

# Напружено-деформований стан елементів парових турбін в умовах пластичного деформування

## ■ Пальков Ігор Андрійович

Акціонерне товариство «Турбоатом», м. Харків, Україна  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4639-6595>

## ■ Пальков Сергій Андрійович

Акціонерне товариство «Турбоатом», м. Харків, Україна  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2215-0689>

Забезпечення надійної роботи обладнання другого контуру ядерних енергетичних установок з реакторами ВВЕР є невід'ємною складовою ядерної та радіаційної безпеки всього енергоблока АЕС. Вирішується задача про напружено-деформований стан конструктивних елементів парової турбіни в умовах пластичного деформування. Під час вирішення завдання використовується теорія пружно-пластичних деформацій. Вирішення здійснюється за допомогою методу скінченних елементів. Наводяться результати розрахункової оцінки напружено-деформованого стану замкового з'єднання робочих лопаток першого ступеня циліндра середнього тиску (ЦСТ) і корпусу циліндра високого тиску (ЦВТ) парової турбіни, що дозволяють охарактеризувати ступінь релаксації перерозподілу напружень в конструкції порівняно з результатами, отриманими раніше. Показано, що використання зазначеної методики розрахунку в процесі проектування нових конструкцій елементів парових турбін, що працюють у зоні високих теплових і силових навантажень, з урахуванням контактної взаємодії елементів та різних механічних і фізичних властивостей матеріалів, а також їх зміни залежно від робочої температури вже на цьому етапі розвитку програмного забезпечення дозволяє виявити проблемні місця в конструкції і запобігти надалі поломкам у турбіні. На підставі зіставлення даних експлуатації відпрацьованих конструктивних рішень і розрахункової оцінки, доведено, що обрана методика розрахунку дозволяє значно збільшити експлуатаційну надійність не тільки турбоагрегата, а й атомного блока загалом, а також знизити економічні витрати, спричинені простоем турбоагрегата під час виконання ремонтних робіт.

Ключові слова: границя текучості, замкове з'єднання, корпус, крива деформування, напружений стан, робоча лопатка, турбіна.

© Пальков І. А., Пальков С. А., 2020

## Вступ

Ядерна та радіаційна безпека АЕС визначається, зокрема, надійністю встановленого на ній обладнання. Водночас варто розглядати не тільки обладнання, яке працює безпосередньо в радіоактивних умовах, а й інші елементи енергоблока. Наприклад, у разі двоконтурних АЕС, якими є всі АЕС України, проблеми з обладнанням другого контуру передусім вплинуть на відведення тепла від першого контуру. Це може призвести не лише до порушення нормальних умов експлуатації, але й до аварійної ситуації (проектної

аварії «loss of coolant accidents», або навіть до запроєктних аварій). Найскладнішим елементом другого контуру, а тому найкритичнішим з погляду безпеки та надійності роботи, є парова турбіна. У разі нестационарних режимів роботи окремі елементи потужних парових турбін можуть піддаватися пластичному деформуванню, внаслідок чого в них відбувається перерозподіл напружень. Під час пластичного деформування в матеріалі відбуваються структурні перетворення, внаслідок чого порушуються умови нормальної експлуатації агрегатів. Ці зміни необхідно враховувати в розрахунках працездатності та несучої здатності конструкцій.

Зараз на АТ «Турбоатом» є інтерес у розробці нового покоління парових турбін потужністю 550 – 750 МВт. Прототипом під час створення такої конфігурації турбін служить існуюча серійна турбіна потужністю 500 МВт. За тривалої експлуатації зазначеної турбіни мала місце низка порушень цілісності елементів її конструкції:

пошкодження замкового з'єднання робочих лопаток 1-го ступеня ЦСТ [1];

порушення щільності горизонтального роз'єму корпусу ЦВТ.

Попередній аналіз дає підстави говорити про недостатність несучої здатності цих вузлів під дією тих чи інших силових навантажень. Ця обставина, насамперед, пов'язана з недосконалістю розрахункової бази того часу і складністю врахування максимальної кількості чинників, таких як складне геометричне виконання, наявність градієнта температур, просторове навантаження, контактна взаємодія елементів у з'єднанні, робота за межами пружної області. Послідовне врахування зазначених факторів у процесі вирішення задачі визначення та аналізу напруженого стану елементів турбіни дозволив визначити ступінь впливу того чи іншого фактора на їх міцність [2]–[6]. Напружений стан зазначених вузлів визначався за допомогою методу скінченних елементів [7], [8]. Вирішення цих завдань проводилося з урахуванням контактної взаємодії елементів у з'єднанні [7], [8].

### Постановка задачі

Метою цієї статті є визначення напружено-деформованого стану вище зазначених конструкцій з урахуванням впливу пластичного деформування елементів у з'єднанні.

Для опису напружено-деформованого стану з урахуванням впливу пластичного деформування елементів у цій статті використовується теорія пружно-пластичних деформацій [9]. Водночас повна деформація матеріалів у поєднанні є сумою пружної і пластичної та температурної деформацій.

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p + \epsilon_t, \quad (1)$$

де  $\epsilon_e$  – пружна складова повної деформації;  
 $\epsilon_p$  – пластична складова повної деформації;  
 $\epsilon_t$  – температурна складова повної деформації.

Під час опису кривих деформування матеріалів у цій статті використовуються мультілінійна апроксимація [10], що дозволяє найбільш точно задати як вихідні дані характеристику пластичного деформування – криву деформування матеріалу.

У [11] наведені механічні властивості матеріалів, що використовуються під час виготовлення зазначених елементів турбіни.

Навантаження, які визначають напружено-деформований стан зазначених вузлів, приймалися аналогічно як і в раніше опублікованих роботах [5], [6].

Для оцінки впливу пластичного деформування на перерозподіл навантажень використані скінчено-елементні моделі, наведені в [5], [6].

### Матеріали дослідження

Аналіз напружено-деформованого стану з метою оцінки впливу пластичності правильно починати з розгляду картини розподілу еквівалентних напружень.

У результаті розрахункових досліджень отримано розподіл еквівалентних напружень по замковому з'єднанню (Рисунок 1).

Отримані в результаті рішення задачі розподілу еквівалентних напружень у замковому з'єднанні робочих лопаток мають складний просторовий характер. Наведена картина є результатом перерозподілу напружень унаслідок пластичного деформування матеріалу диска – сталі 20Х3МФА. Бачимо, що мають місце зони з рівнем напружень вище значення границі текучості за робочої температури –  $\sigma_T = 450$  МПа. Це область навколо і вище отворів під установлення штифтів, а також область галтельних переходів реборд і основи диска. Максимальний рівень еквівалентних напружень досягає 771 МПа.

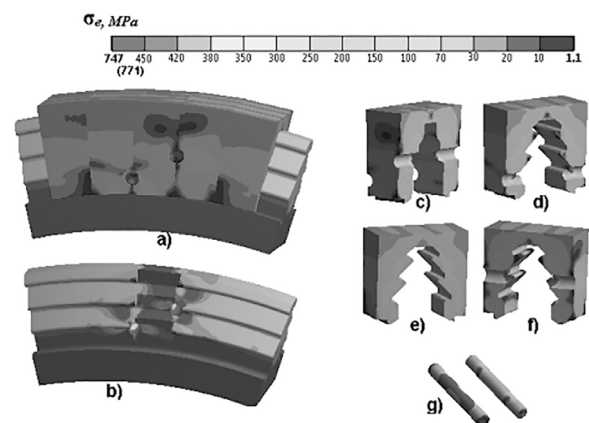


Рисунок 1 – Розподіл еквівалентних напружень у замковому з'єднанні, МПа: а) – замкове з'єднання; б) – диск; с) – замкова лопатка; д) – передзамкова лопатка з нижнім розташуванням штифта; е) – робоча лопатка; ф) – передзамкова лопатка з верхнім розташуванням штифта; г) – фіксуючі штифти

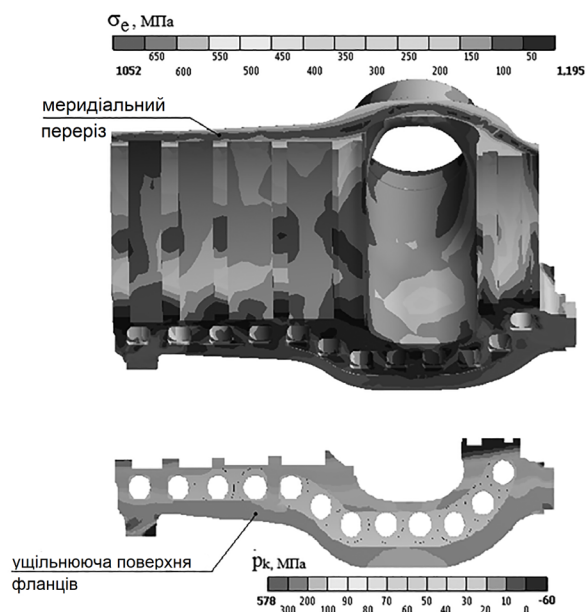


Рисунок 2– Розподіл еквівалентних напружень в корпусі  $\sigma_e$ , МПа і контактного тиску на горизонтальному роз'ємі  $p_k$ , МПа.

Перевищення рівня залишкових напружень у диску відносно заданого значення границі плинності, вочевидь, пов'язано з неможливістю подальшого деформування і стисненістю деформацій через особливості конструкції замкового з'єднання робочих лопаток.

Нижче наведені результати розрахункових досліджень напружено-деформованого стану корпусу парової турбіни (Рисунок 2).

Як бачимо з Рисунка 2, максимальні місцеві напруження, які чітко відображені в картині розподілу еквівалентних напружень у корпусі, спостерігаються в області задньої опорної лапи і становлять близько 450 МПа, що пов'язано з деформацією матеріалу від високого контактного тиску на ущільнювальній поверхні. В голові корпусу, а саме, на ділянці перемички між паропідвідними патрубками, середні за товщиною стінки напруження становлять близько 100 МПа. На ущільнювальній поверхні фланців, розподіл контактного тиску загалом знаходиться в позитивній площині, що свідчить про відсутність пропарювання.

## Висновки

Наведені в цій статті результати дозволили охарактеризувати ступінь релаксації і перерозподілу напружень у конструкції порівняно з результатами, отриманими раніше. Використання наведеної методики розрахунку

у процесі проектування нових конструкцій елементів парових турбін, що працюють у зоні високих теплових і силових навантажень, під час врахування контактної взаємодії елементів у з'єднанні, врахування різних механічних і фізичних властивостей матеріалів, а також їх зміни залежно від робочої температури вже на цьому етапі розвитку програмного забезпечення дозволяє виявити проблемні місця в конструкції і запобігти надалі поломкам у турбіні. Ця методика розрахунку за допомогою виявлення проблемних зон і їх посилення, дозволяє значно збільшити експлуатаційну надійність не тільки турбоагрегата, а й атомного блока загалом, а також знизити економічні витрати, зумовлені простоем турбоагрегата у процесі виконання ремонтних робіт.

## Список використаної літератури

1. Методические указания по расследованию причин повреждений деталей роторов паровых турбин электростанций: РД 153-34.1-17.424-2001. М.: ОАО «ВТИ», 2002. 82 с.
2. Швецов В. Л., Литовка В. А., Пальков И. А., Пальков С. А. Исследование напряженно-деформированного состояния замкового соединения рабочих лопаток. *Проблемы машиностроения*. 2012. № 2.С. 31–36.
3. Швецов В. Л., Губский А. Н., Пальков И. А., Пальков С. А. Прочность высоконапряженных элементов паровой турбины. *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. 2012. № 7.С. 70 –75.
4. Шульженко Н. Г., Гришин Н. Н., Пальков И. А. Напряженное состояние замкового соединения рабочих лопаток турбины. *Проблемы машиностроения*. 2013. № 3. С. 37–45.
5. Palkov I. A., Shulzhenko M. H., 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. №3. P. 36–43.
6. Palkov S. A., Shulzhenko M. H. Elastic Stress-Strain State of Elements of the Internal High-Pressure Casing for Steam Turbines. *Journal of mechanical engineering*. 2019. Vol. 22, № 4. С. 32–40.
7. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Зайцев Б. Ф. *Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований)*: монография. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 370 с.
8. Подгорный А. Н., Гонтаровский П. П., Киркач Б. Н., Матюхин Ю. И., Хавин Г. Л. *Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций*: монография. АН УССР. Ин-т проблем машиностроения. К.: Наук. думка, 1989. 232 с.

9. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.

10. Каминский А. А., Бастун В. Н. Деформационное упрочнение и разрушение металлов при переменных процессах нагружения. К.: Наук. думка, 1985. 168 с.

11. Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении: справочник. Сост.: Либерман Л. Я., Пейсихис М. И.; Т. 1-3. Ленинград: ЦКТИ, 1966.

## References

1. RD 153-34.1-17.424-2001. Guidelines for investigating the causes of damage to parts of NPP steam turbine rotors. Moscow, JSC VTI, 82.

2. Shvetsov, V., Litovka, V., Palkov I., Palkov, S. (2012). Investigation of the stress strain state of rotor blade locking joint. *Problems of Mechanical Engineering*, (2), 31-36.

3. Shvetsov, V., Gubskiy, A., Palkov, I., Palkov, S. (2012). Strength of highly stressed components of a steam turbine. *Bulletin of the National Technical University KhPI*, (7), 70-75.

4. Shulzhenko, M., Grishin, M., Palkov, I. (2013). Stress state of the locking joint of turbine blades. *Problems of Machine Engineering*. (3), 37-45.

5. Palkov, I., Shulzhenko, M. (2019). Thermostressed state of the locking joint of turbine rotor blades of the first stage of K-500-240 steam turbine intermediate-pressure cylinder. *Journal of Mechanical Engineering*. (3), 36-43.

6. Palkov, S. (2019) Elastic stress strain state of elements of the inner high-pressure casing for steam turbines. *Journal of Mechanical Engineering*, 22(4), 32-40.

7. Shulzhenko, M., Gontarovskiy, P., Zaytsev, B. (2011). Tasks of thermal strength, vibration diagnostics and resource of power units (models, methods, research results). Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. – 370.

8. Podgorny, A., Gontarovskiy, P., Kirkach, B. (1989). Problems of contact interaction of structural components. Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Institute of Machine Engineering, Kyiv, Naukova Dumka, 232.

9. Malinin, M. (1975). Applied theory of plasticity and creep. Moscow, Mechanical Engineering, 400.

10. Kaminskiy, A., Bastun, V. (1985). Strain hardening and destruction of metals under variable loading processes. Kyiv, Naukova Dumka, 168.

11. Liberman, L., Peisikhis, M. (1966). Properties of steels and alloys used in boiler and turbine construction. Leningrad, NPO TsKTI.

## Stress Strain State of Steam Turbine Components under Plastic Deformation

Palkov I., Palkov S.

Joint-Stock Company «Turboatom», Kharkiv, Ukraine

Reliable operation of secondary equipment of PWR nuclear power plants is an integral part of nuclear and radiation safety of the entire NPP unit. The problem of stress strain state of steam turbine structural components under plastic deformation is considered. The theory of elastic-plastic deformations is used to solve the problem along with the finite element method. The paper presents the results of computer assessment of stress strain state of locking joint of working blades of the first stage of a intermediate-pressure cylinder (IPC) and high-pressure cylinder (HPC) body of a steam turbine, which makes it possible to characterize the degree of relaxation and stress redistribution in the structure in comparison with obtained earlier results. It is provided that the use of the presented calculation method in designing new structures of steam turbine components operating in the area of high thermal and power loads, taking into account the contact interaction of components, as well as different mechanical and physical properties of materials, and their changes depending on operating temperature, at this stage of software development allows one to identify problem areas in the design and prevent further breakdowns in the turbine. Based on the comparison of operational data of the developed design solutions and calculation assessment, it is proved that the chosen calculation method can significantly increase the operational reliability not only of the turbine unit but also the nuclear unit as a whole, as well as reduce economic costs caused by turbine unit downtime during maintenance.

Keywords: turbine, locking joint, working blade, case, stress state, deformation curve, yield point.

Отримано 18.11.2020.