

УДК 534.1:539.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДАЛЬНОГО АНАЛИЗА ПРИ ДИАГНОСТИКЕ СВАРНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИ СИММЕТРИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Н.А.Тютрин¹, Н.А. Астафьева²

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Приведены результаты компьютерного моделирования свободных колебаний сварных конструкций с дефектами. Результаты проведенных численных экспериментов показывают, что дефекты сварных соединений могут внести значительную расстройку в спектр собственных колебаний сварных крыльчаток промышленных вентиляторов, относящихся к циклически симметричным конструкциям. Установлено, что расстройка приводит к заметной локализации колебаний на низших формах на лопатке с дефектом, которая может служить диагностическим признаком при проведении дефектации подобных конструкций.

Ил. 5. Библиогр. 8 назв.

Ключевые слова: сварные конструкции; циклически симметричные конструкции; свободные колебания; модальный анализ.

MODAL ANALYSIS USAGE IN DIAGNOSTICS OF WELDED CYCLICALLY SYMMETRIC STRUCTURES

N.Tyutrin, N.Astaf'eva

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov Street, Irkutsk, Russian Federation, 664074

The paper presents the results of computer simulation of free oscillations of welded structures with defects. The results of the conducted numerical experiments show that weld defects can make a significant mistuning in the spectrum of natural oscillations of welded impellers industrial fans relating to cyclically symmetric structures. The article establishes that the detuning leads to a substantial localization of vibrations in the lower forms on the blade with a defect, which can serve as a diagnostic feature when performing fault detection of such structures.

Keywords: welded structure; cyclically symmetric structures; free vibrations; modal analysis

Дефекты сварных конструкций, такие как трещины, непровары, подрезы, прожоги, поры и др., являются концентраторами напряжений и могут привести при эксплуатации конструкции к увеличению уровня напряжений в зоне дефекта в несколько раз по сравнению с номинальными значениями. Дефекты часто становятся причиной разрушения конструкции при относительно низких уровнях рабочих нагрузок. В этой связи разработка эффективных способов дефектации сварных конструкций является актуальной задачей.

Из литературы известны способы определения дефектов в материале конструкции, основанные на сравнении колебаний эталонной и исследуемой конструкций [1]. При этом для выбранных нескольких форм колебаний определяют собственные частоты колебаний конструкции. Разность значений резонансных частот эталонной и исследуемой конструкций говорит о наличии дефекта. Недостатком данного способа в том, что собственная частота колебаний является характеристикой конструкции в целом, и ее изменению можно сделать заключение о наличии дефекта, однако указать место его расположения не представляется возможным. Также необходимо учитывать, что размеры дефекта очень мало влияют на собственную частоту. В силу этого данный способ обладает низкой надежностью при диагностике конструкций с дефектами.

Модальный анализ заключается в определении собственных частот и форм колебаний конструкций. Частоты и формы колебаний являются основными характеристиками свободных колебаний конструкций. Современные пакеты прикладных программ, такие как ANSYS, Nastran, SolidWorks и др., позволяют проводить модальный анализ конструкций любой сложности. В основе этих программных комплексов лежит метод конечных элементов – самый универсальный и наиболее широко применяемый для инженерного анализа конструкций метод.

Согласно методу конечных элементов, уравнение свободных колебаний в матричной форме

¹ Тютрин Николай Орестович, магистрант кафедры машиностроительных технологий и материалов, e-mail: tno73@yandex.ru

Tyutrin Nikolay., graduate student of Department of mechanical engineering technologies and materials, e-mail: tno73@yandex.ru

² Астафьева Наталья Анатольевна, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, e-mail: anstella@mail.ru

Astaf'eva Natalia, associate professor of mechanical engineering technologies and materials, e-mail: anstella@mail.ru

имеет вид:

$$M\delta + K\delta = 0,$$

где K – матрица жесткости; M – матрица масс; δ – вектор перемещений узлов; δ – вектор ускорений.

Матрицы жесткости и масс имеют вид квадратных матриц размерностью n :

$$K = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{pmatrix}, \quad M = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & M_{22} & \dots & M_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n1} & M_{n2} & \dots & M_{nn} \end{pmatrix}$$

Для расчета собственных колебаний конструкции необходимо построить ее конечноэлементную модель, содержащую информацию о ее геометрии (форма, размеры), материале (модуль упругости, плотность, коэффициент Пуассона) и условиях закрепления (граничные условия). На рис. 1 представлена конечноэлементная модель пластины с отверстием (1/4 часть).

Проведенное в программном комплексе Autodesk Inventor большое количество численных экспериментов на простых конструкциях – пластинах, стержнях, а также 3х-мерных сварных деталях показало, что наличие дефектов в сварных швах подобных сварных конструкций незначительно влияет на спектр собственных частот и форм колебаний. В частности, проведен анализ собственных колебаний плоской пластиной с отверстием в зоне шва. Размеры пластины 200x20x2. Материал – сталь (модуль упругости $E=2,1 \times 10^5$ МПа, плотность 7,85 г/см³, коэффициент Пуассона – 0,3). Отверстие имеет значительные размеры – 5 мм.

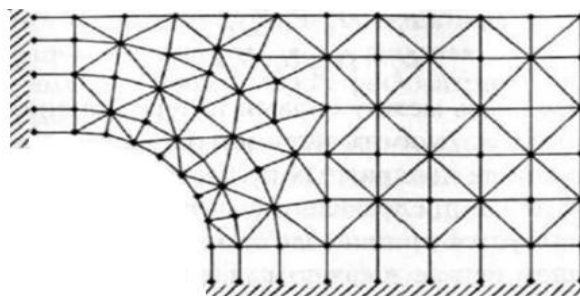


Рис. 1 Модель пластины с концентратором – отверстием в центре

На рисунке 2 представлена первая форма (изгибная) собственных колебаний исходной пластины и пластины с отверстием. Изменение собственной частоты пластины в случае добавления к модели отверстия – 1% в сторону уменьшения. Форма колебаний не изменилась. Это говорит о том, что наличие даже такого относительно большого отверстия в зоне сварного шва не приводит к значительным изменениям собственной частоты и формы колебаний пластины.

Однако, в технике существуют конструкции, параметры колебаний которых (частоты и формы) очень чувствительны к малым изменениям своей геометрии, массы, свойств материала. Примерами таких конструкций являются, крыльчатки промышленных вентиляторов, дымососов, воздуходувок и пр. (см. рис. 3).

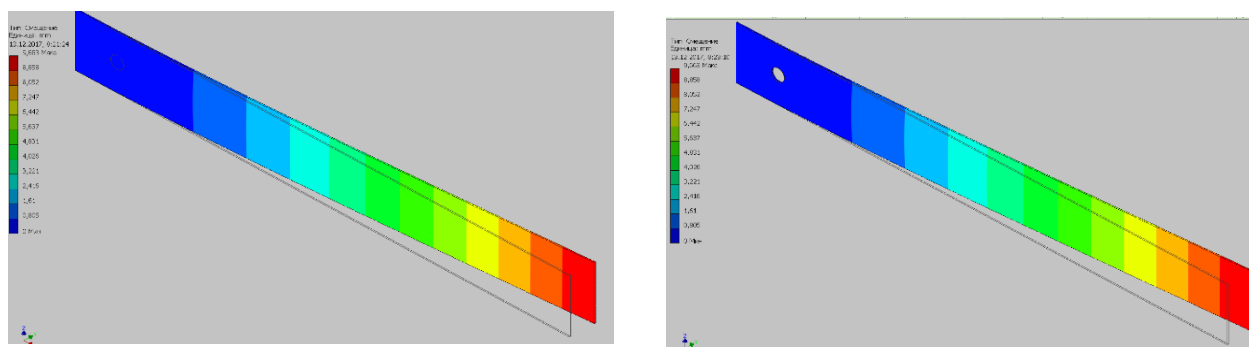


Рис. 2 Результаты модального анализа исходной пластины и пластины с отверстием

Крыльчатки промышленных вентиляторов, дымососов представляют собой сварные конструкции, в которых лопасти (лопатки) приварены к ротору шовной или точечной сваркой. Часто эти конструкции крупногабаритные и имеют большое количество лопаток. Дефектация подобных конструкций – достаточно трудоемкий процесс.

Все перечисленные конструкции обладают свойством циклической симметрии. Эти конструкции имеют специфический спектр колебаний, отличающийся от других конструкций наличием парных мод с одинаковой частотой. Колебания таких конструкций очень чувствительны к любым, даже очень малым нарушениям симметрии. Любая неидентичность Крыльчатки промышленных вентиляторов, дымососов представляют собой сварные конструкции, в которых лопасти (лопатки) приварены к ротору шовной или точечной сваркой. Часто эти конструкции крупногабаритные и имеют большое количество лопаток. Дефектация подобных конструкций – достаточно трудоемкий процесс.

Все перечисленные конструкции обладают свойством циклической симметрии. Эти конструкции имеют специфический спектр колебаний, отличающийся от других конструкций наличием парных мод с одинаковой частотой. Колебания таких конструкций очень чувствительны к любым, даже очень малым нарушениям симметрии. Любая неидентичность секторов, т.е. утрата симметрии вносит в такую конструкцию так называемую расстройку (mistuning). Расстройка приводит к изменению собственных частот, форм, локализации колебаний.



Рис. 3. Примеры циклически симметричных сварных конструкций

Расстройка может быть внесена в конструкцию благодаря дефектам сварки (например, непроварам), а также эксплуатационным дефектам, например, когда происходит разрушение одной или нескольких сварных точек. Возникающая при этом локализация колебаний на низших модах может служить диагностическим признаком при диагностике подобных конструкций.

При конечноэлементном анализе циклически симметричных конструкций используются такие методы, как метод конденсации, метод суперэлементов и др. [2–8]. Эти методы позволяют использовать для расчета информации только об одном секторе конструкции, что позволяет значительно экономить ресурсы компьютера (память, время расчета).

В программном комплексе Autodesk Inventor была подготовлена модель и исследованы колебания 4-х лопастной стальной крыльчатки с длинными и узкими лопатками (рис. 4).

Результаты численного анализа показали, что дефект в зоне сварного шва незначительно повлиял на собственную частоту колебаний, однако привел к значительной локализации на первой (зонтичной) моде (рис. 5). Как видно из рисунка, лопатка с дефектом колеблется с максимальной амплитудой, остальные лопатки неподвижны.

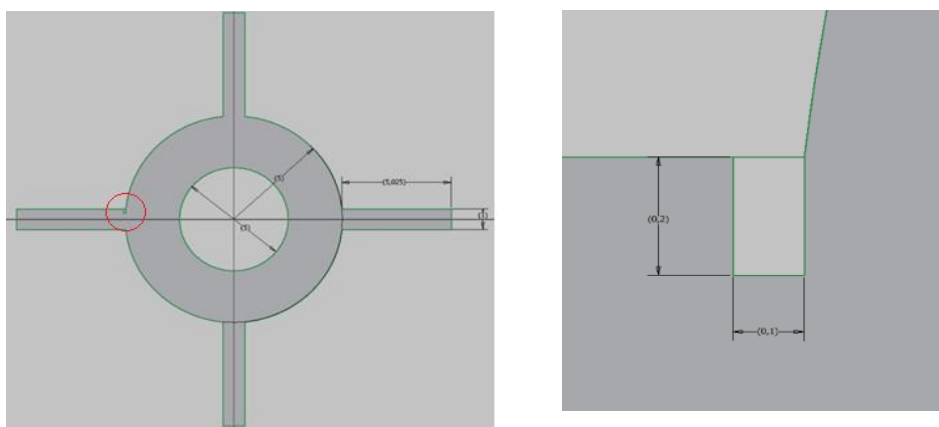


Рис. 4. Геометрическая модель крыльчатки и модель дефекта

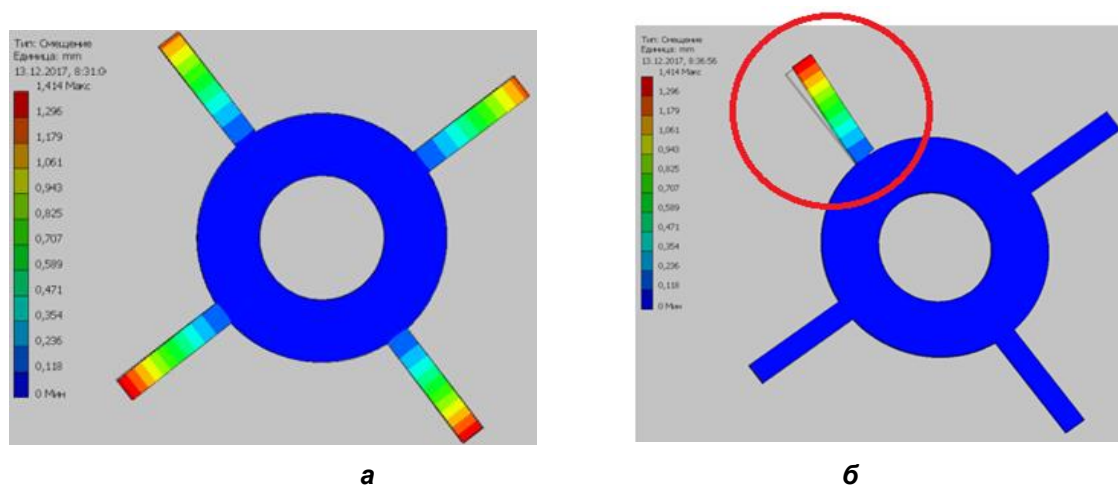


Рис. 5. Первая форма колебаний крыльчатки:
а – без дефекта; б – с дефектом

Проведенные численные эксперименты показывают, что дефекты сварных соединений могут внести значительную расстройку в спектр собственных колебаний сварных крыльчаток промышленных вентиляторов, относящихся к циклически симметричным конструкциям. Это обычно приводит к заметной локализации колебаний на низших формах на лопатке с дефектом, которая может служить диагностическим признаком при проведении дефектации подобных конструкций.

Библиографический список:

1. Косицын А.В. Метод вибродиагностики дефектов упругих конструкций на основе анализа собственных форм колебаний // Приборы и методы измерений. 2011. № 2 (3). С. 129–135.
2. Рыжиков И.Н., Репецкий О.В., Нгуен Тьен Куэт. Один из подходов к оценке долговечности рабочих колес турбомашин // Вестник ИргТУ. 2015. № 5 (100). С. 22–27.
3. Рыжиков И.Н. Экспериментальные исследования расстройки параметров моделей рабочих колес газотурбинных двигателей // Вестник ИргТУ. 2014. № 12 (95). С. 53–57.
4. Рыжиков И.Н. Оценка и возможные способы увеличения долговечности элементов роторов ГТД // Вестник ИргТУ. 2007. № 1 (29). С. 155–158.
5. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н. Анализ тепловых полей и термонапряженного состояния деталей турбин // Вестник стипендиатов ДААД. 2001. № 1. С. 89.
6. Нгуен Т.К., Репецкий О.В., Рыжиков И.Н. Прогнозирование уровней напряжений в лопатках рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров // Вестник ИргСХА. 2017. № 78. С. 142–151.
7. Рыжиков И.Н., Репецкий О.В., Нгуен Т.К. Динамика элементов роторов турбомашин на переходных режимах работы с учетом нелинейных эффектов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, № 11 (118). С. 61–68.
8. Repetckii O., Ryzhikov I., Nguyen T.Q. Dynamics of gas turbine engines rotors taking into account non-linear effects. *Vibroengineering PROCEDIA*. 2016. Vol. 8. P. 361–365.