

УДК 539.4.015: 658.512

М. Шульженко, д.т.н., проф., А. Ольховський

Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, Україна

ОЦІНКА ЗМІНИ ВІБРОМІЦНОСТІ ЛОПАТОК ПОТУЖНОЇ ПАРОВОЇ ТУРБИНИ ПІСЛЯ ЇХНЬОГО РЕМОНТУ

M. Shulzhenko, Dr., Prof., A. Olkhovsky

A. Pidhornyi Institute of Mechanical Engineering Problems, Ukraine

EVALUATION OF CHANGES IN THE VIBRATION STRENGTH OF BLADES OF A POWERFUL STEAM TURBINE AFTER THEIR REPAIR

Abstract. The research is related to the need to assess the possibility of prolonging the trouble-free operation of turbine blades of the K-1000-60/3000 type. The change in the maximum stresses of the blades under the load from the steam flow with one damaged blade after repair is determined. Three-dimensional finite-element models of components and the corresponding mathematical support for the calculation of stationary harmonic oscillations are used.

Останні ступені парових турбін К-1000-60/3000 працюють в умовах волого-парового середовища. Після відпрацювання понад 180 тис. годин виявляється помітна ерозія на ряді лопаток. При цьому іноді спостерігаються сліди пластичних деформацій, що може призводити до появи мікротріщин і до розвитку аварійних ситуацій. Ерозійні пошкодження розташовуються щільно у верхній третині вхідних кромки та у нижній третині вихідних кромки лопаток. Для таких лопаток рекомендується проводити згладжування пошкоджень під час профілактичних зупинок турбін.

В даній роботі на основі чисельно-розрахункового дослідження вимушених коливань лопаток на диску від дії розподілених гармонічних навантажень на лопатки, що моделюють вплив паропотоку, оцінюється зміна максимальних еквівалентних напружень для різних варіантів обробки лопаток при видаленні пошкоджених ерозійних зон.

Розглядається декілька варіантів тривимірних скінченно-елементних моделей окремих лопаток та системи диск-лопатки. Тривимірні скінченно-елементні моделі системи диск-лопатки складається з 60 тис. елементів та має понад 175 тис. вузлів. Використовувались призматичні та тетраедральні криволінійні скінченні елементи. Демпфування в системі враховувалось за Фойхтом відповідними коефіцієнтами. Отримано результати чисельного дослідження впливу видалення частини лопаток в зоні ерозійних пошкоджень після відновлювального ремонту на вібраційні характеристики окремих лопаток та в системі облопаченого диска з урахуванням бандажної стрічки. Визначається залежність максимальних еквівалентних напружень від частоти збудження в широкій області частот. Навантаження задається рівномірно розподіленим та лінійно змінним вздовж лопатки. Приймається, що фізико-механічні характеристики матеріалу лопаток зберігаються (як для вихідного варіанта) після ремонту лопаток і обробки їх поверхні. Всі лопатки вважаються однаково обробленими так, що циклічна симетрія системи не порушується.

Показано, що зі зменшенням хорди лопаток у нижній частині після ремонту лопаток можуть з'являтися частотні області підвищеної вібрації. В нижній частині лопаток збільшуються максимальні напруження в порівнянні з вихідним варіантом без пошкоджень. Оцінюється можливість подовження ресурсу лопаток після ремонту і

обробки за багатоциклової втоми. Ресурс безпечної експлуатації лопаток може бути продовжений, якщо їх хорда в нижній частині не менша за 150 мм.

Вказані вище результати отримані для циклічно симетричної системи диск-лопатки. Після тривалої експлуатації на практиці спостерігаються випадки, коли значні ерозійні пошкодження мають місце на одній або декількох поряд розташованих лопатках. Під час їхньої експлуатації та після відновлювального ремонту цих лопаток система стає суттєво циклічно несиметричною. Тому оцінка зміни напруженості лопаток для таких циклічно несиметричних систем має значний інтерес і практичне значення.

Нижче розглядається зміна напруженості лопаток на диску, сполучених бандажною стрічкою при наявності в системі однієї пошкодженої лопатки після її відновлювального ремонту. Зміна геометрії лопаток задавалась в нижній третині на вихідній кромці, хорда лопатки задавалась мінімально допустимою 150 мм, що встановлено для циклічно симетричної системи з усіма однаково обробленими лопатками. Розрахункове визначення реакції системи на гармонічне збудження, що моделює вплив парового навантаження, дозволяє прогнозувати зміну залишкового ресурсу лопаток ступеню, породженою циклічною несиметрією системи. При цьому основна увага приділяється області частот 50 та 2100 Гц, оскільки на робочому режимі діє навантаження, що викликане паропотоком від напрямних лопаток. Його частота є кратною частоті обертання 50 Гц та числу напрямних лопаток 42 і дорівнює 2100 Гц. Основними причинами збудження коливань системи диск-лопатки з частотою 50 Гц є залишкова невірноваженість системи та вібрації ротору на масляному шарі підшипників в сталому режимі експлуатації (без наявності автоколивань).

На основі чисельного дослідження максимальних еквівалентних напружень в лопатках для циклічно несиметричних систем можна відмітити наступне.

Максимальні еквівалентні напруження в лопатках суттєво залежать від частоти збудження. При її зростанні напруження в середньому зменшуються, проте в окремих випадках в областях частот обертання та збудження збільшуються. В області частоти обертання максимальні напруження в системі без пошкоджень, а особливо з усіма пошкодженими і однаково обробленими лопатками, більші за напруження в системі з порушенням циклічної симетрії. В областях частоти збудження 2100 Гц напруження в системі без пошкоджень та з усіма пошкодженими і однаково обробленими лопатками значно менші за напруження в лопатках в системі з порушенням циклічної симетрії. Виключення спостерігаються в деяких лопатках, що розташовані ліворуч від пошкодженої (проти обертання ступеню) та праворуч від пошкодженої (за обертанням ступеню).

В циклічно несиметричній системі максимальні напруження в лопатках, що розташовані зліва та справа від пошкодженої лопатки змінюються по різному. В середньому лопатки зліва від пошкодженої мають більші напруження, ніж лопатки справа. Причому, при віддалені від пошкодженої лопатки, напруження змінюються хвильоподібно від лопатки до лопатки. Значні збільшення (в декілька разів) напружень спостерігаються в першій лопатці зліва від пошкодженої та в 39 лопатці справа від пошкодженої (за обертанням ступеню). В пошкодженій лопатці вони близькі до напруження в першій зліва, але зі збільшенням частоти різко зменшуються. А в першій зліва від пошкодженої – різко зростають і перевищують напруження, які спостерігаються в 39 лопатці, що знаходиться справа від пошкодженої. Вказане суттєво впливає на надійність роботи і довговічність ступеню турбіни.

Таким чином, з появою і розвитком нерівномірного ерозійного пошкодження лопаток при експлуатації турбіни система стає циклічно несиметричною. Це суттєво може вплинути як на вібраційний стан ротора, так і на напруженість лопаток, та навіть може бути причиною розвитку аварійної ситуації.