

УДК 62-253.51: 539.41

О.В. ДЬОМІН, О.О. ЛАРІН

DOI:10.20998/2078-9130.2021.2.249149

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ КРИТИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА КОМПЗИТНУ МОДЕЛЬ ЛОПАТІ ВІТРОГЕНЕРАТОРА

Дана стаття присвячена проблемам проектування та аналізу напружено-деформованого стану лопаті вітрогенератора при критичних навантаженнях. Побудовано тривимірну оболонкову розрахункову модель, що враховує складну криволінійну геометрію та наявність внутрішніх частин, що зміцнюють. Визначення параметрів напружено-деформованого стану під дією вітрового навантаження проводилось на основі метода скінчених елементів. Використовувався оболонковий десятивузловий ізопараметричний скінчений елемент. Побудована скінчена-елементна модель лопаті дозволяє враховувати композитну структуру та відтворювала наявність різної кількості шарів композиту по товщині оболонки, різноспрямованість волокон на окремих шарах, зокрема було змодельовано криволінійну ортотропію механічних властивостей. Представлено процедуру завдання багат шарової структури, яка передбачає накладання шарів композиту одного на інший у місцях стику, що забезпечує відповідність моделі технологічним особливостям. Проведено статичний аналіз розрахунку деформування конструкції з урахуванням підйімальної сили та сили напору повітря. Аналіз на міцність було проведено для кожного з шарів за критерієм максимальних деформацій.

Ключові слова: композиційний матеріал, лопать вітрогенератора, міцність, скінченно-елементний аналіз, ортотропія властивостей.

Данная статья посвящена проблемам проектирования и анализа напряженно-деформированного состояния лопасти ветрогенератора при критических нагрузках. Построена трехмерная оболочечная расчетная модель, учитывающая сложную криволинейную геометрию и наличие укрепляющих внутренних частей. Определение параметров напряженно-деформированного состояния под действием ветровой нагрузки проводилось на основе метода конечных элементов. Использовался оболочечный десятиузловой изопараметрический конечный элемент. Построенная конечно-элементная модель лопасти позволяет учитывать композитную структуру и воспроизводила наличие различного количества слоев композита по толщине оболочки, разнонаправленность волокон на отдельных слоях, в частности было смоделировано криволинейную ортотропию механических свойств. Представлена процедура задания многослойной структуры, которая предусматривает наложение слоев композита одного на другой в местах стыка, что обеспечивает соответствие модели технологическим особенностям. Проведен статический анализ расчета деформирования конструкции с учетом подъемной силы и силы напора воздуха. Анализ на прочность был проведен для каждого из слоев по критерию максимальных деформаций.

Ключевые слова: композиционный материал, лопать ветрогенератора, прочность, конечно-элементный анализ, ортотропия характеристик.

This article deals with the problems of designing and analysis of the deformed state of the wind turbine blade under critical loads. A three-dimensional shell simulation model is built, taking into account the complex curvilinear geometry and the presence of reinforcing internal parts. The determination of the parameters of the stress-strain state under the influence of wind load was carried out on the basis of the finite element method. A shell ten-node isoparametric finite element was used. The constructed finite element model of the blade allows taking into account the composite structure and reproduced the presence of a different number of composite layers along the thickness of the shell, the diversity of fibers on individual layers, in particular, the curvilinear orthotropy of mechanical properties was modeled. The procedure of multi-layer structure setting is presented, which provides for superimposition of layers of composite one on the other in places of joint, which ensures compliance of model with technological peculiarities. Static analysis of structural deformation calculation is carried out taking into account lifting force and air head force. The strength analysis was performed for each of the layers according to the criterion of maximum deformations.

Key words: composite material, wind turbine blade, strength, finite-elemental analysis, orthotroof characteristics.

Вступ. Вітроенергетика відіграє важливу роль у забезпеченні енергетичної незалежності країни та покращення екологічних показників. В даний час однією з найбільших проблем перед виробниками вітрогенераторів є оптимізація дизайну лопаток з метою підвищення ефективності видобутку вітроенергетики при зниженні собівартості виробництва та ваги пристрою. Ще одне важливе питання в процесі проектування - це впевнення, що вітрогенератор може витримувати експлуатаційні

умови як довгострокового, так і за пікового навантаження через екстремальні пориви вітру.

Основне експлуатаційне навантаження зосереджене на робочих елементах вітрогенератора – лопаті. Детальний огляд конструкцій лопатей представлений у статті [1]. При цьому найбільше напруженими є зміцнюючі частини лопаті, для яких в багатьох роботах і проводиться аналіз міцності [2, 3].

Як зазначено у статті [3], зі збільшенням масштабів лопатей вплив дефектів під час виробництва

та отриманих пошкоджень під час роботи зростає через складність проведення технічного огляду, що приведе до підвищення вимог до проектування таких лопатей.

Міцність досліджуваної лопаті визначається явищами розшарування та вигину. Стратегія моделювання структурного аналізу великих тривимірних ламінованих композиційних конструкцій розглянуто у роботі [6]. Сучасні практики проектування базуються на комп'ютерному тривимірному моделюванні інженерних розрахункових комплексів на базі МСЕ, полегшити проектування лопатей можливо створенням програм автоматизованого створення скінчено-елементної моделі для лопаті із заданою формою та синтезу раціональних характеристик композитного матеріалу, як це зроблено у роботі [8]. Щоб зрозуміти вплив дефектів та об'єктивність проведених розрахунків, на фінальних стадіях проектування слід проводити порівняння із експериментальними даними, як це зроблено у статті [7].

Зі зростанням розмірів вітрогенераторів зростає і вага. З метою зменшення ваги розглядається доцільність використання нових матеріалів. У статті [4], розглядаються питання доцільності застосування вуглецевого волокна з метою зменшення ваги конструкції лопатей турбін, забезпечення міцності і довговічності електростанції, захисту від обмерзання. У статті [5] представлені роботи, проведені в рамках консорціуму EPSRC SUPERGEN, щодо потенційного використання нових матеріалів у лопатях вітрогенераторів та наслідків, що впливають на міцність та цілісність лопатей.

Також питання зменшення ваги можливо вирішити шляхом оптимізації моделі [9-11]. За допомогою створення математичної моделі

Таблиця 1 – фізичні характеристики матеріалів

Характеристика	Напрямок	Одиниці вимірювання	Епоxy Carbon Woven (230 GPa) Prepreg	Епоxy Carbon Woven (395 GPa) Prepreg	Honeycomb
Щільність	-	кг/м ²	1420	1480	80
Модуль Юнга	X	МПа	61340	91820	1
	Y		61340	91820	1
	Z		6900	9000	255
Коефіцієнт Пуассона	XY	-	0,04	0,05	0,49
	YZ	-	0,3	0,3	0,001
	ZX	-	0,3	0,3	0,001
Модуль Здвигу	XY	МПа	19500	19500	1E-06
	YZ		2700	3000	37
	ZX		2700	3000	70

Геометрична модель була побудована в рамках вихідного проектування, тобто спочатку було побудовано каркас перетинів, передня та задня кромки. Усі профілі та додаткові лінії зображені на рис. 2.

оптимізаційного проектування, зі збереженням потужності турбіни, вдається зменшити вагу лопаті яка працює на великих швидкостях на 7,2%, стаття [9], та майже на 50% для лопатей що працюють на низьких швидкостях стаття [10].

1. Розробка та побудова геометрії лопаті.

В даній статті для дослідження було обрано лопаті класичного перерізу з двома посилюючими елементами (рис.1), та наступними геометричними характеристиками



Рис. 1 – складові частини лопаті у перетині

Діаметр корінного перетину – 3м; Довжина лопаті – 56м; Максимальна швидкість руху повітря – 70м/с; Максимальна вага лопаті – 25т.

Опираючись на статтю [4], було прийняте рішення використовувати такі матеріали:

Епоxy Carbon UD (230 GPa) Woven для зовнішньої частини лопаті

Епоxy Carbon UD (395 GPa) Woven для внутрішньої частини лопаті

Honeycomb як серцевина між шарами

Їх характеристики наведені у таблиці 1.

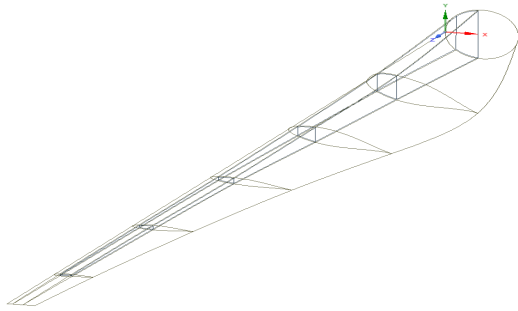


Рис. 2 - Профілі та кромки лопаті

Далі на лінії натягувались поверхні. Між внутрішньої та зовнішньою частинами було створено жорсткий контакт. Далі була зроблена скінчено-елементна модель, яка зображена на рис. 3.

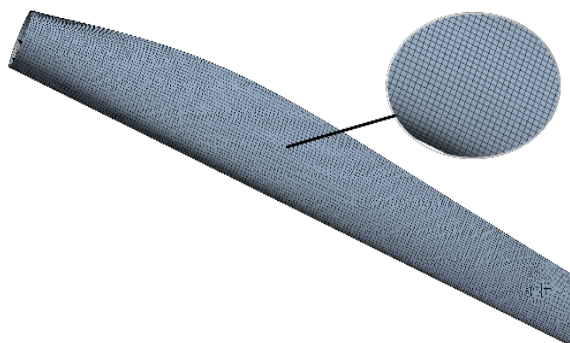


Рис. 3 – скінчено елементна модель

2. Викладення композиту на модель.

На основі обраних матеріалів зроблені комбінації композитних шарів які будуть викладені на геометрію. Спочатку утворено армування, для якого обирались товщина та матеріал. Далі на основі створеного армування утворювались пакети композитів для яких було задано кількість шарів армування та кути під якими вони будуть з'єднані.

Напрямок орієнтації волокон задавався відповідно до локальної системи координат кожної з поверхонь. В даному випадку використані два типи локальних систем координат: для нерівних граней були використані криволінійні системи координат які повторюють поверхні лопаті, та декартова система координат для плоских граней. Результат «викладки» композитних шарів у модель зображено на рис. 4.

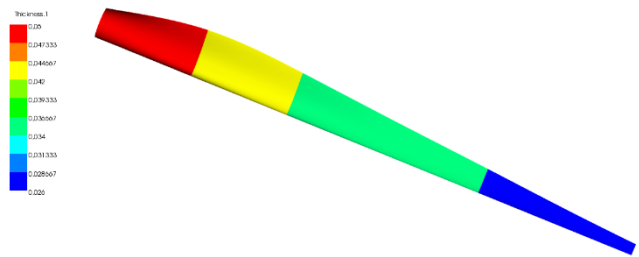
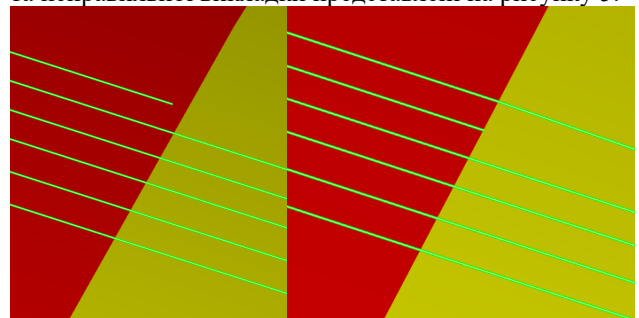


Рисунок 4 – результат викладення композиту

Додатково контролювалась проблема коректності викладення (послідовності) шарів композиту аби уникнути утворення «сходинок». Приклади правильної та неправильної викладки представлені на рисунку 5.



а) б)

Рисунок 5 – а) викладка «сходинокми» б) правильна викладка

3. Проведення та оцінка статичного аналізу.

Побудовану модель було застосовано для проведення статичного аналізу та визначення НДС. Закріплення встановлено жорстким по корінному перетину.

Для моделювання дії повітря було проведено розрахунки підйимальної сили та сили напору повітря було встановлено за наступними формулами: $L = C_l \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S / 2$; $D = C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S / 2$, де L – підйимальна сила, [Н]; C_l – коефіцієнт підйимальної сили; ρ – щільність потоку, [кг/м³]; v – швидкість потоку, [м/с]; S – площа тіла що зустрічає потік, [м²]; D – сила напору, [Н]; C_d – коефіцієнт лобового супротиву.

Коефіцієнти C_l та C_d були взяті з даних наведених в електронній базі [12], де представлені експериментальні дані для різних чисел Рейнольдса.

Розрахунки були проведені в перетинах лопаті, результати наведені у таблиці 2.

Оскільки знайдені результати стосуються лише перетинів, а тиск прикладається по всій площині контакту оболонки з повітрям, було використано середнє значення для площин між перетинами.

Таблиця 2 – результати розрахунків

Місце знаходження перетину (м)	10	20	30	40	50
Re	15,761,033				
C_l	2,17	1,6	1,02	0,46	0,2
C_d	0,21	0,019	0,008	0,0038	0,003
L	7083,71	5223	3329,67	1501,62	652,88
D	685,52	62,02	26,12	12,4	9,79

4. Обробка отриманих результатів.

Загальна картина прогину представлена на рис. 6 та рис. 7.

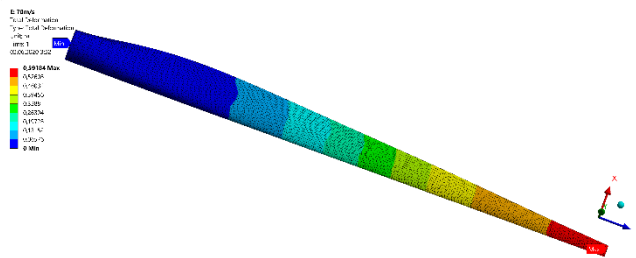


Рис. 6 – сумарні переміщення у лопаті

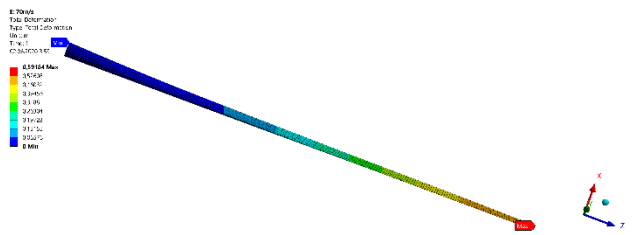


Рис. 7 – сумарні переміщення у зміцнювальній частині

Загальні результати НДС не дають повної картини, тому варто аналізувати їх для кожного шару окрему. Приклади отриманих результатів для першого шару зображені на рис. 8 та рис.9.

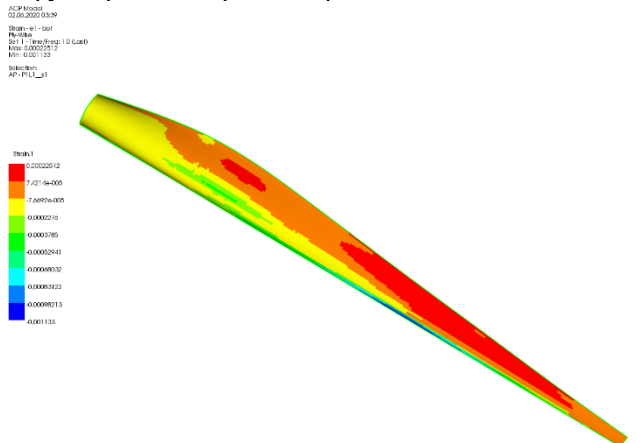


Рис. 8 – деформації у першому шарі першої викладки лопаті

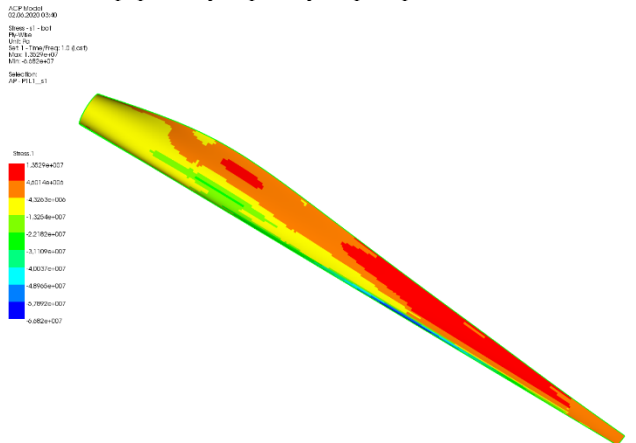


Рис. 9 – напруження у першому шарі першої викладки лопаті

Далі кожен з шарів композиту було перевірено на міцність. Для цього був обраний критерій міцності як максимальні деформації, за яким руйнування матеріалу починається коли найбільша компонента тензору деформацій перевищує граничне значення. Для наявності вивели розподіл пошкодження як відношення значення максимальної деформації до критичного значення. Приклад для одного з шарів зображено на рис. 10.

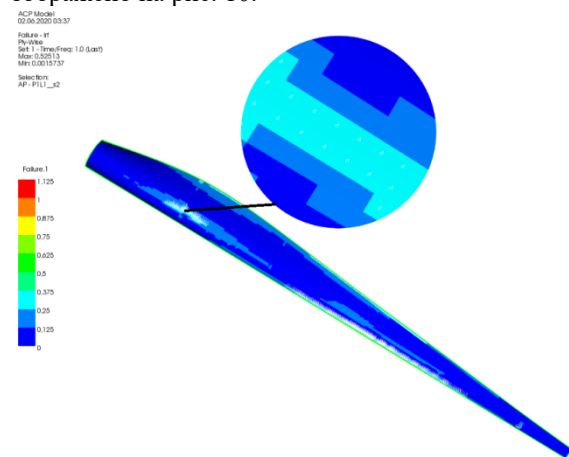


Рисунок 10 – відображення наявності пошкоджень

Найбільше значення було знайдено у серцевині, це 0,375 за шкалою де 1 це руйнування, а 0 це повна відсутність пошкоджень. Отримані результати означають що лопать витримує навантаження і в подальшому можна проводити її оптимізацію.

Висновки. У даній роботі було розглянуто проблеми під час проектування та аналізу напружено-деформованого стану лопаті вітрогенератора при критичних навантаженнях.

Було побудовано тривимірну оболонкову розрахункову модель, що враховує складну криволінійну геометрію та наявність внутрішніх частин, що зміцнюють.

Створена композитна модель має складну викладку з урахуванням таких характеристик як товщина шарів, їх кількість, матеріал та напрямок волокон відносно локальних систем координат. Для складних геометричних поверхонь використовувались криволінійні системи координат. Представлено процедуру завдання багатшарової структури, яка передбачає накладання шарів композиту одного на інший у місцях стику, що забезпечує відповідність моделі технологічним особливостям.

Проведено визначення параметрів напружено-деформованого стану під дією вітрового навантаження, яке проводилось на основі метода скінчених елементів. Для цього використовувався оболонковий десятивузловий ізопараметричний скінчений елемент.

Проведено статичний аналіз розрахунку деформування конструкції з урахуванням підйімальної сили та сили напору повітря. Аналіз на міцність було проведено для кожного з шарів за критерієм

максимальних деформацій, конструкція витримала навантаження, найбільші значення були у серцевині композитної викладки.

Список літератури

- Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). *Wind Turbine Blade Design. Energies*, 5(9), 3425–3449. doi:10.3390/en5093425
- Barnes, R. H., Morozov, E. V., & Shankar, K. (2015). *Improved methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades. Composite Structures*, 119, 677–684. doi:10.1016/j.compstruct.2014
- Thomsen, O. T. (2009). *Sandwich Materials for Wind Turbine Blades — Present and Future. Journal of Sandwich Structures & Materials*, 11(1), 7–26. doi:10.1177/1099636208099710
- Г.Э. Окольников, Д.А. Бронников, Н.И. Щедрин. Использование углеродного волокна в конструкциях ветровых электростанций. — Системные технологии. — 2018. — No 27. — С. 60–63.
- Dutton, A. G., Bonnet, P. A., Hogg, P., & Lleong, Y. L. (2010). *Novel materials and modelling for large wind turbine blades. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 224(2), 203–210. doi:10.1243/09576509jpe858
- Overgaard, L. C. T., Lund, E., & Camanho, P. P. (2010). *A methodology for the structural analysis of composite wind turbine blades under geometric and material induced instabilities. Computers & Structures*, 88(19-20), 1092–1109. doi:10.1016/j.compstruc.2010
- Overgaard, L. C. T., Lund, E., & Thomsen, O. T. (2010). *Structural collapse of a wind turbine blade. Part A: Static test and equivalent single layered models. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(2), 257–270. doi:10.1016/j.compositesa.200
- Grujicic, M., Arakere, G., Subramanian, E., Sellappan, V., Vallejo, A., & Ozen, M. (2009). *Structural-Response Analysis, Fatigue-Life Prediction, and Material Selection for 1 MW Horizontal-Axis Wind-Turbine Blades. Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(6), 790–801. doi:10.1007/s11665-009-9558-8
- Zhu, J., Cai, X., Pan, P., & Gu, R. (2012). *Optimization design of spar cap layout for wind turbine blade. Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 6(1), 53–56. doi:10.1007/s11709-012-0147-9
- Monroy Aceves, C., Sutcliffe, M. P. F., Ashby, M. F., Skordos, A. A., & Rodríguez Román, C. (2012). *Design methodology for composite structures: A small low air-speed wind turbine blade case study. Materials & Design (1980-2015)*, 36, 296–305. doi:10.1016/j.matdes.2011.11.
- Mouhsine, S. E., Oukassou, K., Ichenial, M. M., Kharbouch, B., & Hajraoui, A. (2018). *Aerodynamics and structural analysis of wind turbine blade. Procedia Manufacturing*, 22, 747–756. doi:10.1016/j.promfg.2018.03

12. <http://airfoiltools.com/>

References (transliterated)

- Schubel, P. J., & Crossley, R. J. (2012). *Wind Turbine Blade Design. Energies*, 5(9), 3425–3449. doi:10.3390/en5093425
- Barnes, R. H., Morozov, E. V., & Shankar, K. (2015). *Improved methodology for design of low wind speed specific wind turbine blades. Composite Structures*, 119, 677–684. doi:10.1016/j.compstruct.2014
- Thomsen, O. T. (2009). *Sandwich Materials for Wind Turbine Blades — Present and Future. Journal of Sandwich Structures & Materials*, 11(1), 7–26. doi:10.1177/1099636208099710
- Г.Э. Окольников, Д.А. Бронников, Н.И. Щедрин. Использование углеродного волокна в конструкциях ветровых электростанций. — Системные технологии. — 2018. — No 27. — С. 60–63.
- Dutton, A. G., Bonnet, P. A., Hogg, P., & Lleong, Y. L. (2010). *Novel materials and modelling for large wind turbine blades. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 224(2), 203–210. doi:10.1243/09576509jpe858
- Overgaard, L. C. T., Lund, E., & Camanho, P. P. (2010). *A methodology for the structural analysis of composite wind turbine blades under geometric and material induced instabilities. Computers & Structures*, 88(19-20), 1092–1109. doi:10.1016/j.compstruc.2010
- Overgaard, L. C. T., Lund, E., & Thomsen, O. T. (2010). *Structural collapse of a wind turbine blade. Part A: Static test and equivalent single layered models. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(2), 257–270. doi:10.1016/j.compositesa.200
- Grujicic, M., Arakere, G., Subramanian, E., Sellappan, V., Vallejo, A., & Ozen, M. (2009). *Structural-Response Analysis, Fatigue-Life Prediction, and Material Selection for 1 MW Horizontal-Axis Wind-Turbine Blades. Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(6), 790–801. doi:10.1007/s11665-009-9558-8
- Zhu, J., Cai, X., Pan, P., & Gu, R. (2012). *Optimization design of spar cap layout for wind turbine blade. Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 6(1), 53–56. doi:10.1007/s11709-012-0147-9
- Monroy Aceves, C., Sutcliffe, M. P. F., Ashby, M. F., Skordos, A. A., & Rodríguez Román, C. (2012). *Design methodology for composite structures: A small low air-speed wind turbine blade case study. Materials & Design (1980-2015)*, 36, 296–305. doi:10.1016/j.matdes.2011.11.
- Mouhsine, S. E., Oukassou, K., Ichenial, M. M., Kharbouch, B., & Hajraoui, A. (2018). *Aerodynamics and structural analysis of wind turbine blade. Procedia Manufacturing*, 22, 747–756. doi:10.1016/j.promfg.2018.03
- <http://airfoiltools.com/>

ула (received) 24.12.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Дьомін Олексій Володимирович (Дёмин Алексей Владимирович, Domin Oleksii Volodymyrovych) – магістр технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри Динаміки та міцності машин; м. Харків, Україна; тел.: (067) 274-50-28; e-mail: a.domin16041997@gmail.com.

Ларін Олексій Олександрович (Ларин Алексей Александрович, Larin Oleksiy Oleksandrovych) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», директор навчально-наукового інженерно-фізичного інституту, м. Харків, Україна; e-mail: alexeya.larin@gmail.com.