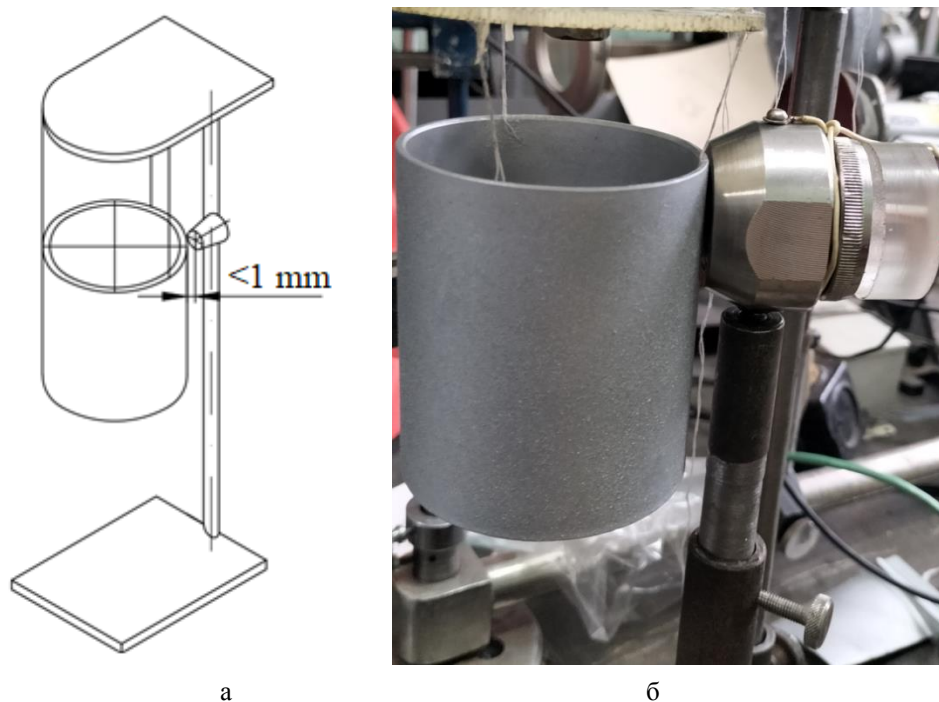


Рис. 2. Розміщення досліджуваного об'єкта на експериментальному стенді:

а – схема розміщення,

б – фото розміщеного на дослідному стенді об'єкта досліджень

зміни маси досліджуваного об'єкту через приєднання, наприклад, п'єзокерамічного збуджувача.

Результатом експериментального дослідження є ряд форм коливань, рис. 3. З рисунку видно, що у діапазоні 0...5 кГц отримано десять форм коливань. При цьому вузлові лінії, що проходять перпендикулярно вісі обертання об'єкту n у досліджуваному діапазоні змінюються від 0 до 2, кількість пар вузлових ліній, що проходять у меридіональному напрямку m , змінюється з 2 до 5, рис. 4.

Для уточнення кількості форм та підвищення якості ідентифікації форм коливань розроблено твердотільну модель досліджуваного об'єкту у програмному комплексі Solidworks, див. рис. 1. У цьому програмному комплексі визначено частоти власних коливань та відповідні їм форми у діапазоні 0...5 кГц методом кінцевих елементів, див. рис. 3. При цьому параметри віртуальної моделі наступні: використуване розбиття – сітка на основі змішаної кривизни, точки Якобіана для сітки високої якості – 16 точок, максимальний розмір елемента 3,73321 мм, мінімальний розмір елемента 3,73321 мм, якість сітки – висока, всього вузлів 17045, всього елементів 8362, максимальне співвідношення сторін 4,3093, елементів із співвідношенням сторін менше трьох – 0 %, відсоток елементів із співвідношенням сторін більше 10 – 0 %. Механічні властивості матеріалу, що використано в розрахунковому дослідженні модуль пружності

2,49 ГПа, коефіцієнт Пуассона 0,44, густина 1100 кг/м³.

Виявлення додаткової форми пояснюється недостатньою якістю збудження саме для цієї конкретної форми з частотою 4747 Гц. Не дивлячись на наявність однієї невиявленої форми, теоретичне моделювання показало високу достовірність теоретичних досліджень, середньоквадратичне відхилення між розрахунковим та експериментальним дослідженням становить 4,2 %, що є прийнятним для використання розробленої моделі в подальших розрахунках.

Слід також додати, що при теоретичному моделюванні власних частот методом кінцевих елементів в програмному комплексі SolidWorks, для кожної форми отримано два значення які відрізняються за частотою менше ніж 1 Гц, при цьому зміщення форми відбувається в окружному напрямку і становить половину кута між найближчими медіальними лініями для кожної форми.

Висновки

У діапазоні 0...5 кГц експериментально виявлено одинадцять форм власних коливань полімерного виробу конічної форми, розрахунково виявлено дванадцять форм коливань. Невиявлення однієї форми пояснюється способом збудження коливань та недостатньою потужністю збудника.

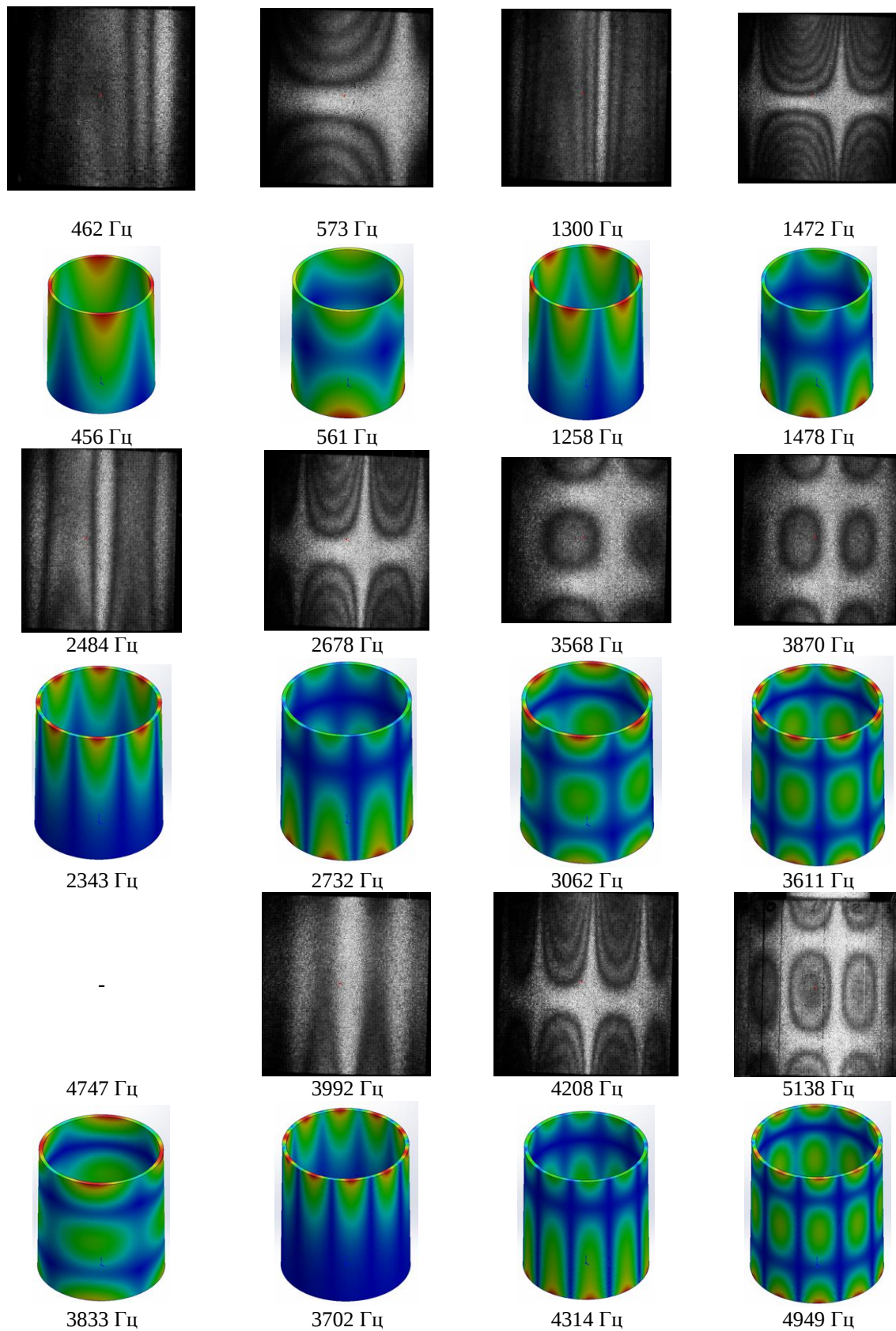


Рис. 3. Форми власних коливань полікарбонатного виробу
(непарні ряди визначено експериментально, парні – отримано шляхом моделювання)

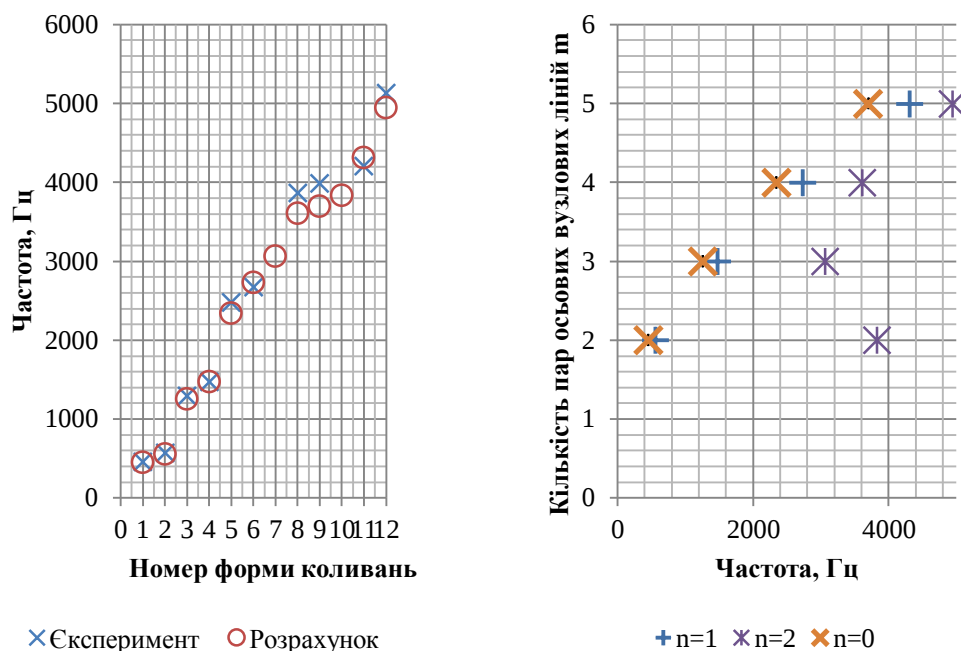


Рис. 4. Класифікація форм власних коливань полікарбонатного виробу

Експериментальне визначення виконано запатентованим методом спеклінтерферометрії реального часу, розрахункове – застосуванням програмного комплексу SolidWorks. Середньоквадратичне відхилення становить 4,2 %.

Це дослідження продемонструвало можливість використання методу спеклінтерферометрії реального часу для неметалічних виробів.

Внесок авторів: формулювання проблеми, організація роботи колективу – **М. Р. Ткач, І. Ю. Жук**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **С. М. Доценко, О. А. Костріков**; розробка дослідницького стенда, проведення експериментальних досліджень – **І. Ю. Жук, А. А. Монахов**; верифікація експериментальних досліджень, аналіз результатів верифікації – **А. А. Монахов, М. Р. Ткач**; моделювання в програмному комплексі SolidWorks – **Ю. М. Галинкін, О. А. Костріков**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Рукопис немає супутніх даних

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували методи штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Pilapitiya, N. T. The world of plastic waste : A review [Text] / N. T. Pilapitiya, & A. S. Ratnayake // *Cleaner Materials*. – 2024. – Vol. 11. – Article no. 100220. doi: 0.1016/j.clema.2024.100220.
2. Study on the free vibration analysis and mechanical behaviour of 3D printed composite I shaped beams made up of short carbon fiber reinforced ABS and PLA materials [Text] / C. Senthamarai Kannan, B. Parthasarathy, S. Surya, & S. T. Rajan // *Materials Today Proceedings*. – 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.141.
3. Murthy, M. Impact of Constraint Conditions and Cutouts on Natural Frequency of Glass Fibre Reinforced Plastic Composite [Text] / M. Murthy, K. M. Babu, & P. M. Jebaraj // *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*. – 2018. – № 3(4). – P. 200-207. doi: 10.26776/ijemm.03.04.2018.04.
4. Leissa, A. W. Vibrations of completely free shallow shells of rectangular planform [Text] / A. W. Leissa, & Y. Narita // *Journal of Sound and Vibration*. – 1984. – Vol. 96, Iss. 2. – P. 207-218. doi: 10.1016/0022-460X(84)90579-0.
5. Yu, S. D. On the accurate analysis of free vibration of open circular cylindrical shells [Text] / S. D. Yu, W. L. Cleghorn, & R. G. Fenton // *Journal of Sound and*

Vibration. – 1995. – Vol. 188, Iss. 3. – P. 315-336. doi: 10.1006/jsvi.1995.0596.

6. Benchmark solution for free vibration of thick open cylindrical shells on Pasternak foundation with general boundary conditions [Text] / Q. Wang, D. Shi, F. Pang, & F. Ahad // *Mechanic*. – 2017. – Vol. 52. – P. 457–482.

7. Free vibration of joined cylindrical–hemispherical FGM shells [Text] / H. Bagheri, Y. Kiani, N. Bagheri, & M. R. Eslami // *Archive of Applied Mechanics*. – 2020. – Vol. 90. – P. 2185–2199. doi: 10.1007/s00419-020-01715-1.

8. Talebitooti, M. Three-Dimensional Free Vibration Analysis and Critical Speed of Pressurized Rotating Functionally Graded Cylindrical Shells [Text] / M. Talebitooti // *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 43. – P. 113–126. doi: 10.1007/S40997-017-0115-Z.

9. Sobhani, E. On vibrational-based numerical simulation of a jet engine cowl shell-like structure [Text] / E. Sobhani, A. R. Masoodia, & Ö. Civalek // *Engineering, Materials Science Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2022. – Vol. 30, Iss. 19. – P. 4016–4027. doi: 10.1080/15376494.

10. Gorman, D. J. Free in-plane vibration analysis of rectangular plates by the method of superposition [Text] / D. J. Gorman // *Journal of Sound and Vibration*. – 2004. – Vol. 272, Iss. 3–5. – P. 831–851. doi: 10.1016/S0022-460X(03)00421-8.

11. Ergene, B. Experimental and finite element analyses on the vibration behavior of 3D-printed PET-G tapered beams with fused filament fabrication [Text] / B. Ergene, G. Atlıhan, & A. Pınar // *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. – 2023. – Vol. 19, № 4. – P. 634–651. doi: 10.1108/MMMS-11-2022-0265.

12. Пат. UA 146326 Україна. Пристрій з підвищеною заводостійкістю для дослідження коливальних конструкцій методом електронної спеклінтерферометрії [Текст] / М. Р. Ткач, Ю. Г. Золотий, А. Ю. Проскурін, Ю. М. Галинкін, І. Ю. Жук, & В. С. Ключник. – № u202006205 ; заявл. 25.09.2020; опубл. 10.02.2021. – Бюл. № 6.

References

1. Pilapitiya, N. T., & Ratnayake A. S. The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 2024, vol. 11, article no. 100220. doi: 10.1016/j.clema.2024.100220.

2. Senthamaraikannan, C., Parthasarathy, B., Surya, S. & Rajan, S. T. Study on the free vibration analysis and mechanical behavior of 3D printed composite I shaped beams made up of short carbon fiber reinforced

ABS and PLA materials. *Materials Today Proceedings*, 2023, Preprint. doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.141.

3. Murthy, M., Babu, K. M., & Jebaraj P. M., Impact of Constraint Conditions and Cutouts on Natural Frequency of Glass Fibre Reinforced Plastic Composite. *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, 2018, No 3(4), pp. 200–207. doi: 10.26776/ijemm.03.04.2018.04.

4. Leissa, A. W., & Narita, Y. Vibrations of completely free shallow shells of rectangular planform. *Journal of Sound and Vibration*, 1984, vol. 96, iss. 2, pp. 207–218. doi: 10.1016/0022-460X(84)90579-0.

5. Yu, S. D., Cleghorn, W. L. & Fenton, R. G. On the accurate analysis of free vibration of open circular cylindrical shells. *Journal of Sound and Vibration*, 1995, vol. 188, iss. 3, pp. 315–336. doi: 10.1006/jsvi.1995.0596.

6. Wang, Q., Shi, D., & Pang, F. Ahad, Benchmark solution for free vibration of thick open cylindrical shells on Pasternak foundation with general boundary conditions. *Mechanic*, 2017, vol. 52, pp. 457–482.

7. Bagheri, H., Kiani, Y., Bagheri, M., N., & Eslami, R. Free vibration of joined cylindrical–hemispherical FGM shells. *Archive of Applied Mechanics*, 2020, vol. 90, pp. 2185–2199. doi: 10.1007/s00419-020-01715-1.

8. Talebitooti, M. Three-Dimensional Free Vibration Analysis and Critical Speed of Pressurized Rotating Functionally Graded Cylindrical Shells. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2019, vol. 43, pp. 113–126. doi: 10.1007/S40997-017-0115-Z.

9. Sobhani, E., Masoodia, A. R., & Civalek, Ö. On vibrational-based numerical simulation of a jet engine cowl shell-like structure. *Engineering, Materials Science Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022, vol. 30, iss. 19, pp. 4016–4027. doi: 10.1080/15376494.

10. Gorman, D. J. Free in-plane vibration analysis of rectangular plates by the method of superposition, *Journal of Sound and Vibration*, 2004, vol. 272, iss. 3–5, pp. 831–851. doi: 10.1016/S0022-460X(03)00421-8.

11. Ergene, B., Atlıhan, G., & Pınar A. Experimental and finite element analyses on the vibration behavior of 3D-printed PET-G tapered beams with fused filament fabrication. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2023, vol. 19, iss. 4, pp. 634–651. doi: 10.1108/MMMS-11-2022-0265.

12. Tkach, M. R., Zoloty`j, Yu. G., Proskurin, A. Yu., Galy`nkin, Yu. M., Zhuk, I. Yu., & Klyuchny`k, V. S. *Prystrij z pidvy`shhenoyu zavadosstijkisty dlya doslidzhennya koly`van` konstrukcij metodom elektronnoyi speklinterferometriyi* [A device with increased interference resistance for studying the vibrations of structures by the method of electronic speckle interferometry]. Patent UA № 146326, 2021. (in Ukrainian).

EXPERIMENTAL AND CALCULATION DETERMINATION THE FORM OF PROPER OSCILLATIONS OF THE POLYMER CYLINDER

*Mykhailo Tkach, Yurii Halynkin, Iryna Zhuk, Andriy Monakhov,
Serhiy Dotsenko, Oleksandr Kostrikov*

In modern mechanical engineering, products made of non-metallic materials are widely used. Their low cost and wide range of properties have led to a wide variety of uses for such materials in the creation of various parts. Among the geometric shapes of parts, various configurations, including the classic cylindrical one, are available. These can be various types of bushings, pistons, and pipes. Products made of non-metallic materials often operate under high dynamic loads and are subjected to various types of vibrations, making it relevant to determine the dynamic loading parameters. Such parameters primarily include the forms of natural oscillations and their corresponding frequencies. The object of the study is a polymer product in the form of a truncated cone with a diameter of 70.5 mm from the bottom and 69.0 mm from the top, height of 80 mm, and wall thickness of 2.2 mm. The purpose of this study is to determine the smooth frequencies and forms of oscillations of the aforementioned product. The goal is achieved using a modern experimental method of real-time speckle interferometry, which belongs to the optical methods of non-destructive testing and is protected by many patents of Ukraine. The optical scheme of the experimental stand is described in this publication, along with the equipment characteristics and software features. A feature of this study is the use of non-contact excitation when the vibration-generating element is near but does not touch the object under study. In this case, the amplitude is transmitted through a layer of air, and the vibration exciter does not change the mass of the object under study. Consequently, there is no distortion of the forms and a change in the frequencies of smooth vibrations. In the range of 0...5 kHz, ten forms of natural oscillations were experimentally discovered, which are given in this work. Simultaneously, the number of nodal lines passing perpendicular to the axis of rotation of the object n in the studied range changes from 0 to 2, and the number of nodal line pairs passing in the meridional direction m changes from 2 to 5. Refinement of the number of forms and improvement of the quality of identification were performed in the Solidworks software package, which allowed the detection of 12 forms of oscillations in the specified range, which is explained by the insufficient strength of remote excitation for the two undetected forms. Despite this, the root-mean-square deviation between the calculated and experimental studies is 4.2%, which is acceptable for further calculations.

Keywords: oscillation form; oscillation frequency; polymer product; experimental studies; computer modeling.

Ткач Михайло Романович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Галинкін Юрій Миколайович – канд. техн. наук, доц. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Жук Ірина Юріївна – старш. викл. каф. гігієни, соціальної медицини, громадського здоров'я та медичної інформатики, Чорноморський державний університет імені Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Монахов Андрій Анатолійович – асп. каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Доценко Сергій Михайлович – доц. каф. енергетичного машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Костріков Олександр Андрійович – студент каф. інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Mykhailo Tkach – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: mykhaylo.tkach@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4944-7113.

Yurii Halynkin – PhD, Associate Professor at the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: yurii.galynkin@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5272-4156.

Iryna Zhuk – Senior Lecturer at the Department of Hygiene, Social Medicine, Public Health and Medical Informatics, Petro Mohyla Black Sea State University, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: Iryna.zhuk@chmnu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7350-1944.

Andriy Monakhov – PhD Student of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: Monachow88@gmail.com, ORCID: 0009-0000-8525-0102.

Serhiy Dotsenko – Associate Professor at the Department of Power Engineering, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: dotsenkoscsm2016@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2913-3790.

Oleksandr Kostrikov – Student of the Department of Engineering Mechanics and Mechanical Engineering Technology, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: ZefirkaKakao@gmail.com, ORCID: 0009-0007-8174-9265.