

ПУТИ СНИЖЕНИЯ МАССЫ КОРПУСА РАБОЧЕГО КОЛЕСА ШАХТНОГО ОСЕВОГО ВЕНТИЛЯТОРА С ПОВОРОТНЫМИ ЛОПАТКАМИ

Надежда Владимировна Панова

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091 Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, к.т.н., н.с., 89133990960, e-mail: nadejda_panova@bk.ru

В данной статье рассматривается применение методов топологической оптимизации при проектировании корпуса рабочего колеса, рассчитанного на повышенные скорости вращения с использованием программного комплекса ANSYS.

В качестве целевой функции при оптимизации рабочего колеса используется минимальная податливость, а в качестве параметра оптимизации принято изменение внутреннего конструктивного объема, при ограничениях на внешнюю геометрию колеса.

При оптимизации корпуса рабочего колеса установлено, что можно уменьшить массу силового пояса, один диск сделать несущим, а второй более тонким или перейти на схему рабочего колеса с одним диском. Кроме того, установлено, что при проектировании можно применить элементы ферменной конструкции.

Ключевые слова: осевой вентилятор, топологическая оптимизация, корпус рабочего колеса, снижение массы.

REDUCTION IN WEIGHT OF HOUSING OF AXIAL MINE FAN IMPELLER WITH ROTATING BLADES

Nadezhda V. Panova

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, +7 913 399 0960, e-mail: nadejda_panova@bk.ru

The study uses topological optimization techniques in design of the housing of an impeller meant for the increased rotational speeds in ANSYS. The objective function of the impeller optimization is the minimum yield, and the optimization parameter is assumed as the change in the interior volume of the structure under certain constraints imposed on the external geometry of the impeller. The optimization of the impeller housing shows that it is possible to reduce the weight of the power belt, and to make one web to be load-bearing and the other web to be thinner, or to switch to the impeller with one web. Moreover, the design can use some elements of a lattice structure.

Keywords: axial fan, topology optimization, impeller housing, weight reduction

Введение

В шахтах с ростом глубины ведения работ и выделений вредных примесей, а так же эволюцией вентиляционных параметров за период эксплуатации возрастает необходимость увеличения поля покрытия требуемых режимов проветривания [1-2]. Одним из вариантов решения этого вопроса является увеличение окружных скоростей вращения по концам лопаток осевого вентилятора до 230 м/с, что так же способствует повышению реверсивных качеств вентиляторов по сравнению с менее

скоростными машинами, рассчитанными на те же значения полного давления [3-4], но в этом случае значительно возрастают и нормальные силы инерции, снизить которые возможно за счет снижения массы лопаток и корпуса рабочего колеса. Возможное снижение массы лопаток высоконагруженных вентиляторов и турбин путем топологической оптимизации ранее уже было рассмотрено рядом авторов [5-8].

Методы и материалы

В данной статье рассматривается возможность применения топологической оптимизации при проектировании корпуса рабочего колеса с повышенными скоростями вращения методом математического моделирования с использованием программного комплекса ANSYS [9-15].

Цель топологической оптимизации – получение оптимального распределения материала при заданных нагрузках и граничных условиях. Рассматривается возможность оптимизации с обеспечением допустимого уровня напряжений в элементах корпуса рабочего колеса с учетом предельных прочностных характеристик используемых материалов и принятых коэффициентов запаса прочности.

В программном пакете ANSYS для топологической оптимизации используется метод: SIMP (Solid Isotropic Material with Penalty, твердый изотропный материал с пенализацией). Основополагающая идея SIMP-метода заключается в создании поля виртуальной плотности заданной геометрии, которое представляет собой поле безразмерных относительных плотностей ρ , где каждому элементу сетки присваивается значение ρ от 0 до 1. Перед оптимизацией поле плотности однородно ($\rho = 1$). Назначение метода состоит в уменьшении количества элементов конструкции с нулевой и некоторой промежуточной относительной плотностью при заданных граничных условиях и заданном условии оптимизации – снижение массы до определенного процента от первоначальной конструкции [16-17].

В данной статье возможность оптимизации корпуса рабочего колеса рассмотрена на примере осевого вентилятора главного проветривания ВО-36К с диаметром рабочего по концам лопаток 3600 мм и окружной скоростью вращения 62.8 рад/с, масса колеса до оптимизации 3692 кг. Перед оптимизацией задается масса бедующей конструкции в процентах от массы первоначальной конструкции – 70%, тем самым определяется диапазон изменения виртуальной плотности. Задаются области в которых производить оптимизацию не надо, в нашем случае это ступица и места крепления лопаток.

Корпус рабочего колеса находится под воздействием центробежных сил от собственной массы, действующей на весь корпус рабочего колеса от масс закрепленных лопаточных узлов, действующих на силовой пояс РК [18-19]. Аэродинамическими нагрузками в расчетах можно пренебречь, так как они малы по сравнению с центробежными (рис. 1).

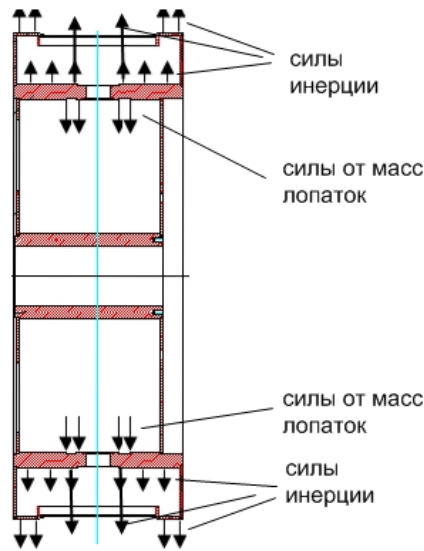


Рис. 1. Силы действующие на корпус РК

Элементы корпуса проектируются из стали 10ХСНД ГОСТ 19282-73 (предел текучести $\sigma_T = 400$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 540$ МПа).

Для оценки прочности принято, что, коэффициент запаса $n = 1.8$, соответственно, допускаемые напряжения:

$$\sigma_{\text{доп}} = \sigma_T / n = 220 \text{ МПа.}$$

Проводим статический расчет прочности для определения минимальной податливости, а далее проводим оптимизацию корпуса рабочего колеса. На рис. 2 представлено распределение материала в корпусе рабочего колеса после оптимизации, где серым цветом показаны участки, которые необходимо оставить в первоначальном виде, а оранжевым участки, в которых после оптимизации можно снизить металлоёмкость по сравнению с изначально заложенной конструктивно.

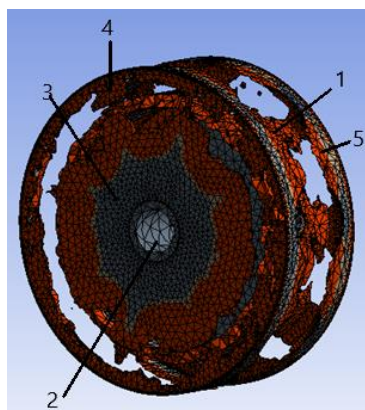


Рис. 2. Распределение материала в корпусе рабочего колеса после оптимизации
1 - силовой пояс, 2 - ступица, 3 - опорный диск, 4 - несущий диск, 5 - обечайка.

Результаты

После топологической оптимизации в ANSYS поверхность тела не получается гладкой, а состоит из граней элементов сетки, оставшихся после оптимизации, поэтому необходимо провести интерпретацию конечно-элементной модели к твердотельной. Эта работа является отдельным достаточно сложным процессом. Для сглаживания поверхностей на 3D моделях есть несколько методов: метод обрисовки моделей вручную в пакетах 3D-моделирования, использование PolyNURBS сплайнов или сглаживание сетки в специальных пакетах, например Autodesk meshmixer [20]. Стоит учесть, что при сглаживании и преобразовании полученной конечно-элементной модели в твердотельную возможно изменение характеристик прочности. Окончательная форма оптимизированного корпуса рабочего колеса должна прорабатываться с учетом уровня затрат и технологических возможностей изготовления, и прочих факторов.

В результате проведенной оптимизации, установлено, что можно уменьшить массу силового пояса, один опорный диск сделать несущим, а второй более тонким или перейти на схему рабочего колеса с одним опорным диском. Кроме того, установлено, что при проектировании можно применить элементы ферменной конструкции.

Работа выполнена в рамках научной темы FWNZ-2021-0004

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петров Н.Н., Панова Н.В., Грехнёва Е.Ю. Адаптация аэродинамических характеристик главных вентиляторов к изменениям вентиляционных режимов шахт// ФТПРПИ.– 2013. – №5. – С.119 – 126.
2. Петров Н.Н., Грехнева Е.Ю. Разработка аэродинамики и конструкции реверсивных вентиляторов местного проветривания. // Родник будущего. – 2011. – №4(8). – С. 76.–78
3. Красюк А.М., Лугин И.В., Косых П.В., Русский Е.Ю. обоснование способа продления ресурса шахтных двухступенчатых осевых вентиляторов главного проветривания. // ФТПРПИ.– 2019. – №3. – С.150 – 167
4. Косых П.В. Разработка аэродинамических схем высоконагруженных реверсивных осевых вентиляторов. Интерэкспо Гео-Сибирь. 2020. Т.2. С. 72-81.
5. Попова Д.Д., Самойленко Н.А., Семенов С.В., Балакирев А.А., Головкин А.Ю. Применение метода топологической оптимизации для уменьшения массы конструктивно подобного кронштейна трубопровода авиационного ГТД// Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника- 2018. - №55. - С. 42-53.
6. Власенков А.Н., Павлов А.П., Пасечкин Д.Ю Оптимизация конструкций изделий с применением систем автоматической оптимизации // Наука и бизнес: пути развития. - 2020. - №10 (112). С. 16-21.
7. Красюк А.М Русский Е.Ю. К вопросу оптимального проектирования лопаток осевых вентиляторов с повышенными скоростями вращения // ФТПРПИ.– 2020. – №6. – С.161 – 169.
8. Васильев Б.Е., Магеррамова Л.А. Анализ возможности применения топологической оптимизации при проектировании неохлаждаемых рабочих лопаток турбин // Вестник СГАУ. – 2015. - №3-1.- С. 139-147

9. Saleem W., Lu H., Yuqing F. 2008. Topology Optimization – Problem Formulation and Pragmatic Outcomes by integration of TOSCA and CAE tools. Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, WCECS 2008. SanFrancisco, USA: 6 p.
10. Eschenauer H., Olhoff N. Topology Optimization of Continuum Structures: A Review // ASME Applied Mechanics Reviews. 2001. Vol. 54. No. 4. Pp. 331-390.
11. Zhao J., Du F., Yao W. Structural Analysis and Topology Optimization of a Bent-Bar-Frame Piston Based on the Variable Density Approach // Proceedings of the ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference. 2014. Pp. 1-7.
12. Du F., Tao Z. Study on Lightweight of the Engine Piston Based on Topology Optimization // Advanced Materials Research. 2011. Vols. 201-203. Pp. 1308-1311.
13. Barbieria S.G., Giacopinia M., Mangerugaa V., Mantovani S. A Design Strategy Based on Topology Optimization Techniques for an Additive Manufactured High Performance Engine Piston // Procedia Manufacturing. 2017. Vol. 11. Pp. 641-649.
14. Hu, J., Li, M. Email Author, Yang, X., Gao, S. Cellular structure design based on free material optimization under connectivity control // CAD Computer Aided Design Volume 127, October 2020, Номер статьи 102854.
15. Zhao, L.a, Xu, B.a Email Author, Han, Y.a, Rong, J.b. Continuum structural topological optimization with dynamic stress response constraints // Advances in Engineering Software Volume 148, October 2020, Номер статьи 102834.
16. Башин К.А., Торсунов Р.А., Семенов С.В. Методы топологической оптимизации конструкций, применяющиеся в аэрокосмической отрасли // вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. — С. 51—61.
17. Кротких А.А. Максимов П.В. Исследование и модификация метода топологической оптимизации SIMP // Междунар. Науч.-исслед. журнал. – 2016. - №01(55). – С.91-94.
18. Петров Н.Н., Панова Н.В. Анализ влияния конструктивных элементов корпуса рабочего колеса на прочности высоконагруженных вентиляторов серии ВО // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 7 – С. 17 – 20.
19. Петров Н.Н., Панова Н.В. Исследование прочности рабочих колес со сдвоенными листовыми лопатками ряда высоконагруженных вентиляторов главного проветривания шахт // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №1 (50). – С. 190 – 194.
20. Максимов П. В., Фетисов К. В. Анализ методов доработки конечно-элементной модели после топологической оптимизации // Международный научно-исследовательский журнал. — 2016. — № 9 (51) Часть 2 . — С. 58—60.

© Н. В. Панова, 2021