

**В.Г. МАРТИНЕНКО**

## ЧИСЕЛЬНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНІЧНОГО З'ЄДНАННЯ ЛОПАТКИ РОТОРНОЇ МАШИНИ

В роботі представлено експериментальне та чисельне дослідження конічного кріплення хвоста алюмінієвої лопатки вентилятора головного провітрювання шахти, що засновується на випробуваннях спрощеної натурної моделі з відкинутим пером та її подальшому скінченно-елементному аналізі. Розрахункова модель враховує пружнопластичні властивості матеріалів та нелінійні контакти із тертям. Запропоноване з'єднання складається з алюмінієвого конічного хвоста лопатки, двох сталевих фіксаторів із аналогічними конічними поверхнями та двох сталевих болтів, які поєднують фіксатори навколо хвоста. Попередня затяжка болтів дозволяє зафіксувати лопатку в ненавантаженому стані у гнізді та запобігти її небажані повороти. Така затяжка враховується в скінченно-елементному аналізі за допомогою визначення з дотриманням спеціальних правил осової сили переднатягу болтів. За допомогою гідравлічного пресу, що діє на нижню поверхню хвоста лопатки, імітується вплив відцентрового навантаження на конічне з'єднання з боку пера лопатки. Нелінійний статичний аналіз пружнопластичної поведінки конструкції дозволяє визначити руйнівні навантаження, що спричиняють розрив болтів із подальшим роз'єднанням фіксаторів та вильотом лопатки із посадочного гнізда. Графіки еквівалентних за Мізесом напружень свідчать про те, що максимальні напруження досягаються в робочій частині болтів, що повністю відповідає характеру руйнування конструкції при досягненні максимального еквівалентного навантаження на неї. Експериментальне дослідження підтверджує коректність визначення контактних напружень в місці конічної посадки. Відповідність результатів статичного аналізу результатам натурального експерименту дає можливість зробити висновок про коректність проведеного скінченно-елементного моделювання. Це дозволяє використовувати розроблену постановку задачі для визначення міцності конструкцій вентиляторів із конічними з'єднаннями лопаток без виконання попередніх експериментальних досліджень. Окрім того, розроблена методика може бути поширена на більший круг конічних та циліндричних з'єднань завдяки простоті підходу та універсальності постановки нелінійної скінченно-елементної задачі, що моделює конструкції із попередньо навантаженими чи затягнутими елементами.

**Ключові слова:** міцність; контакт; болтове з'єднання; тертя; метод скінченних елементів.

The paper presents an experimental and numerical study of the tapered socket of the aluminum blade root of the mine main ventilation fan, which is based on the tests of a simplified full-scale model with a discarded airfoil and its subsequent finite element analysis. The calculation model takes into account elastoplastic properties of materials and non-linear contacts with friction. The proposed joint consists of an aluminum tapered blade root, two steel retainers with similar tapered surfaces, and two steel bolts that join the retainers around the root. Pre-tightening the bolts allows fixing the blade in an unloaded state in the socket and prevents its unwanted turns. Such a tightening is taken into account in the finite element analysis by means of determining, in compliance with special rules, the axial force of the pretension of the bolts. With the help of a hydraulic press acting on the lower surface of the airfoil root, the effect of the centrifugal load on the conical joint from the side of the blade airfoil is simulated. Nonlinear static analysis of the elastoplastic behavior of the structure allows determining the destructive loads that cause the bolts to break with the subsequent disconnection of the fasteners and the blade to fly out of the seat. The graphs of the equivalent von Mises stresses indicate that the maximum stresses are reached in the working part of the bolts, which fully corresponds to the nature of the destruction of the structure upon reaching the maximum equivalent load on it. The experimental study confirms the correctness of the determination of contact stresses at the tapered socket location. Correspondence of the results of the static analysis with the results of the full-scale experiment makes it possible to draw a conclusion about the correctness of the conducted finite element modelling. This allows using the developed formulation of the problem to determine the strength of rotor structures with conical connections of blades without performing preliminary experimental studies. In addition, the developed technique can be extended to a larger range of conical and cylindrical joints due to the simplicity of the approach and the versatility of the formulation of the nonlinear finite-element problem which models structures with preloaded or tensioned elements.

**Keywords:** strength; contact; bolt joint; friction; finite element method.

**Вступ.** Осові роторні машини мають різні технології фіксації лопаток до робочих коліс. З поміж таких можна виділити:

1. Фіксацію за допомогою плоских полицок [1, 2].
2. Кріплення типу «ялинка» [3].
3. Кріплення лопаток безпосередньо до диску за допомогою зварювання та інших технологій [4].
4. Фіксацію за допомогою циліндричних полицок [5].
5. Конічні з'єднання з переднатягом [6].

Кожен з таких методів фіксації має свої переваги та недоліки та зазвичай є компромісом між простотою виконання, подальшого збирання в повну конструкцію та обслуговування, а також можливістю витримати певний рівень статичних та динамічних навантажень, тощо.

В осових вентиляторах головного провітрювання шахти зазвичай використовують фіксацію за допомогою циліндричних полицок або конічне з'єднання.

Рис. 1 наочно порівнює еквівалентні за Мізесом напруження в циліндричному та конічному з'єднаннях

лопаток вентиляторів приблизно одного діаметру (3 м) та з приблизно однаковою швидкістю обертання. З рисунку витікає, що максимальні еквівалентні за Мізесом напруження в хвості лопатки для циліндричного з'єднання є вищими за такі величини для конічного з'єднання.

Разом із цим, конічне з'єднання потребує великого переднатягу, який досягається за допомогою зтягування фіксаторів болтовими з'єднаннями, тобто в даному випадку саме ці елементи стають найбільш напруженими у порівнянні із хвостовиком лопатки.

Саме тому ці елементи кріплення потребують більш детального дослідження з перевіркою перевищення допустимих напружень та, відповідно, виконання критерію міцності при зтягуванні конічного з'єднання. Дана робота ставить на меті розробити та експериментально перевірити такий чисельний алгоритм, що є предметом дослідження, для визначення міцності конічного з'єднання лопатки роторної машини з переднатягом, що є об'єктом дослідження.

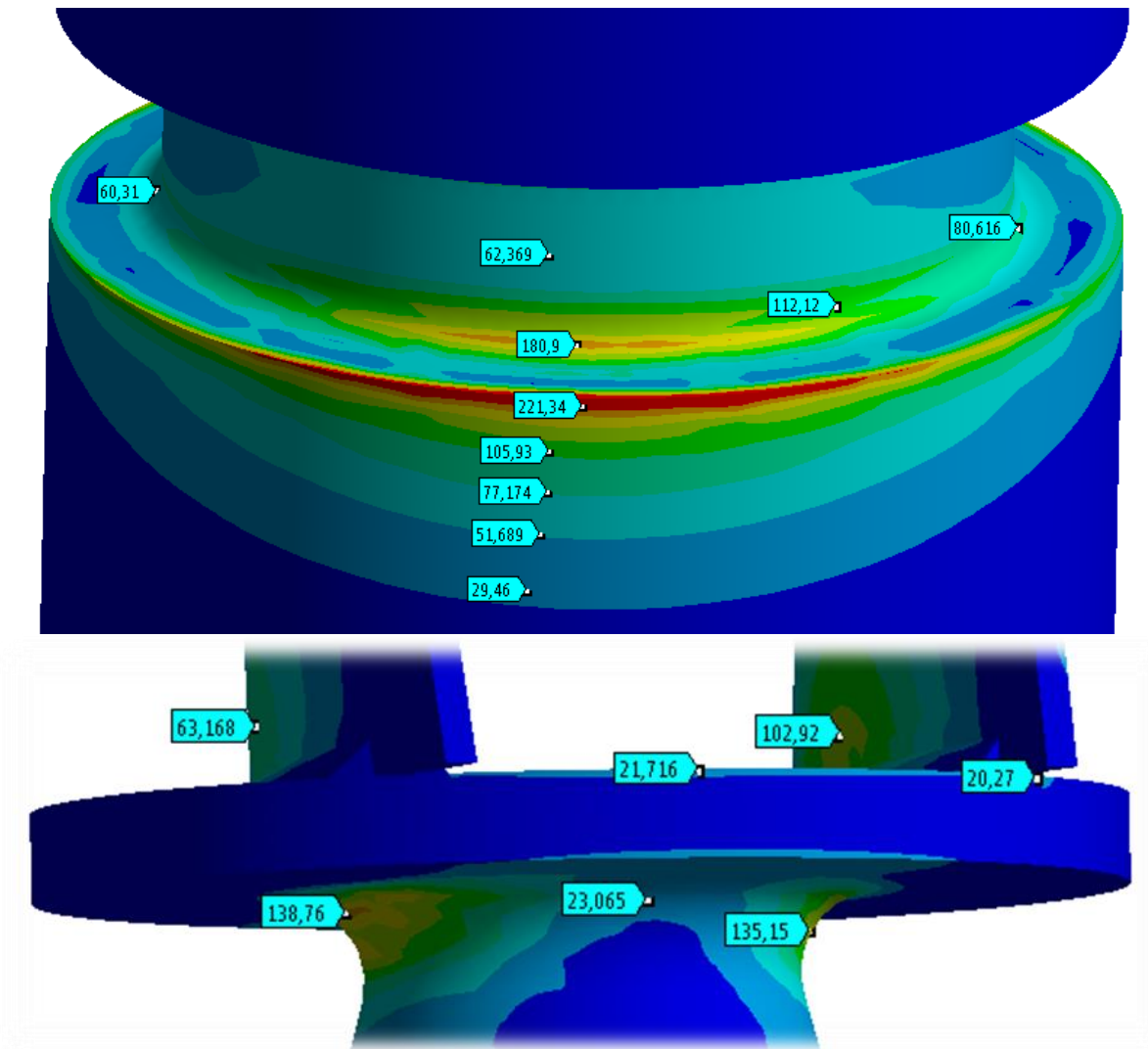


Рис. 1 – Еквівалентні за Мізесом напруження, МПа у циліндричному (зверху) та конічному (знизу) з'єднаннях осевих вентиляторів

#### Аналіз існуючих шляхів вирішення проблеми.

Міцність різних типів з'єднань турбомашин є достатньо вивченою темою із урахуванням різних особливостей таких з'єднань.

Наприклад, в роботах [7, 8] вивчається напружено-деформований стан з'єднання лопатки парової турбіни типу «ялінка» із урахуванням температурних та пластичних деформацій, які в машинах такого типу мають суттєвий вплив на міцність.

В роботі [9] вивчається напружений стан та проводиться оцінка надійності болтових з'єднань ротора та робочого колеса поворотно-лопатевого гідротурбін та визначені напруження як функція часу при запуску та зупинці агрегату.

В статті [10] розглядається вплив геометричних параметрів замкового з'єднання між диском та лопаткою з точки зору визначення еквівалентних напружень в такому з'єднанні.

В роботі [11] розглядається міцність болтового з'єднання композиційних лопатей вітрогенератора.

В [12] проводиться дослідження міцності зварного з'єднання для їхнього подальшого використання в гідравлічних лопатках.

Робота [13] пропонує нове заклепкове з'єднання між лопатками та диском статора та проводить експериментальне та чисельне дослідження його міцності.

В статті [14] пропонується конструкція та оптимізаційне дослідження гібридного з'єднання композиційної лопатки вентиляторної ступені двигуна літака.

Стаття [15] пропонує новий підхід до поєднання алюмінієвої частини пера лопатки вентилятора із сталевим хвостовиком та проводить чисельне та експериментальне дослідження такого нового з'єднання.

В даній роботі розглядається конічне з'єднання лопатки вентилятора із фіксаторами, приклад якої показаний на рис.2 у вигляді геометричної та скінченно-елементної моделей вже існуючого конструктивного рішення.

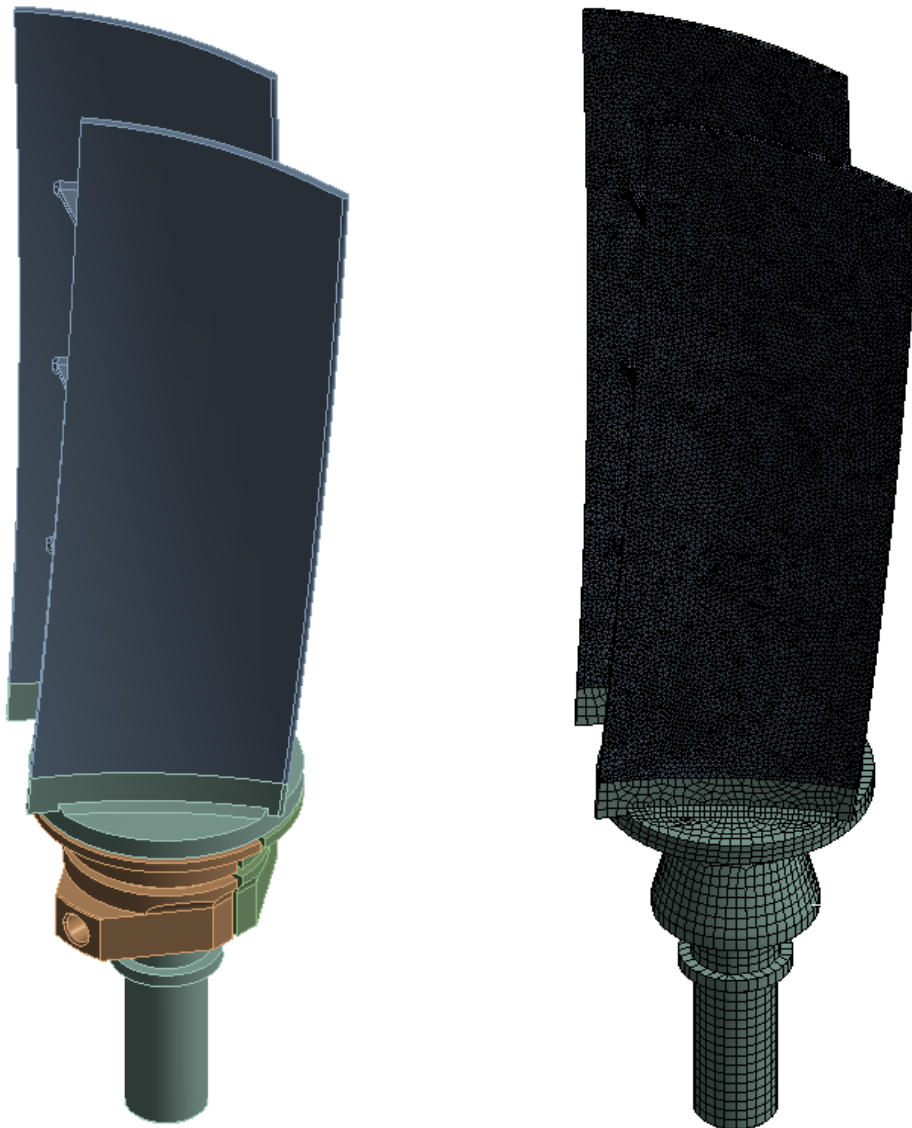


Рис. 2 – Лопатка вентилятора із конічним з'єднанням на прикладі геометричної моделі, що показана зліва із фіксаторами, та скінченно-елементної моделі, що показана справа без фіксаторів

**Постановка задачі.** Для експериментального дослідження міцності конічного з'єднання використовується стенд, що показаний на рис. 3 та включає в себе алюмінієвий конічний хвостовик лопатки, сталеві фіксатори із болтами та циліндричний упор, що відіграє роль полички на диску робочого колеса вентилятора, яка безпосередньо контактує із фіксаторами.

На рисунку експериментальна модель розташована догори низом у порівнянні з реальною моделлю лопатки, тобто поверхня, яка має з'єднуватись з пером лопатки, знаходиться знизу.

Верхній на рисунку (нижній у реальній конструкції) торець хвостовика навантажується гідравлічним пресом, що змушує його рухатись всередину конічного з'єднання, яке до того ж попередньо навантажене шляхом затягування болтів, та роз'єднувати фіксатори, додатково навантажуючи болтові з'єднання.

Таким чином моделюється дія на конічне з'єднання відцентрових навантажень сумісно із навантаженнями від переднатягу болтових з'єднань.

Навантаження відбувається до моменту руйнування болтів або конструкції в цілому, аналогічний процес моделюється в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу з урахуванням пружно-пластичних деформацій матеріалів та без урахування руйнівних процесів.

Оцінка міцності в програмному комплексі скінченно-елементного аналізу відбувається за допомогою порівняння еквівалентних за Мізесом напружень із границями міцності відповідних матеріалів та подальшого визначення навантаження, яке призводить до еквівалентних напружень, що дорівнюють границі міцності матеріалів. Таким чином, якщо моделювання є адекватним, відповідний рівень навантаження у реальній конструкції має спричинити руйнування.

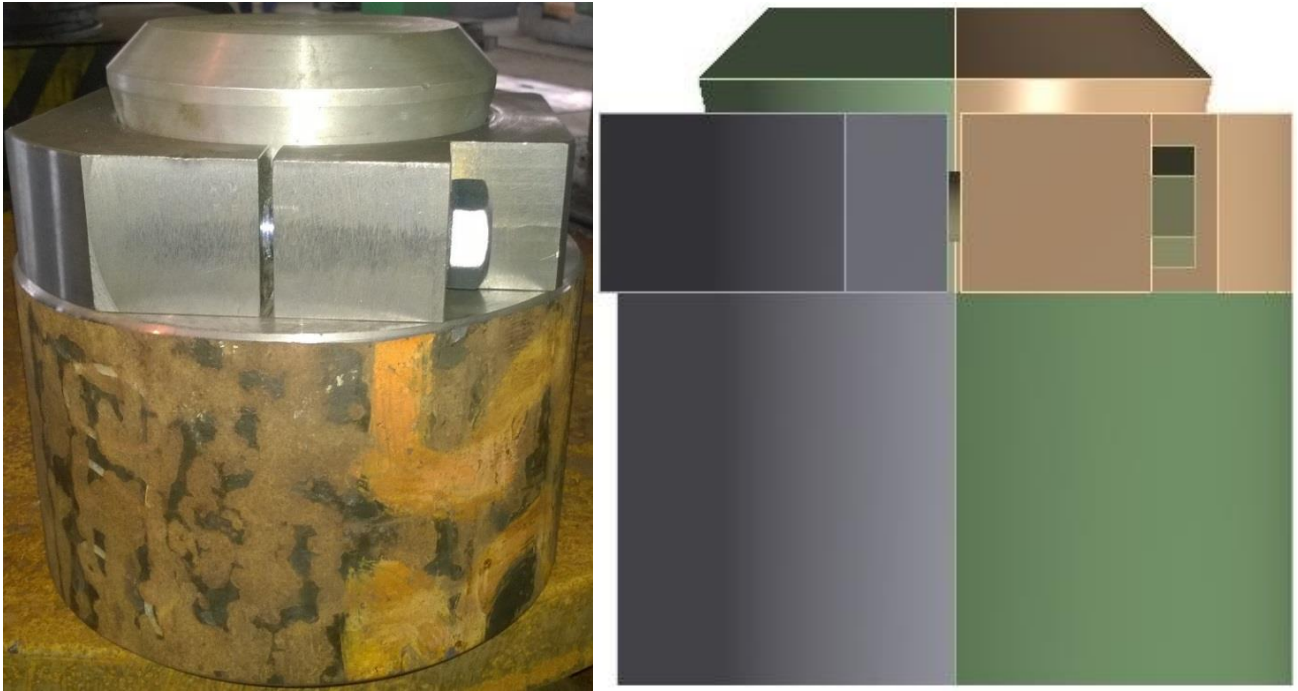


Рис. 3 – Експериментальний зразок для дослідження міцності кінцевого з'єднання у вигляді реальної конструкції (зліва) та геометричної моделі (справа)

На рис. 4 показані скінченно-елементна та контактна моделі експериментального стенду, які включають частину гідравлічного пресу (знизу), хвостовик із фіксаторами та болтами (посередині) та упор (зверху).

Між усіма контактуючими поверхнями (прес-торець хвостовика, хвостовик-фіксатори, болти-фіксатори, фіксатори-упор) встановлені нелінійні

контакти із відповідними коефіцієнтами тертя (алюміній-сталь, сталь-сталь).

Окрім того, для розрахунків враховується вплив великих деформацій на напружено-деформований стан, тобто модель включає всі три можливі типи нелінійностей, а саме нелінійність властивостей матеріалу, нелінійність контактних взаємодій та геометрична нелінійність.

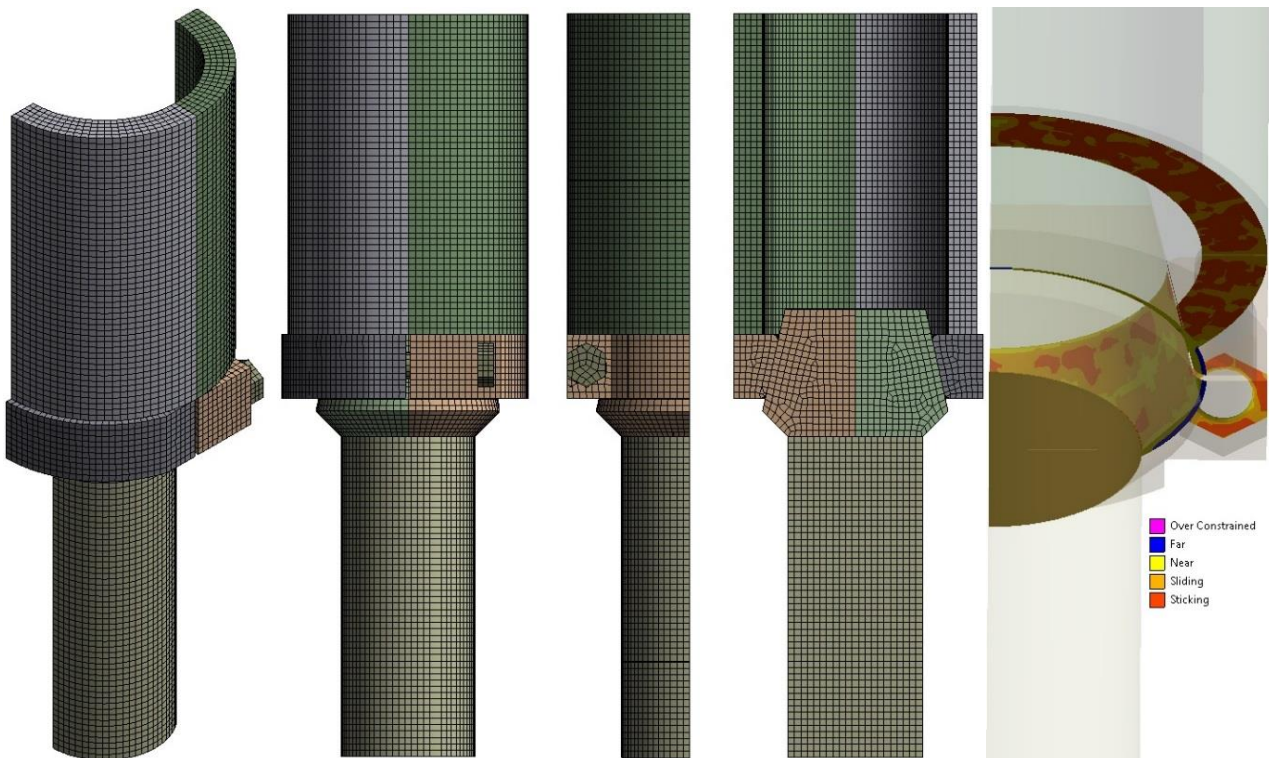


Рис. 4 – Розрахункова модель експериментального стенду



У випадку експериментального дослідження та під час моделювання навантаження відбувалось поступово від нульового значення до величини, яка відповідала руйнуванню досліджуваного зразка.

Оцінка похибки скінченно-елементної дискретизації для чисельної моделі проводилася шляхом порівняння максимальних еквівалентних за Мізесом напружень як результатів пробних статичних аналізів на робочій та вдвічі більш дрібній сітках, а також шляхом порівняння аналогічних величин на робочій сітці при поелементному та повузловому виведенні результатів. У всіх випадках робочі скінченно-елементні сітки продемонстрували похибку

менше ніж 2%, що є допустимою інженерною точністю.

**3. Аналіз статичної міцності конічного з'єднання.** На рис. 5 показані контурні графіки еквівалентних за Мізесом напружень для навантаження 412 кН, що відповідає границі міцності сталі, з якої виготовлені болти, а саме 845 МПа. При цьому еквівалентні за Мізесом напруження визначаються з наступного співвідношення:

$$\sigma_1 = \{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]/2\}^{1/2}, \quad (1)$$

де  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – головні напруження.

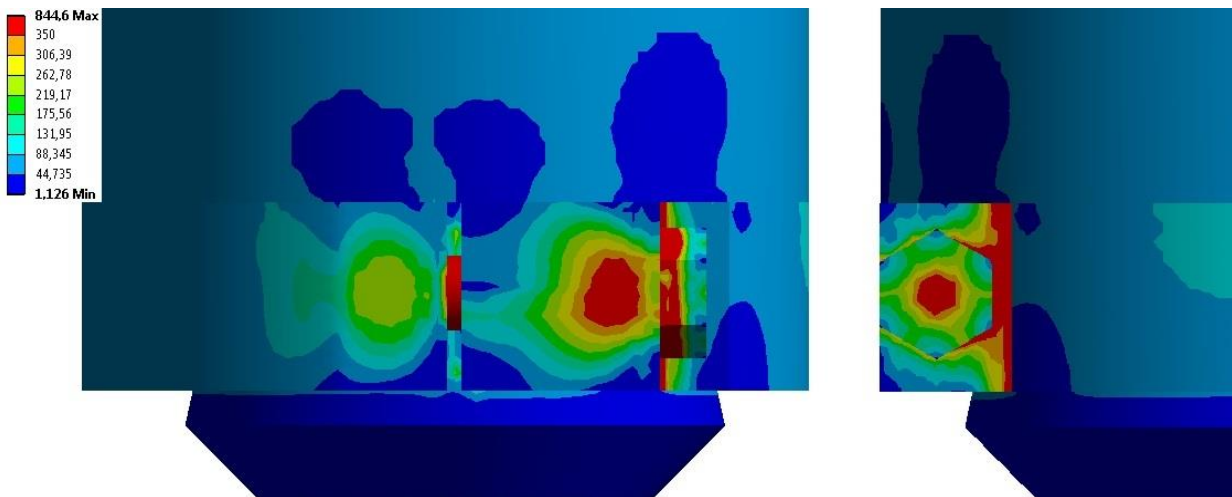


Рис. 5 – Еквівалентні за Мізесом напруження в експериментальній моделі, МПа

Саме руйнування болтів призводить до роз'єднання досліджуваного конічного з'єднання як у результаті експериментального дослідження, так і при аналізі критерію міцності для напружень, визначених з допомогою скінченно-елементного моделювання. Рис. 6 показує окремо розірваний під час експериментального дослідження болт та відповідну картину еквівалентних напружень у ньому, на якій видно суттєве утоншення болта в місці максимальних еквівалентних напружень (форма болта на контурному графіку відповідає реальному

масштабу деформацій за результатами скінченно-елементного моделювання).

Окрім того, на рис. 7 можна побачити зони пластичних деформацій для алюмінієвого хвостовика після експерименту, при чому для графіку напружень такі зони відповідають червоному кольору і в них відбувається перевищення границі текучості алюмінію еквівалентними напруженнями.

Картина деформування та руйнування елементів відповідає результатам скінченно-елементного моделювання, що підтверджує його адекватність.

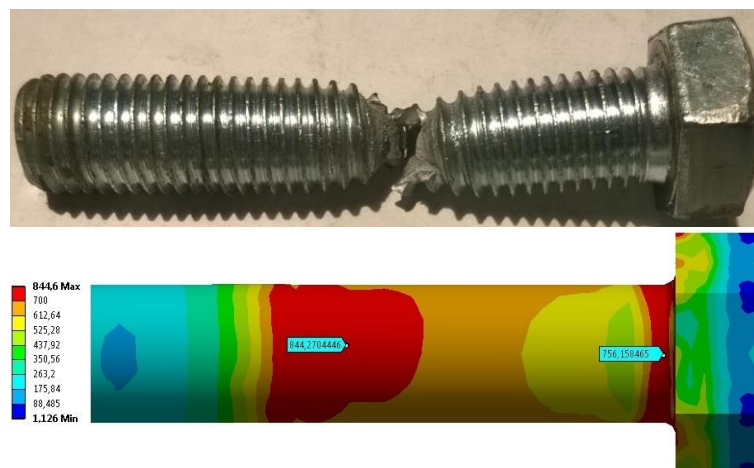


Рис. 6 – Розірваний під час експерименту болт та еквівалентні за Мізесом напруження в ньому на момент розриву, МПа

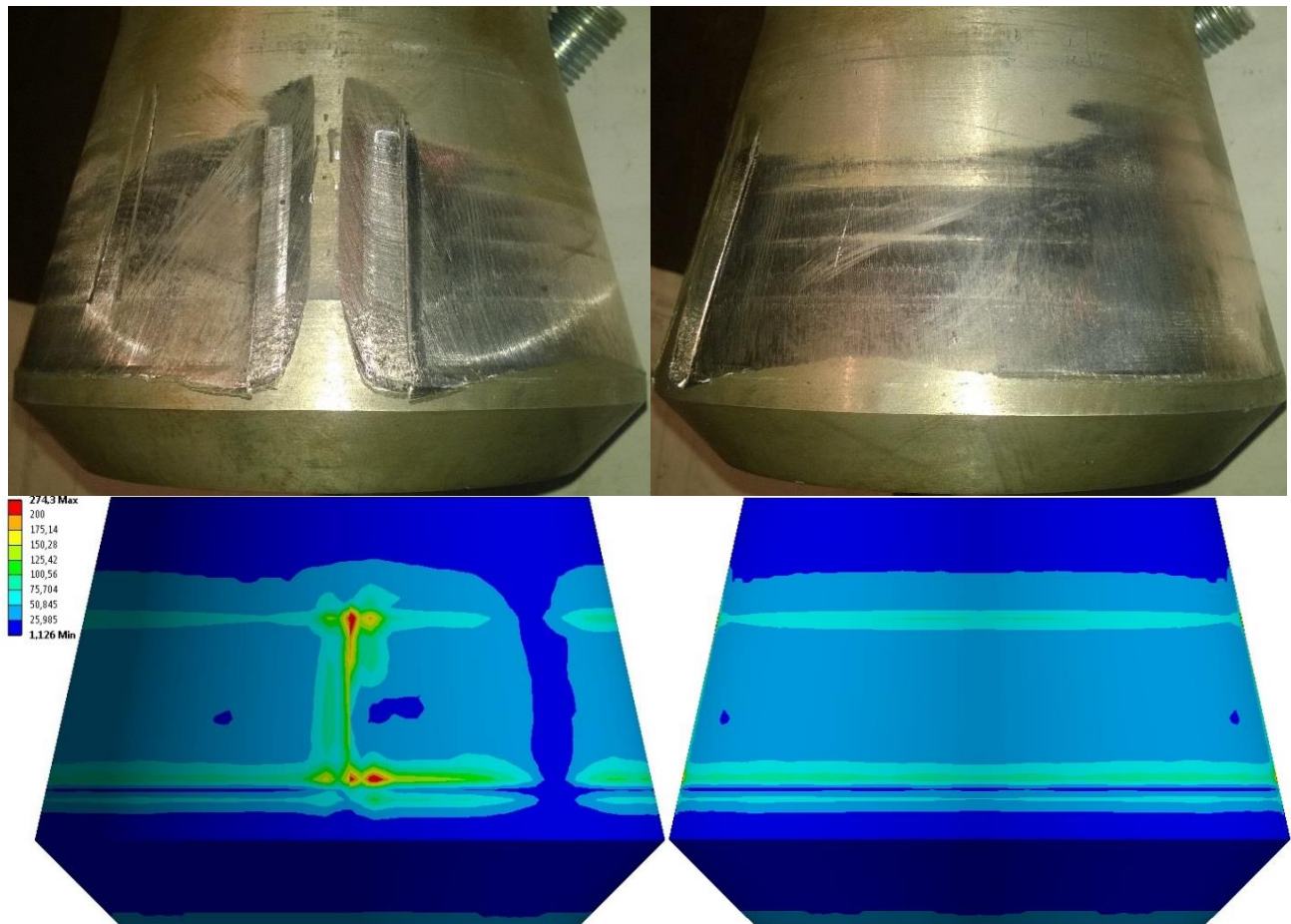


Рис. 7 – Реальний стан хвостовика та еквівалентні за Мізесом напруження в ньому, МПа на момент розриву болтів

**Висновки.** Запропонований підхід до експериментального та чисельного дослідження міцності кінцевого з'єднання лопатки вентилятора свідчить про достатнє співпадіння результатів.

Визначене за допомогою чисельного дослідження та використання відповідного критерію міцності навантаження руйнування, яке поступово прикладувалось до експериментального зразка, призводить до руйнування кінцевого з'єднання і в експерименті. При цьому варто відмітити, що менші за значеннями навантаження при експериментальному дослідженні не призводять до руйнування, а різниця між навантаженням руйнування, визначеним у експерименті та при моделюванні, складає у межах 2%, що є допустимою інженерною точністю.

Цей факт, а також факт співпадіння зон пластичних деформацій на алюмінієвому хвостовику та місця розриву болта із такими точками, визначеними у результаті моделювання, свідчать про адекватність побудованої моделі, яка враховує усі типи нелінійностей та переднатяг болтів, і можливість використання такої постановки задачі при моделюванні механічної поведінки та руйнування лопатки із кінчним хвостовиком у зборі з робочим колесом під дією навантажень передпагу та відцентрових сил під час роботи вентилятору в реальних робочих умовах.

#### Список літератури

1. Shankar M. T-root blades in a steam turbine rotor: A case study / M. Shankar, K. Kumar, S.L. Ajit Prasad // *Engineering Failure Analysis*. – 2010. – Vol. 17, Is. 5. – P. 1205-1212. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.02.006>
2. Yuan J. On an improved adaptive reduced order model for the computation of steady state vibrations in large-scale non-conservative system with friction joints / J. Yuan, C. Schwingshackl, C. Wong, L. Salles // *Nonlinear Dynamics*. – 2021. – Vol. 103. –P. 3283-3300. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05890-2>
3. Moneta G. Impact of manufacturing tolerances on stress in a turbine blade fir-tree root / G. Moneta, J. Jachimowicz // *Fatigue of Aircraft Structures*. – 2020. – Vol. 2020, No. 12. – P.92-101. <https://doi.org/10.2478/fas-2020-0009>
4. Martynenko V. Analysis of strength and bearing capacity of the auxiliary mine ventilation fan connected to the rotor of its electrical drive / V. Martynenko // *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology*. – 2020. – P. 19-23, <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250078>
5. Мартиненко В.Г. Розробка здвоєної лопатки осевого вентилятора із підвищеними аеродинамічними характеристиками / В.Г. Мартиненко, М.І. Гриценко // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Динаміка та міцність машин. – 2019. – № 1. – С. 28-33. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2019.1.187414>
6. Canale G. Moisture absorption in thick composite plates: modelling and experiments / G. Canale, M. Kinawy, P. Sathujoda, A. Maligno, R.G. Citarella // *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. – 2020. – Vol. 16, No. 3. – P. 439-447. <https://doi.org/10.1108/MMMS-06-2019-0119>
7. Palkov I. Thermostressed state of the lock joint of turbine rotor blades of the first stage of K-500-240 steam turbine medium pressure cylinder / I. Palkov, M. Shulzhenko // *Journal of Mechanical*

Engineering. – 2019. – Vol. 22. – P. 36-43. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.03.036>

8. Palkov I. Stress-strain state of steam turbine lock joint under plastic deformation / I. Palkov, M. Shulzhenko // Journal of Mechanical Engineering. – 2020. – Vol. 23. – P. 28-37. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.04.028>

9. Водка О.О. Комп'ютерне моделювання напруженого стану та оцінка надійності болтових з'єднань ротора та робочого колеса поворотно-лопатевих гідротурбін / О.О. Водка, Ю.А. Вязовиченко, О.О. Ларін, К.Є. Потопальська // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. – 2022. – № 2. – С. 68-74. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.2.271065>

10. Grzejszczak O. An influence of geometrical parameters of the lock of the blade-disc joint on stress in the FEA and DIC methods / O. Grzejszczak, A. Kozakiewicz // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2021. – Vol. 15, No. 1. – P. 209-217. <https://doi.org/10.12913/22998624/131662>

11. Qin Z. Design and nonlinear structural responses of multi-bolted joint composite box-beam for sectional wind turbine blades / Z. Qin, J. Wang, K. Yang, G. Yu, Y. Xu, J. Xu // Composite Structures. – 2018. – Vol. 206. – P. 801-813. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.073>

12. Foti P. Fatigue assessment of high strength welded joints through the strain energy density method / P. Foti, F. Berto // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2020. – Vol. 43. – P. 2694-2702. <https://doi.org/10.1111/ffe.13336>

13. Benesova S. Analysis of the joint between blade and stator disc in steam turbine / S. Benesova, A. Kriz, P. Benes // Manufacturing Technology. – 2017. – Vol. 17, No. 1. – P. 3-7. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/1/3>

14. Jadhav P. Design and optimization of hybrid interface joint in a composite fan blade of aircraft engine / P. Jadhav, L. Yella Gruha // Materials Science and Engineering Conference Series. – 2021. – Vol. 1126, No. 1. – P. 1-12. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1126/1/012036>

15. Мартиненко В.Г. Проектування, аналіз та експериментальне дослідження статичної міцності композиційної біметалічної лопатки вентилятора головного провітрювання шахти / В.Г. Мартиненко, М.І. Грищенко, С.В. Мавродій // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. – 2018. – № 38 (1314). – С. 20-31. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.38.152477>

#### References (transliterated)

1. Shankar M., Kumar K., Ajit Prasad S.L. T-root blades in a steam turbine rotor: A case study. *Engineering Failure Analysis*. 2010, vol. 17, is. 5, pp. 1205-1212. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.02.006>

2. Yuan J., Schwingshackl C., Wong C., Salles L. On an improved adaptive reduced order model for the computation of steady state vibrations in large-scale non-conservative system with friction joints. *Nonlinear Dynamics*. 2021, vol. 103, pp. 3283-3300. <https://doi.org/10.1007/s11071-020-05890-2>

3. Moneta G., Jachimowicz J. Impact of manufacturing tolerances on stress in a turbine blade fir-tree root. *Fatigue of Aircraft Structures*. 2020, vol. 2020, no. 12, pp. 92-101. <https://doi.org/10.2478/fas-2020-0009>

4. Martynenko V. Analysis of strength and bearing capacity of the auxiliary mine ventilation fan connected to the rotor of its electrical drive. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology*. 2020, pp. 19-23. <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250078>

5. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I. Rozrobka zdvojenoyi lopatky os'ovoho ventilyatora iz pidvyshchenyimi aerodynamichnyimi kharakterystykamy [Development of a double blade axial fan with increased aerodynamic characteristics]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 1, pp. 28-33. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2019.1.187414>

6. Canale G., Kinawy M., Sathujoda P., Maligno A., Citarella R.G. Moisture absorption in thick composite plates: modelling and experiments. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*. 2020, vol. 16, no. 3, pp. 439-447. <https://doi.org/10.1108/MMMS-06-2019-0119>

7. Palkov I., Shulzhenko M. Thermostressed state of the lock joint of turbine rotor blades of the first stage of K-500-240 steam turbine medium pressure cylinder. *Journal of Mechanical Engineering*. 2019, vol. 22, pp. 36-43. <https://doi.org/10.15407/pmach2019.03.036>

8. Palkov I., Shulzhenko M. Stress-strain state of steam turbine lock joint under plastic deformation. *Journal of Mechanical Engineering*. 2020, vol. 23, pp. 28-37. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.04.028>

9. Водка О.О., Вязовиченко Ю.А., Ларін О.О., Потопальська К.Є. Комп'ютерне моделювання напруженого стану та оцінка надійності болтових з'єднань ротора та робочого колеса поворотно-лопатевих гідротурбін [Computer modeling of the stress state and reliability assessment of the bolted connections of the rotor and impeller of rotary vane hydroturbines]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 2, pp. 68-74. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2022.2.271065>

10. Grzejszczak O., Kozakiewicz A. An influence of geometrical parameters of the lock of the blade-disc joint on stress in the FEA and DIC methods. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2021, vol. 15, no. 1, pp. 209-217. <https://doi.org/10.12913/22998624/131662>

11. Qin Z., Wang J., Yang K., Yu G., Xu Y., Xu J. Design and nonlinear structural responses of multi-bolted joint composite box-beam for sectional wind turbine blades. *Composite Structures*. 2018, vol. 206, pp. 801-813. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.08.073>

12. Foti P., Berto F. Fatigue assessment of high strength welded joints through the strain energy density method. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2020, vol. 43, pp. 2694-2702. <https://doi.org/10.1111/ffe.13336>

13. Benesova S., Kriz A., Benes P. Analysis of the joint between blade and stator disc in steam turbine. *Manufacturing Technology*. 2017, vol. 17, no. 1, pp. 3-7. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/1/3>

14. Jadhav P., Yella Gruha L. Design and optimization of hybrid interface joint in a composite fan blade of aircraft engine. *Materials Science and Engineering Conference Series*. 2021, vol. 1126, no. 1, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1126/1/012036>

15. Martynenko V.G., Hrytsenko N.I., Mavrody S.V. Proektuvannya, analiz ta eksperymental'ne doslidzhennya statychnoyi mitnosti kompozytsiynoyi bimetalichnoyi lopatky ventilyatora holovnoho provitryvannya shakhty [Design, analysis and experimental study of static strength of composite bimetal blade of mine main ventilation fan]. *Visnyk NTU "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 38 (1314), pp. 20-31. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2018.38.152477>

Надійшла (received) 06.07.2023

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Мартиненко Володимир Геннадійович (Martynenko Volodymyr Gennadiyovych)** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри математичного моделювання та інтелектуальних обчислень в інженерії; м. Харків; тел.: (057) 707-68-79; e-mail: [martynenko.volodymyr@gmail.com](mailto:martynenko.volodymyr@gmail.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-0905>.